

دراسة تحليلية للكفاءة الطيفية لهوائي جيل خامس كثيف باستخدام تقنيات تصميم الهوائيات وتعديل UFMC

د.م فادي غصنه*

م.م. حلا حرفوش**

(تاريخ الإيداع 2022/ 5/30 . قُبِلَ للنشر في 2022/8/24)

□ ملخص □

يعد استخدام الهوائي الكثيف ضمن تقنية الجيل الخامس خياراً عملياً في أنظمة الأمواج الملي مترية mm Waves بسبب طول الموجة الصغير جداً لهذه الأمواج مما يساعد في تصميم هوائي كثيف بأبعاد صغيرة، يمكن القول أيضاً أن الهوائي الكثيف ضروري أيضاً لعمل الأمواج الملي مترية، هذه الأمواج تتعرض للضجيج ولخسارة المسار Path loss بشكل أكبر وبالتالي تحتاج إلى هوائيات ذات اتجاهية عالية، بالإضافة إلى ذلك فإنه عند العمل في أنظمة الاتصالات الخلوية فنحن بحاجة إلى هوائيات قابلة للتوجيه، لذلك فإنه بالنسبة إلى الأمواج الملي مترية فإن الهوائيات الكثيفة تعد خياراً جيداً، ولسوء الحظ لا يمكن ربط كل عنصر هوائي بسلسلة راديوية Radio Chain منفصلة بسبب محدودية المجال الفيزيائي لأبعاد الهوائي، وكذلك لا يعد استخدام سلسلة راديوية واحدة تجمع كل عناصر الهوائي خياراً مفيداً لأن ذلك سيخفض بشكل كبير من ربح الهوائي، وهنا برز دور الهيكلية الهجينة Hybrid Beamforming التي توازن ما بين التكلفة والفاعلية، ويمكن ربط مصفوفة الهوائيات عندئذ مع السلاسل الراديوية إما بشكل خطي أو بشكل غير خطي وهذا ما سيركز عليه بحثنا هنا، حيث قمنا في هذا البحث باستخدام نمطين لتوزيع عناصر مصفوفة الهوائي المرسل في القسم التماثلي من الهيكلية الهجينة، وبتطبيق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل في الجزء الرقمي من الهيكلية.

الكلمات المفتاحية: الهوائي الكثيف، التعديلات متعددة الحوامل، التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل، الهيكلية الهجينة

*أستاذ مساعد في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس.

**طالب ماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس.

Analytical study of spectral efficiency of a Massive MIMO 5G Antenna using Antenna design techniques and UFMC Modulation

Dr.eng. Fadi Ghosna*
Eng. Hala Harfoush**

(Received 30/5/ 2022 . Accepted 24 /8/ 2022)

□ ABSTRACT

The use of a Massive MIMO antenna within the fifth generation technology is a practical option in mm Waves systems because of the very small wavelength of these waves, which helps in designing a dense antenna with small dimensions. Path loss is larger and therefore you need antennas with high directivity, in addition, when working in cellular communication systems, we need steerable antennas, so for millimeter waves, Massive MIMO antennas are a good option. However, not every antenna element can be connected to a single unique Radio Chain due to the physical field limitation of antenna dimensions, Also, the use of a single radio chain that combines all the antenna elements is not a useful option because this will significantly reduce the antenna gain, and here comes the role of the hybrid Beamforming, which tries to make balance between cost and efficiency, and the antenna array can then be linked with the radio chains either linearly or non-linearly. Linear Arrays are what our research will focus on here, in our research here, we have used two types of antenna elements array deploying modes in analog side of the Hybrid structure, while we have used UFMC modulation in the Digital side of the same Structure above.

Key words: Massive MIMO Antennas, Multi Carrier Modulation, Universal Frequency Multicarrier Modulation, Hybrid Beamforming.

* Assistant Professor in Department of Communications Technology Engineering, Faculty of Information & Communication Technology Engineering, Tartous University.

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

1- مقدمة:

