

تحسين تقنية تشكيل الحزم الهجين في أنظمة 5G-NR باستخدام مخطط ترميز مسبق هجين منخفض التعقيد

هبا شفيق قشور^{1*} عبد الرزاق بدوي² علي أحمد³

¹. طالبة دكتوراه، مهندسة، جامعة دمشق كلية الهندسة، اتصالات.

مقدمة hiba.kashour88@damascusuniversity.edu.sy

². أستاذ مدرس، دكتور، جامعة دمشق كلية الهندسة، اتصالات متقدمة.

Gbadawil@damascusuniversity.edu.sy

³. أستاذ مدرس، دكتور، جامعة طرطوس كلية هندسة، اتصالات.

dr-ali-ahmad@tartous-univ.edu.sy

الملخص:

تعد تقنية تشكيل الحزم الهجين أحد أهم التقنيات المفتاحية في أنظمة 5G-NR الهدف الأساسي منها هو تعويض فقد المسار العالي الناتج عن استخدام الترددات الميلمترية العالية. تعتمد التقنية على استخدام مرمز مسبق هجين في المرسل ومجمع هجين في المستقبل. يوضح هذا البحث إمكانية تحسين أداء نظام 5G-NR عن طريق تعديل آلية الترميز المسبق الهرجين التقليدية، من خلال استخدام فكرة استنتاج أطوار مرحلة الترميز المسبق التماثلي من المرمز المسبق الهرجين الأمثل الناتج عن تطبيق نظام تشكيل حزمة رقمي كامل والذي يقدم أداء عالي، وذلك دون الحاجة إلى عمليات تكرارية معقدة أو عمليات تحليلية إضافية مكلفة، بحيث يقلل من تعقيد النظام وتحسين الكفاءة الطيفية للنظام، لاسيما عندما يكون عدد تدفقات البيانات أقل من عدد السلاسل الراديوية. تظهر نتائج التحليل العددي للخوارزمية المقترحة إمكانية الوصول إلى أداء مقبول مقارنة بأداء النظام الرقمي الكامل، ومقارباً لأداء الخوارزميات التكرارية المقترحة حديثاً مع تقليل كلفة العمليات الحسابية وتقليل تعقيد النظام.

الكلمات المفتاحية: الجيل الخامس-الراديو الجديد، تشكيل الحزمة الهرجين، الترميز المسبق الهرجين، الكفاءة الطيفية، تحليل القيمة المفردة.

تاريخ الإيداع: 2023/4/6

تاريخ القبول: 2023/6/21



حقوق النشر: جامعة دمشق -
سوريا، يحتفظ المؤلفون بحقوق
النشر بموجب CC BY-NC-SA

Enhancing hybrid beamforming technology in 5G-NR systems using low-complexity hybrid precoding scheme

Hiba Shafiq Kashour^{*1} Abdelrazak-Badawia² Ali Ahmad³

^{*1}. PhD student, Eng, Department of Communications and Electronics Engineering - Damascus University hiba.kashour88@damascusuniversity.edu.sy

². Prophesier, Dr, Department of Communications and Electronics Engineering - Damascus University Gbadawil@3damascusuniversity.edu.sy

³. Prophesier, Dr, Tartous University, ICTE

ali-ahmad@tartousuniversity.edu.sy

Abstract:

Hybrid beamforming technology is one of the most important keys in 5G-NR systems, the main goal is to compensate the high path-loss for high millimeter frequencies used. It depends on using a hybrid precoder at the transmitter and a hybrid combiner at the receiver. This research demonstrates the possibility of enhancing the performance of the 5G-NR system by using the idea of deriving the phases of the analog precoding phase from the optimal fully digital precoder, That's without use unnecessary additional analytical processes or complex operations , which reduces system complexity and improves system spectral efficiency, especially when the number of data streams is less than the number of radio chains. The results of the numerical analysis of the proposed algorithm show the possibility of reaching an acceptable performance comparing the complete digital system performance, and close to the performance of the newly proposed algorithms, while reducing the cost and complexity.

Keywords: 5G-NR, Hybrid beamforming(HP), Hybrid precoding(HP), Spectral Efficiency (CE), SVD.

Received: 6/4/2023

Accepted: 21/6/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

(5G-NR) وهو ما يسمى بتشكيل الحزمة
(Saasan,2022,510).

إن تشكيل الحزمة مع تدفقات بيانات متعددة والذي يعبر عنه بالترميز المسبق (precoding) يمكن أن يستخدم بشكل كبير لتحسين الكفاءة الطيفية للنظام (Ayach et al.,2014,2).

في أنظمة MIMO التقليدية ، والتي تعرف بأنها نظام MIMO الرقمي الكامل ، يتم ترميز رموز الإرسال مسبقاً في النطاق الأساسي (Base Band) قبل تمريرها إلى سلسلة التردد الراديوي (RF-Chain) وتحويلها إلى تردد الموجة الحاملة (Dilli et al.,2022,3). يجب أن يكون عدد سلاسل الترددات الراديوية في هذا التكوين مساوياً تماماً لعدد عناصر الهوائيات ، لذا لا يمكن استخدامه مباشرةً مع (Massive-MIMO) نظراً لارتفاع تكلفة التصنيع واستهلاك الطاقة لدورات سلاسل الراديو ، لذلك يجب استخدام عدد صغير من سلاسل الترددات الراديوية في أنظمة (Massive-MIMO).

يمكن تحقيق ذلك من خلال استخدام مفهوم المعالجة الهجينية (Molisch et al.,2017,2) حيث يتم الجمع بين الترميز الرقمي المسبق للنطاق الأساسي مع الترميز المسبق التماضي الذي يتم إجراؤه باستخدام مبدلات الطور المتغيرة الفعالة من حيث التكلفة. يمثل التحدي الذي يمثله النظام الهجين في كيفية ضبط الترميز المسبق والجمع بين الأوزان في حالات مختلفة من أجل تحسين الكفاءة الطيفية بأقل قدر من التداخل. إن الهدف الأساسي من هذا البحث هو تقريب أداء منظومة 5G-NR المستندة إلى mm-MMIMO لأداء التصميم الرقمي الكامل الأمثل والخوارزميات المقترحة حديثاً مع تقليل التعقيد والتكلفة والبحث عن عوامل تشكيل الحزمة التي تعطي أعظم قيمة لمعادلة الكفاءة الطيفية من دون أن تتطلب الطريقة المقترحة معرفة كاملة بالقناة أو تقنيات تحليل معقدة، مما يقلل من التعقيد وكمية معلومات التغذية الراجعة.