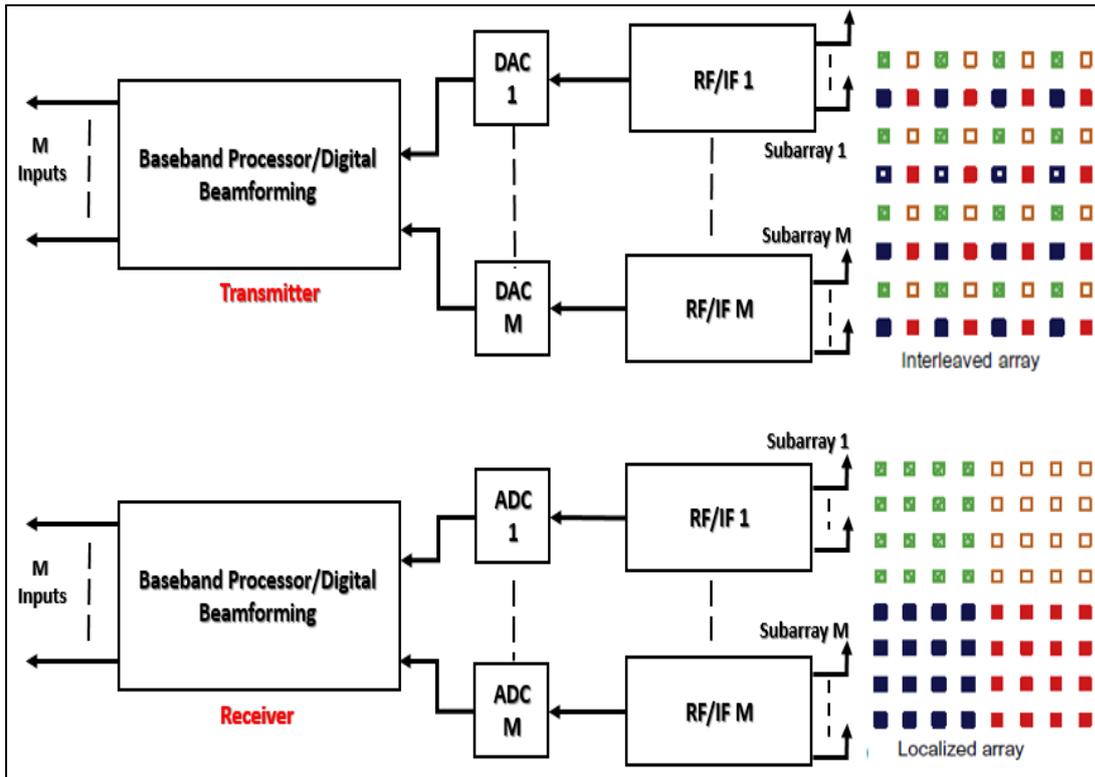
تتميز الهوائيات الكثيفة ذات التصميم الرقمي بالكامل fully digital Massive MIMO بأداء مثالي حيث يتصل فيها كل عنصر هوائي بسلسلة راديوية (RF) مستقلة [1]، ولكن يعتبر هذا التصميم غير واقعي من حيث التكلفة العالية لتصميمه للأغراض التجارية، وعلى الرغم من أنه يعطي سعة كاملة ومرونة عالية، فمثلاً، للحصول على ربح هوائي بمقدار 30dB نحتاج إلى 1000 عنصر هوائي ولتصميم مثل هذا الهوائي ستكون التكلفة عالية جداً والأبعاد الفيزيائية للهوائي ستكون غير مناسبة [2,3]، حيث أن المنطقة الأمامية من مصفوفة الهوائيات لا يجب أن تتجاوز مساحة بضعة ميلي مترات مربعة، وبممكننا أن نتخيل حجم الصعوبة في توصيل سلسلة راديوية مفردة على كل عنصر من عناصر الهوائي ضمن هذه المساحة الضيقة، أما المصفوفة الهجينة والتي تتكون من مجموعة من المصفوفات التماثلية الفرعية Analog Subarrays، والتي تتصل كل منها إلى سلسلة راديوية Digital RF رقمية على حدى [4]، فهي تعد خياراً عملياً أكثر، وفي هذا النوع من المصفوفات يتم توزيع عناصر الهوائيات ضمن مجموعات من المصفوفات الفرعية التماثلية وهذا ما يخفف من التكلفة و تعقيد البنية، إلى جانب استخدام التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC في الجانب الرقمي من هيكليّة الهوائي الكثيف [5]، الذي يزيد بشكل كبير من فعالية الطيف الترددي.

2- هدف البحث:

هدف البحث هنا هو تصميم هوائي إرسال اتصالات جيل خامس كثيف Massive MIMO خلوي يعتمد هيكليّة هجينة وإجراء دراسة تحليلية للكفاءة الطيفية ومن ثم تطبيق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC، واستخدام خوارزمية خطية وأخرى غير خطية في توزيع عناصر المصفوفات الفرعية وإجراء مقارنة فيما بينهما من خلال فعالية الطيف الترددي.