المقدمة (Introduction):

مع النمو المتتسارع لتدفقات البيانات في أنظمة الاتصالات الحديثة والطلب المتزايد باستمرار على زيادة سعة المستخدم ومعدلات نقل البيانات العالية والذي قد لا يكفي معه تطوير التقنيات المستخدمة حالياً ، كان لابد من التفكير في زيادة استغلال الطيف الترددي المتاح لأنظمة الاتصالات اللاسلكية والانتقال لاستخدام الأمواج المليمترية ذات الترددات العالية لنقل البيانات.

ركزت الأبحاث الحديثة على تطوير أنظمة اتصالات الجيل الخامس بحيث تستخدم الأمواج المليمترية الجديدة ذات الترددات العالية وهو ما أطلق عليه أنظمة الجيل الخامس العاملة على الراديو الجديد (5G-NR) وهي تقنية وصول راديوية حديثة (Radio Access Technology-RAT) تم تطويرها بواسطة هيئة معايير النطاق العريض للأجهزة المحمولة (3GPP) لتوفير خدمات الجيل الخامس (Dilli et al.,2022,2).

إن استخدام الترددات العالية في أنظمة (5G-NR) يؤدي إلى خسائر كبيرة خلال مسار الانتشار فتصل الأمواج المليمترية بمستطاعات صغيرة إلى طرف الاستقبال، إذ أنه عادة في مجال الأمواج التردديّة المليمترية ذات الترددات 3-30GHz، يصل فقد المسار حتى 20dB ، إضافة إلى كون استخدام نطاق تردد عريض يعني ضجيجاً أعلى ونسبة أقل لمعدل الإشارة إلى الضجيج (SNR)، كمثال على ذلك، إن زيادة النطاق التردد من 50 حتى 500 هرتز يؤدي إلى زيادة الضجيج بمقدار 10dB (Saasan,2022,288).

إن طول الموجة القصيرة للأمواج المليمترية يسمح باستخدام هوائيات مصفوفية كثيفة متعددة المداخل والمخارج (Massive-MIMO) مع إمكانية التحكم بالمخطط الإشعاعي لتلك الهوائيات وهو ما يمثل أحد أهم المفاتيح التقنية في أنظمة

المبني بشكل رقمي بالكامل وذلك باستخدام التحليل العددي في MATLAB-الإصدار 2020.

٢. واد البحـث وطـائـة (Materials and Methods)

2- تشکیل الحزم في نظام 5G-NR

إن أنظمة اتصالات الجيل الخامس يتوقع منها العمل على مجال عريض جداً من الترددات [450MHz, 100GHz]، علمًاً أنه معظم المعايير العالمية المنتشرة لتشغيل الجيل الخامس تعمل في الحزم التردديية الأقرب إلى 6GHz، لذلك كان لابد من إيجاد نماذج أكثر دقة لانتشار الأمواج في الترددات العالية (فوق 6GHz) (Dilli et al., 2022,2). تشير القياسات إلى أن طول الموجة الصغير يزيد من حساسية نموذج الانتشار لخصائص وسط وبيئة الانتشار لاسيما فقدان المسار. كما تعتمد أنماط فقد المختلفة على مادة وسط الانتشار وتزداد بزيادة التردد. إضافة لذلك تصبح بارامترات خفوت الظل والتشتت الزاوي كبيرة ومتغيرة بشكل كبير بين حالة وجود خط نظر أو عدمه LOS&NLOS ولا تعتمد فقط على ارتفاع الهوائيات بل أيضًا على بيئه الانتشار (Saasan, 2022,290).

وفقاً لمنظمة 3GPP تستخدم أنظمة الجيل الخامس مجموعة متنوعة من الترددات ضمن نطاقات تعرف باسم FR1 أقل من 7.125GHz (ومن ضمنها الحزمة التقليدية لتطبيقات الجيل الخامس FR2 sub-6 GHz و 24.25 GHz في المجال (

إن استخدام الترددات العالية في أنظمة 5G يعرض الإشارات المنتشرة إلى خسارات انتشار كبيرة إضافة إلى الخفوت الناتج عن العوامل الجوية. يتم الحد من تلك الخسارات باستخدام تقنيات mmMIMO التي تستخدم الأمواج الميليمترية ذات الأطوال الموجية القصيرة مما يسمح بتقليل حجم عنصر الهوائي وبالتالي تسمح بتبعدة عشرات أو مئات من الهوائيات التي يطلق عليها الهوائيات الكثيفة متعددة المداخل والمخارج Massive-MIMO. ولكن بالمقابل سيكون هناك كلفة إضافية واستهلاك أعلى في الاستطاعة بسبب استخدام السلاسل

١ . الدراسات المرجعية (LiteratureReview)

على مدى السنوات القليلة الماضية ، تم إجراء العديد من الدراسات لتحسين الترميز المسبق والجمع بين الأوزان من أجل تحسين أداء تشكيل الحزمة الهجينة. قام Sawapna (2022) وأخرون باستخدام طريقة تسمى المطابقة المتعامدة

استغلال خصائص التشتت لقنوات الأمواج الميليمترية لتصميم أجهزة ترميز RF والنطاق الأساسي وتم اقتراح تقنية المطابقة المتعامدة الموزونة المترامنة المعدلة لتقدير القناة في أنظمة MIMO وتطبيقاتها على كل من الوصلة الصاعدة لتكوين أجهزة الترميز المسبيقة وفي جهة الاستقبال لتكوين المجموعات. تم قياس أداء تقدير القناة من حيث متوسط الخطأ التربعي المعياري (NMSE) والكفاءة الطيفية ولكن على الرغم من التحسينات الجيدة للأداء إلا أن درجة تعقيد الخوارزمية المقترحة كان كبيراً نسبياً. أما في Chen (2015) فقد تم اقتراح خوارزمية تكرارية لتحديث أطوار مرمزات RF لقليل المجموع الموزون للباقي التربعي بين نظام الترميز المسبي الرقمي بالكامل والنظام الهجين. اقترح Zhang et al. (2018) تصميم مصفوفة الترميز المسبي للترددات الراديوية بشكل مباشر على أساس المتجهات الفردية الصحيحة لمصفوفة القناة . أما في دراسة Wang et al. (2020) ، يتم تقسيم مصفوفة الترميز المسبي للتردد اللاسلكي إلى جزأين، يحتوي الأول منهما على عدد من المتجهات يساوي عدد التتفقات ويعتمد على المتجهات الذاتية لمصفوفة تحل القيمة المفردة (SVD). يتم الحصول على المكون الثاني من خلال الاستفادة من المعلومات النسبية الموجودة بين المصفوفة المترامنة ومصفوفة الترميز الرقمي الأمثل . لاحقاً اقترح Wang (2022) وأخرون طريقة متالية من مرحلتين لتصميم المشفر التمثيلي والمجمع معاً، حيث يتم إنشاء القناة المكافئة المقابلة ثم يتم تطبيق تقنية SVD على مصفوفة القنوات المكافئة لتحقيق عمليات الترميز الرقمي والجمع بشكل مباشر. يستخدم هذا البحث المنهجية المستخدمة في دراسة Wang (2022) مع تبسيط لتعقيد العمليات الحسابية المستخدمة فيها ويقارن نتائج الأداء لمؤشر الكفاءة الطيفية مع الخوارزميات المقترحة حديثاً وأداء المرمز المسبي المثالي

بتطبيق خوارزمية SVD على مصفوفة النظام الأمثل F_{Opt} . ثم يقوم بعدها باشتلاق مصفوفة الترميز المسبق التمايزي F_{RF} وذلك بمبرر أن عدد السلاسل الراديوية المستخدم من الممكن أن يكون أكبر بكثير من عدد تدفقات البيانات في النظام لاسيما أن Wang اعتمد على نمط الاتصال الكامل الذي يتم فيه وصل جميع عناصر الهوائيات في المصفوفة بشكل كامل مع السلاسل الراديوية بالشكل الذي يحقق أعلى كفاءة طيفية ممكنة باعتباره حلاً أمثلياً لكن مع كلفة عالية جداً مما يجعل هناك حاجة لإدراج أشعة إضافية للحصول على مصفوفة الترميز F_{RF} . أما في هذا البحث يتم تقديم مبرر عملي أنه لا داعي لأي عمليات إضافية على مصفوفة النظام الأمثل F_{Opt} إذ لا تتحقق تلك العمليات الإضافية زيادة مهمة في أداء النظام لاسيما أن مصفوفة F_{Opt} ناتجة أساساً عن تطبيق خوارزمية SVD على مصفوفة القناة وهو ما يطلق عليه النظام شبه الوحدوي semi-unitary. في المقابل إن الأبحاث التي (Zhang et al., 2018) أجزها كل من

(Wang, 2020);(Chen, 2015) مجده بشكل أساسى لتحسين أداء المنظومة عندما يكون عدد السلاسل الراديوية مساوياً لعدد تدفقات البيانات للمستخدمين وتحتاج لعمليات كثيرة غير مبررة. هذا البحث يقدم اقتراحاً باستخدام مصفوفة النظام الأمثل F_{Opt} بشكل مباشر بدون أي عمليات تحليل إضافية، وحتى في حال كان عدد السلاسل الراديوية أكبر من عدد تدفقات البيانات، فإنه من الممكن استغلال تلك النقطة لتحسين أداء المنظومة دون تعقيد في العمليات وهي النقطة الأساسية التي يسعى هذا البحث لتقديمها.

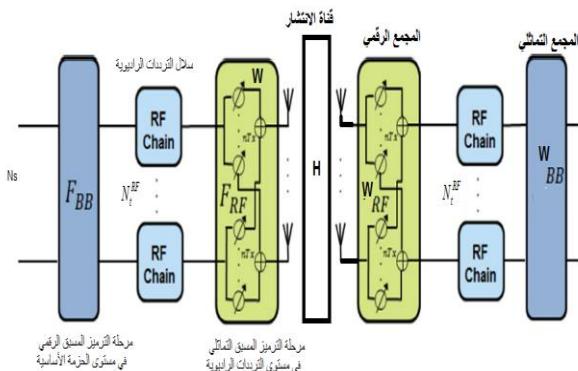
2- نموذج النظام المدروس:

يمثل الشكل (1) نموذج لنظام هوائيات متعددة يعمل على الامواج الميلمترية mm-MIMO بمستخدم وحيد، وفق المحددات التالية: عدد هوائيات الارسال للمرسل N_t ، عدد تدفقات البيانات للمرسل N_s ، عدد السلاسل الراديوية المستخدمة في طرف الارسال N_t^{RF} ، عدد الهوائيات في طرف الاستقبال N_r ، عدد السلاسل الراديوية المستخدمة في طرف الاستقبال N_r^{RF} ، وذلك على اعتبار أنه وبشكل دائم

الراديوية RF والتي تشغّل مساحة كبيرة في العتاد الصلب مما لن يسمح باستخدام سلسلة راديوية محددة لكل عنصر هوائي من عناصر M-mmMIMO وهو الذي يطلق عليه نظام تشكيل الحزمة الرقمي الكامل (Zilli, 2020,3). الحل الواعد للتغلب على تلك المشكلة هو تشكيل الحزمة الهجين BF، الذي يجمع بين الكافلة المنخفضة لتشكيل الحزمة التمايزي والأداء العالى لتشكيل الحزمة الرقمي بحيث يتطلب عدد سلاسل راديوية أقل بكثير من عدد عناصر الهوائيات في مصفوفة الهوائيات الكثيفة المستخدمة. يتألف الترميز المسبق الهجين من مرحلتين: الأولى هي الترميز المسبق الرقمي في مرحلة الحزمة الأساسية BB، أما المرحلة الثانية فهي مرحلة الترميز المسبق التمايزي في مستوى الترددات الراديوية RF. تساهم هذه التقنية في تحقيق مجموعة من الميزات متمثلة بتقليل كلفة العتاد الصلب وتنقليل استهلاك الاستطاعة وتأمين ربح عالى للإشارة المستقبلة لأنظمة Massive-MIMO (Wang, 2022,2). يسمح تشكيل الحزمة الرقمي في مستوى الحزمة الأساسية بتعديل كل من المطال والطور، بينما لا يسمح التعديل التمايزي في مستوى الإشارة الراديوية إلا بتعديل أطوار الإشارة أما المطالات فتبقى ثابتة، ونتيجة لتلك القيود المفروضة على مطالات المرمز المسبق التمايزي فإنه من الصعب جداً تحقيق عمليات الترميز المسبق الرقمي والتناظري بشكل مماثل لتلك الممكن تفيذهما في المرمز المسبق الرقمي بالكامل على الرغم من التعقيد المنخفض الذي تؤمنه التقنية الهجينه. لذلك من المستحسن تطوير استراتيجية جديدة تهدف إلى تحقيق كفاءة طيفية عالية كذلك التي يؤمنها النظام الرقمي بالكامل على أن تكون ذات تعقيد حسابي أقل وكلفة منخفضة. معنى أدق، يجب البحث عن معاملات تشكيل الحزمة التي تعطي أعظم قيمة لمعادلة الكفاءة الطيفية مع مراعاة تعقيد النظام. انطلاقاً من ذلك تعتبر الكفاءة الطيفية هي المؤشر المستخدم لتقدير أداء عمل تقنيات الترميز المسبق في 5G-NR mmMIOM.

وفقاً لنتائج Wang (2022) يتم استخدام خوارزميات ترميز مسبق هجين يعتمد على القناة المكافأة ولكن مع إضافة عمليات وتعقيد غير مبرر من وجهة نظر هذا البحث متمثل

الإشارة المستقبلة ρ وبذلك يمكن التعبير عن شعاع الرموز المستقبلة بالتعبير $\sqrt{\rho} s$.



الشكل (1) المخطط الصندوقي منظومة تشكيل الحزمة الهاجين المستخدم. $\alpha_{i,l}$: هو ربح المسار l^{th} في تجمع العنقود رقم i^{th} . \mathbf{a}_i : شعاع مصفوفة الاستجابة في طرف الارسال ويزاوية سمت $\phi_{i,l}^r$, \mathbf{a}_r : شعاع مصفوفة الاستجابة في جهة الاستقبال ويزاوية سمت $\phi_{i,l}^r$. على اعتبار أن المستقبل يقوم بتقدير القناة وإعادة ارسالها للمرسل، يجب أن تكون تلك المعلومات المتبادلة أقل ما يمكن، وهو ما يجب على عملية الترميز المسبق تحقيقه.

في طرف الاستقبال تحصل عمليات معاكسة لعملية الارسال فيتم استخدام مجمع combiner هجين، المصفوفة WBB تمثل المجمع في مستوى الحزمة أبعادها $N_s \times N_r^{RF}$ تمثل المجمع في مستوى الترددات الراديوية. عليه تصبح الإشارة الناتجة عن عملية التجميع في طرف الاستقبال وفق المعادلة :

$$(6) \hat{y} = \sqrt{\rho} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} s + W_{BB}^* W_{RF}^* n$$

بعد تحديد الإشارة الناتجة المستقبلة يمكن الوصول إلى معادلة الكفاءة الطيفية للمنظومة .

تخضع الكفاءة الطيفية للإرسال اللاسلكي من نقطة إلى نقطة لحد سعة شانون C الوارد في المعادلة (7) والتي تعرف الحد الأقصى لمعدل نقل البيانات الحالية من الأخطاء عبر عرض نطاق معين في حالة وجود ضجيج وتدخل:

عدد السلاسل الراديوية في كل طرف أقل من عدد الهوائيات $N_s \leq N_t^{RF} (N_r^{RF}) \square N_t (N_r)$. يتم استخدام تشكيل الحزمة الهاجين عبر ترميز الرموز في طرف الإرسال بمرحلة تشكيل حزمة: الأول عبر مصفوفة تشكيل الحزمة التشابهي في مستوى الحزمة الأساسية $F_{BB} (N_t^{RF} \times N_s)$ وبالتالي عبر مصفوفة الترميز المسبق في مستوى الترددات الراديوية $F_{RF} (N_t \times N_r^{RF})$.

وعلى اعتبار المنظومة المفترضة بمستخدم وحيد يحدد شعاع الارسال S بحجم $1 \times N_s$ وذلك باعتبار أن عناصر S مستقلة ولكل منها سوية استطاعة تساوي $\frac{1}{N_s}$ ومتوسط استطاعة إذا يعبر S عن شعاع رموز الارسال قبل مرحلة الترميز المسبق، يخضع S لعمليات الترميز المسبق الهاجين (F_{RF}, F_{BB}) يمكن التعبير عن شعاع الرموز المرسلة المعد ترميزه وفق عنه بالعلاقة (1):

$$x = F_{RF} F_{BB} S \dots \dots (1)$$

وبأخذ متوسط استطاعة الارسال، يمكن التعبير عن العلاقة (1) وفق (2):

$$x = \sqrt{\rho} F_{RF} F_{BB} S \dots \dots (2)$$

تنقل تلك الرموز عبر قناة راديوية ميليمترية H . للحصول على شعاع الرموز المستقبلة y وفق المعادلة (3):

$$y = Hx + n \quad (3)$$

بتعويض المعادلة (2) في المعادلة (3) تعطى معادلة شعاع الرموز المستقبلة بدلالة مصفوفات الترميز المسبق ومصفوفة القناة على الشكل التالي:

$$y = \sqrt{\rho} H F_{RF} F_{BB} s + n \quad (4)$$

حيث يمثل n (مصفوفة أبعادها $N_r \times 1$) شعاع الضجيج، وهو ضجيج بمتوسط صفرى ومصفوفة تغير $\sigma^2 I_{N_r}$.

أي يعبر عن الضجيج $(0, \sigma^2 I_{N_r})$

على اعتبار أن القناة مؤلفة من مجموعات تشتت مساوية N_{cs} وكل منها مسارات انتشار N_{ray} وعليه تصبح معادلة قناة الانتشار :

$$(5) H = \sqrt{\frac{N_t N_r}{N_{cl} N_{ray}}} \sum_{i=1}^{N_{cl}} \sum_{l=1}^{N_{ray}} \alpha_{i,l} \mathbf{a}_r (\phi_{i,l}^r) \mathbf{a}_i (\phi_{i,l}^r)^*$$

الحل المقترن يتضمن إيجاد طريقة لتحسين مصفوفة الترميز المسبق عن طريق استخدام معلومات الطور الموجودة في مصفوفة النظام الأمثل الرقمي بالكامل F_{OPT} كمرجع لمصفوفة الترميز المسبق التماثلي على اعتبار أن المصفوفة $(N_t \times N_s)$ تمثل مصفوفة الترميز المسبق المتماثلة التي تحقق أفضل كفاءة طيفية ممكنة وتحسب بحيث يكون عدد تدفقات البيانات مساوياً لعدد السلاسل الراديوية. وتحسب باستخدام خوارزمية تحليل القيمة المفردة (SVD) والتي يمكن شرحها بشكل مبسط بأنه عند ضرب مجموعة من المتجهات المتعامدة المدخلة V بمصفوفة نظام الاتصال F تنتج مجموعة من المتجهات المتعامدة U ثم يتم تمديدها بعد ذلك بعوامل قياس مختلقة مجتمعة في مصفوفة قطرية A ويعبر عنها بشكل عام في المعادلة (5).

$$F.V = U.A \quad (12)$$

تصبح المعادلة وفق هذا البحث على الشكل التالي:

$$\begin{aligned} F_{Opt}.V_s &= U_t.A \\ F_{Opt} &= U_t.A.V_s^* \end{aligned} \quad (13)$$

حيث U_t : مصفوفة مربعة واحدية بحجم V_s . $N_t \times N_t$. $N_t \times N_s$ مصفوفة واحدية بحجم $N_s \times N_s$. A هي مصفوفة قطرية بحجم $N_s \times N_s$. ثم يتم استخدام مصفوفة F_{Opt} الناتجة كمصفوفة مرجعية لحساب F_{RF} . ومن ثم يتم استخدام طريقة المربعات الصغرى للوصول إلى المصفوفة F_{BB} وفق المعادلة (14).

$$F_{BB} = \left(F_{RF}^* F_{RF} \right)^{-1} F_{RF}^* F_{opt} \quad (14)$$

إن فكرة استخدام الأطوار في مصفوفة النظام الأمثل F_{Opt} كأساس لتقدير المرمز المسبق التماثلي طرحت سابقاً في عند Wang (2022) مع وجود اختلاف أساسي في الطريقة المقترنة في هذا البحث، إذ أنه في الطريقة التي أوردها Wang (2022) والتي تم تسميتها HP-SVD وبعد الوصول إلى مصفوفة F_{Opt} الناتجة عن المعادلة (13) يتم تطبيق تحليل القيمة المفردة على F_{opt} ثم المتابعة بحساب المرمز المسبق التماثلي والرقمي وهو من وجهة نظر هذا البحث غير ضروري ولا يحقق إفادة عالية فيما يتعلق بالكفاءة الطيفية نسباً إلى التعقيد الإضافي والكلفة العالية التي يضيفها. كما أنه في الخوارزمية المقترنة تحتاج فقط إلى عدد متجهات مساوياً إلى عدد التدفقات بينما عند Wang (2022) يتم استخدام عدد

$$C = BW \cdot \log_2(1 + P_r / (P_t + P_n)) \quad (7)$$

P_r : الاستطاعة المستقبلة.

P_t : استطاعة التداخل.

P_n : استطاعة الضجيج.

BW : عرض حزمة القناة.

ترتبط سعة القناة C بالكفاءة الطيفية R بالعلاقة الأساسية التالية:

$$R = C/BW \quad (8)$$

حيث تعرف الكفاءة الطيفية على أنها مقدار المعلومات التي يمكن إرسالها لكل وحدة من عرض النطاق الترددي وواحدتها bits/sec/Hz . بتعويض العلاقة (7) بالعلاقة (8) تعطى معادلة الكفاءة الطيفية بالعلاقة التالية:

$$R = \log_2(1 + SINR) \quad (9)$$

حيث SINR هي نسبة الإشارة إلى الضجيج والتداخل. على اعتبار أن المحطة القاعدية تمتلك معلومات حالة القناة CSI بينما لا تتوفر معلومات حالة القناة للمستخدم، وعلى اعتبار استطاعة الارسال الكلية P يتم توزيعها بشكل موحد عبر تدفقات البيانات N_s في المستخدم وعلى اعتبار أن عدد السلاسل الراديوية أقل من عدد هوائيات المستقبل $N_s < N_r$ ، تعطى الكفاءة الطيفية لقناة MIMO وفق واحدة (Gervais et al, 2016,4) (bit/Sec/Hz) :

$$R = \log_2(I_{Ns} + (P/Ns)H^H H) \quad (10)$$

حيث P هي متوسط استطاعة الإشارة إلى الضجيج والتداخل SINR. بتعويض المعادلة (6) في المعادلة(10) نصل إلى معادلة الكفاءة الطيفية لمنظومة هوائيات متعددة كثيفة تعمل وفق محددات الجيل الخامس والأمواج المليتمترية وواحدتها bits/sec/Hz

$$(11) R = \log_2 \left(I_{Ns} + \frac{\rho}{N_s} R_n^{-1} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} \right. \\ \left. \times F_{BB}^* F_{RF}^* H^* W_{RF} W_{BB} \right)$$

حيث I_{Ns} هي مصفوفة التعريف (identity matrix) ذات البعد N_s .

Wang,2020,12) (Ayach et el, 2014,8),

. (Wang et el,2022,6)

2-3 خوارزمية الترميز المسبق المقترنة

مؤشر الكفاءة الطيفية الموافق لنسبة الإشارة إلى الضجيج مساوٍ لعدد السلاسل الراديوية. وعلى اعتبار أنه من الممكن أن

للخوارزمية المقترحة مع كل من خوارزمية الترميز المسبق (2020) Wang et al. والخوارزمية التقليدية المستخدمة لدى (2022) Wang et al. [HB-SVD] لدى (2022) Wang et al. وفق المحددات التالية

السيناريو الأول:

$$(N_t = 64, N_r = 16, N_t^{RF} = N_r^{RF} = 4)$$

السيناريو الثاني:

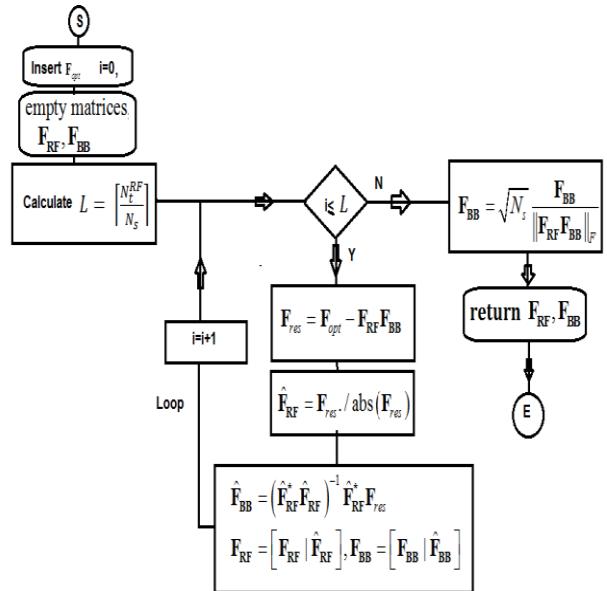
$$(N_t = 256, N_r = 64, N_t^{RF} = N_r^{RF} = 8)$$

وذلك عند قيم مختلفة لتدفقات البيانات N_s . أما محددات القناة المستخدمة وهي نموذج قناة صالح-فزويلا (Saleh-Valenzuela) عدد المجمعات العنقودية=6 وعدد المسارات مساوٍ إلى 8. أما زاوية انتشار السمت مساوية 30 درجة وزاوية انتشار الارتفاع مساوية 60 درجة. عدد عمليات تحقيق القناة لكل نقطة محاكاة مساوٍ إلى 100 عملية.

تبين الأشكال (3) و (4) تغير الكفاءة الطيفية للخوارزمية المقترحة في هذا البحث والخوارزميات المشار إليها في كل من (Zhang et al.,2018); (Wang et al.,2020);(Wang et al.,2020, 2020) وذلك عند تغير عدد تدفقات البيانات. وفقاً للشكل (3)، الذي يبين الكفاءة الطيفية عند عدد تدفقات N_s [1,2,4].

تزداد الكفاءة الطيفية بازدياد عدد تدفقات البيانات N_s حيث أنه وفق السيناريو الأول وعند نقطة مرجعية SNR مساوية (-10dB) تكون قيم الكفاءة الطيفية مساوية إلى 10dB [6,10,12]bits/Sec/Hz، أما وفق السيناريو الثاني، و عند النقطة المرجعية نفسها المعتمدة في السيناريو الأول أي عند قيمة SNR مساوية (-10dB) فقد تم تسجيل القيم التالية للفعالية الطيفية [10,25,30] bits/S/Hz مما يؤكد أنها زادت بشكل كبير من 6 إلى 10 ومن 10 إلى 25 ومن 12 إلى 30 أي بمتوسط زيادة يقارب 1.3%.

يكون عدد السلاسل الراديوية في النظام أكبر من عدد التدفقات المرسلة N_s ، وبالتالي من الممكن أن يكون هناك فرق في عدد الأعمدة بين المصفوفتين مساوٍ إلى $N_t^{RF} - N_s$. سيتم استخدام عدد الأعمدة المتبقية بطريقة تكرارية لتحسين الكفاءة الطيفية من خلال تقليل الخطأ المتبقى بين المصفوفة الأمثلية والمصفوفة الناتجة عن جداء FBB و FRF الناتجة عن الخوارزمية. لذلك عند التنفيذ يتم تقسيم المصفوفات F_{RF} و F_{BB} إلى L جزء حيث كل جزء من F_{RF} يتضمن N_s عمود، وكل جزء من F_{BB} يتضمن N_s سطر . يمثل الشكل (2) الخوارزمية المقترحة، حيث في البداية تكون $F_{res} = F_{opt}$ ثم في التكرارات المتتالية تمثل الفرق بين F_{opt} و F_{res} الناتجة، وهكذا تستمر التكرارات وعند كل تكرار للأجزاء المتتالية يتم تقليل الخطأ المتبقى. وباستخدام الخوارزمية المقترحة ذاتها يمكن الحصول على مصفوفات المجمعات في طرف الاستقبال.

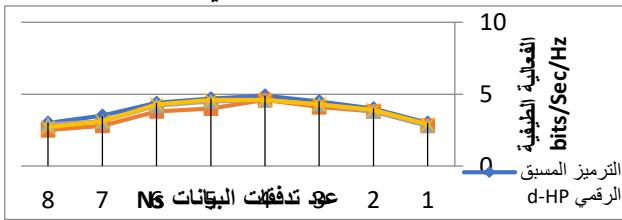


الشكل(2) تدفق عمليات مخطط الترميز المسبق المقترن.

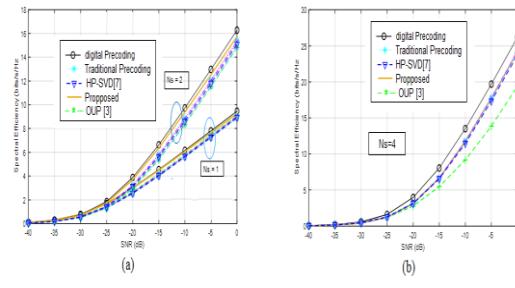
3. النتائج والمناقشة (Results and Discussion):

من أجل تقييم أداء خوارزمية الترميز المسبق المقترنة في تحسين الكفاءة الطيفية لنظام 5G-NR، تم تحليل ومقارنة

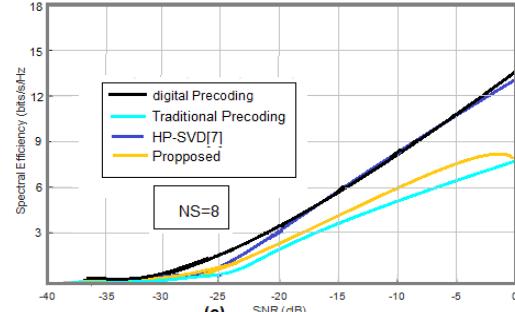
من عدد السلاسل الراديوية. تتفوق الخوارزمية المقترحة في الأداء على تقنية الترميز المسبق الهجين التقليدية أياً كانت عدد تدفقات البيانات. ويقترب أدائها بشكل كبير من خوارزمية-HP SVD طالما أن عدد تدفقات البيانات ليس أكبر بكثير من عدد السلاسل الراديوية ولكن عندما يقترب عدد تدفقات البيانات من ضعف عدد السلاسل الراديوية تسجل خوارزمية HP-SVD أداءً أفضل من الخوارزمية المقترحة ولو كان هذا التفوق بسيطاً بمقابل فرق التعقيد وكلفة العمليات الحسابي



الشكل(5) قيم الفعالية الطيفية لسيناريو الأول مع تغيرات عدد تدفقات البيانات.



الشكل(3) قيم الفعالية الطيفية لسيناريو الأول مقابل قيم SNR: (a) $N_s=1 \& 2$, (b) $N_s=4$



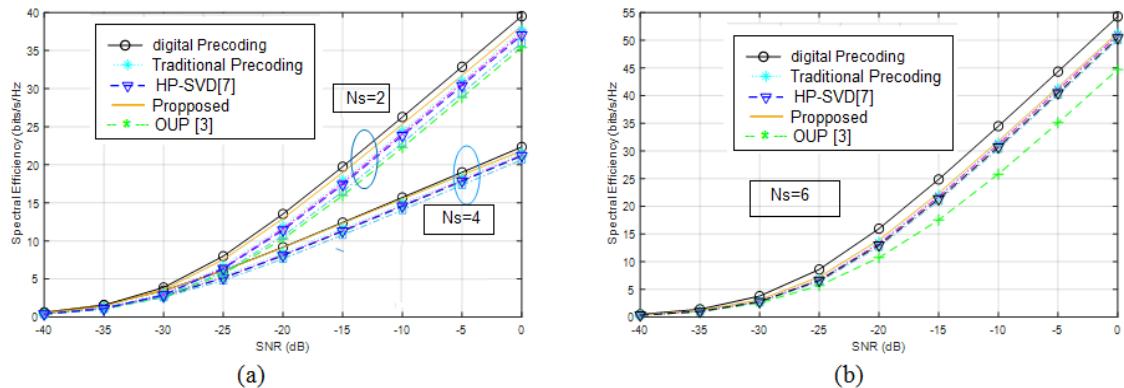
الشكل(4) قيم الفعالية الطيفية لسيناريو الأول مقابل قيم SNR عند $N_s=8$

الفكرة الأهم التي تبينها مخططات التحليل العددي هي عدم وجود فارق ممیز بين أداء الخوارزمية المقترحة في هذا البحث وخوارزمية HP-SVD المبنية عند Wang (2022) رغم الفارق الكبير في التعقيد وعدد العمليات المكررة بينهما. يبين الجدول(1) النتائج التي تم الحصول عليها عند تطبيق السيناريو الأول لعدد تدفقات بيانات N_s متغير لكل من الخوارزميات المدروسة. وفق النتائج المسجلة، تزداد الفعالية الطيفية لجميع الخوارزميات المدروسة بازدياد تدفقات البيانات طالما أن عدد التدفقات أقل أو مساوٍ لعدد السلاسل الراديوية، ثم تبدأ الفعالية الطيفية بالانخفاض عندما يصبح عدد تدفقات البيانات أكبر

الجدول(1) قيم نتائج المحاكاة لسيناريو الأول عند قيم متغيرة لسلالس البيانات وقيمة $SNR=-20dB$

السيناريو الأول										محددات المحاكاة
عدد السلاسل الراديوية= 16 = Nr & 64 = Nt										
SNR=-20dB & 4										قيم الكفاءة الطيفية bits/Sec/Hz
8	7	6	5	4	3	2	1	Ns	الخوارزمية المقترحة	
3	3.5	4.4	4.7	4.9	5	4	3	d-HP	الترميز المسبق الرقمي	
2.5	2.8	3.8	4	4.6	4	3.8	2.8	t-HP	الترميز الهجين التقليدي	
2.9	3.1	4.2	4.5	4.6	4	3.8	2.8	HP-SVD[7](Wang,2022)	HP-SVD[7](Wang,2022)	
2.7	3.1	4.3	4.6	4.6	4	3.9	2.9			

في السيناريو الثاني تم زيادة عدد عناصر الهوائيات المصفوفية الكفاءة الطيفية عند تغيرات في عدد تدفقات البيانات لتصل حتى 16 تدفق أي ضعف عدد السلاسل الراديوية $N_t = 256$ & $N_r = 64$ ، وعدد السلاسل الراديوية لتصبح 8، لذلك كان لابد من دراسة تغيرات مؤشر فعالية

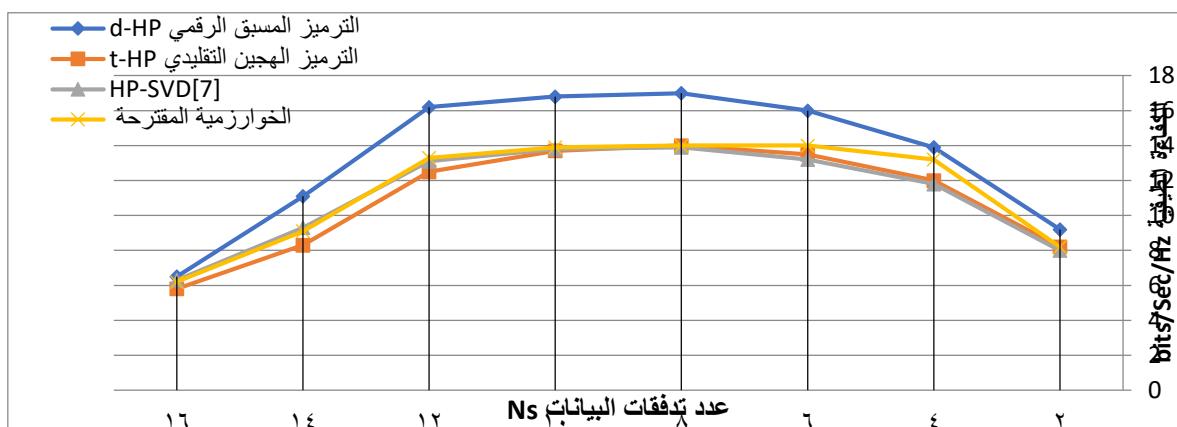


الشكل(6) قيم الفعالية الطيفية للسيناريو الثاني مقابل قيم SNR :Ns=2&4, (b)Ns=6

وفقاً نتائج المحاكاة المبينة في الجدول (2)، مع زيادة عدد عناصر الهوائيات في المصفوفة تزداد الفعالية الطيفية بشكل عام لجميع خوارزميات الترميز المستخدمة مع تفوق دائم للنموذج الرقمي الأمثل أيًّا كان عدد تدفقات البيانات. كما يلاحظ من الشكل (6) والشكل (7) أنه يزداد الفرق بين أداء الخوارزمية المقترحة وأداء النظام الأمثل ولكنها تحافظ على أداء متقارب مع الخوارزمية الحالية الأخرى.

الجدول(2) تأثير عدد تدفقات البيانات على أداء الخوارزمية المقترحة والخوارزميات المدرستة.

السيناريو الثاني										محددات المحاكاة	
عدد السلاسل الراديوية = 8											
Ns											
16	14	12	10	8	6	4	2		d-HP	قيم الكفاءة الطيفية bits/Sec/Hz	
16.5	11.1	16.2	16.8	17	16	13.9	9.2		t-HP		
5.8	8.3	12.5	13.7	14	13.5	12	8.2		HP-SVD[7](Wang,2022)		
6.3	9.3	13.1	13.8	13.9	13.2	11.8	8		الخوارزمية المقترحة		
6.2	9.1	13.3	13.9	14	14	13.2	8.2				



الشكل(7) قيم الفعالية الطيفية للسيناريو الاول مع تغيرات عدد تدفقات البيانات.

4. الاستنتاجات (Discussion):

-3 عند قيمة $SNR = -20dB$ تبدأ الفجوة بين قيم الكفاءة

الطيفية للنظام الأمثل والمخطط المقترن في هذا البحث وكذلك مع المخططات المقترنة في الدراسات المرجعية.

-4 يقل أداء المخطط المقترن بازدياد عدد تدفقات البيانات بقيم أكبر بشكل واضح من عدد السلاسل الراديوية المستخدمة في النظام.

-5 المخطط المقترن في هذا البحث يدرس أداء المنظومة بمستخدم وحيد مع تدفقات بيانات متعددة، لذلك يطمح في العمل المستقبلي لدراسة أداء المنظومة متعددة المستخدمين.

1- قدم هذا البحث مخطط ترميز مسبق هجين بسيط التعقيد ذو أداء مقبول قابل لتطبيق في أنظمة اتصالات 5G-NR المعتمدة على الهوائيات الكثيفة والأمواج الملمتية عالية التردد. مستنداً على فكرة استنتاج أطوار مرحلة الترميز المسبق التماثلي استناداً إلى مصفوفة النظام الأمثل دون الحاجة إلى عمليات تكرارية معقدة،

2- للمخطط المقترن أداءً مقبولاًً مقارنة مع أداء النظام الأمثل ومع أداء الخوارزميات المقترنة في الدراسات المرجعية الحديثة وبآلية أكثر تبسيطًا وأقل كلفة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم

التمويل(501100020595).

References:

- [1] R. Dilli, A. Helmy, and A. Nayak. (2022), Hybrid Beamforming in 5G NR Networks Using Multi User Massive MIMO at FR2 Frequency Bands, *Journal of Wireless Personal Communications*, <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09952-z>.
- [2] Saasan,(A).(2022). 5G NR-Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards. Academic Press is an imprint of Elsevier,1028.
- [3] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi and R. W. Heath.(2014), Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, 1499-1513,
- [4] A. F. Molisch et al.,(2017), Hybrid beamforming for massive MIMO: A survey, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 134–141.
- [5] L. Dai, X. Gao, J. Quan, S. Han and C. -L. I,(2015) ,Near-optimal hybrid analog and digital precoding for downlink mmWave massive MIMO systems, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, 2015,1334-1339.
- [6] M.Zilli,W.P.Zhu,(2020), Constrained-SVD based Hybrid BeamformingDesign for Millimeter-Wave Communications,2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference ,7281-9484
- [7] S. Wang, M. He, J. Wang, R. Ran, H. Ji and V. C. M. Leung,(2022), A Family of Hybrid Precoding Schemes for Millimeter-Wave Massive MIMO Systems, *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 3, 4881-4891.
- [8] S. Wang, L. Li, R. Ruby, and P. Li, (2020), A general hybrid precoding scheme for millimeter wave massive MIMO systems, *Wireless Netw.*, vol. 26, 1331–1345.
- [9] D. Zhang, P. Pan, R. You and H. Wang, (2018),SVD-Based Low-Complexity Hybrid Precoding for Millimeter-Wave MIMO Systems, *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 10, 2176-2179.
- [10] C.-En Chen, (2015),An iterative hybrid transceiver design algorithm for millimeter wave MIMO systems, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 4, no. 3,285–288.
- [11] N. Gervais, X. Minghua,(2016), Spectral-Efficiency Analysis of Massive MIMO Systems in Centralized and Distributed Schemes, *IEEE Transactions on Communications*. Volume: 64, Issue: 5,no. 15988982,P: 1930 – 1941.