3- طرائق البحث ومواده:**3-1- الدراسات المرجعية:****3-1-1- هيكليّة الهوائي الكثيف الهجينة Massive Hybrid Architecture:**

تم تقسيم المصفوفة ككل إلى مجموعة مصفوفات جزئية، وكل مصفوفة جزئية تتكون من عدد N من عناصر الهوائيات بالإضافة إلى وحدة تتكون من السلسلة الراديوية RF ومكونات التردد المتوسط IF، ويمكن ربط هذه المكونات مع عناصر الهوائيات بطرق مختلفة، وكل مصفوفة فرعية تتصل إلى معالج حزمة أساسية عبر محول رقمي تشابهي DAC أو محول تشابهي رقمي ADC [6,7]، نفترض أنه لدينا مصفوفة مكونة من M مصفوفة فرعية و N عنصر هوائي ضمن كل مصفوفة من المصفوفات الفرعية أي لدينا مصفوفة (NXM) هجينة، وبالتالي فإن N أكبر من M وبالتالي يمكننا تحقيق ربح هوائي أكبر بتكلفة أقل [8]، ويوجد في الهيكليّة الهجينة معالجة تماثلية ورقمية يربط بين العمليتين محول رقمي تشابهي (جهة المرسل) أو محول تشابهي رقمي (جهة المستقبل)

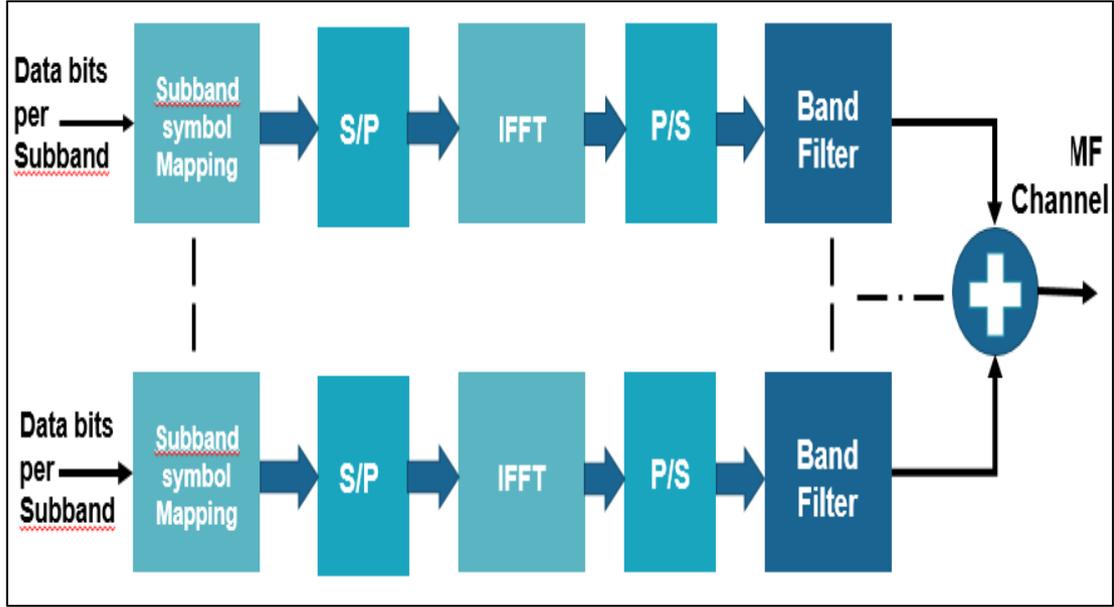


الشكل (1) مخطط صندوقي يبين البنية الأساسية لنظام هوائي مصفوفي هجين

كما نلاحظ من الشكل (1) الذي يوضح مصفوفة مربعة 16×4 فإنه يمكن ترتيب عناصر الهوائيات ضمن المصفوفة وفق نمطين مختلفين هما النمط Interleaved Array والنمط Localized Array [9,10]، ففي النمط Interleaved تتوزع عناصر الهوائيات ضمن كل مصفوفة فرعية بشكل غير منظم عبر كامل المصفوفة، بينما في المصفوفة من النمط Localized فإن عناصر المصفوفات الفرعية تتوزع بشكل منظم بمعنى أنه ترتبط عناصر كل مصفوفة فرعية إلى سلسلة راديوية مستقلة.

3-1-2-التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC:

يتم استخدام التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC، كما هو مبين في الشكل (2)، بدلاً من أن يتم ترشيح كل حامل فردي بمفرده كما هو الحال في نظام FBMC يتم ترشيح كل مجموعة حوامل فرعية مع بعضها البعض [11]، ويطبَّق على كل مجموعة من الحوامل الفرعية تحويل فورييه العكسي [11,12]، وبالتالي نحصل على بنية أقل تعقيداً، وبتكلفة أقل لكونه يستخدم عدداً أقل من مرشحات تمرير حزمة مقارنة معها في التعديل بالمرشحات الحزمية و يتم جمع الخرج الناتج عن عملية الترشيح للحصول على إشارة UFMC الأساسية التي ستكون جاهزة لإرسالها عبر سلسلة راديوية إلى عناصر الهوائيات ضمن المصفوفة.

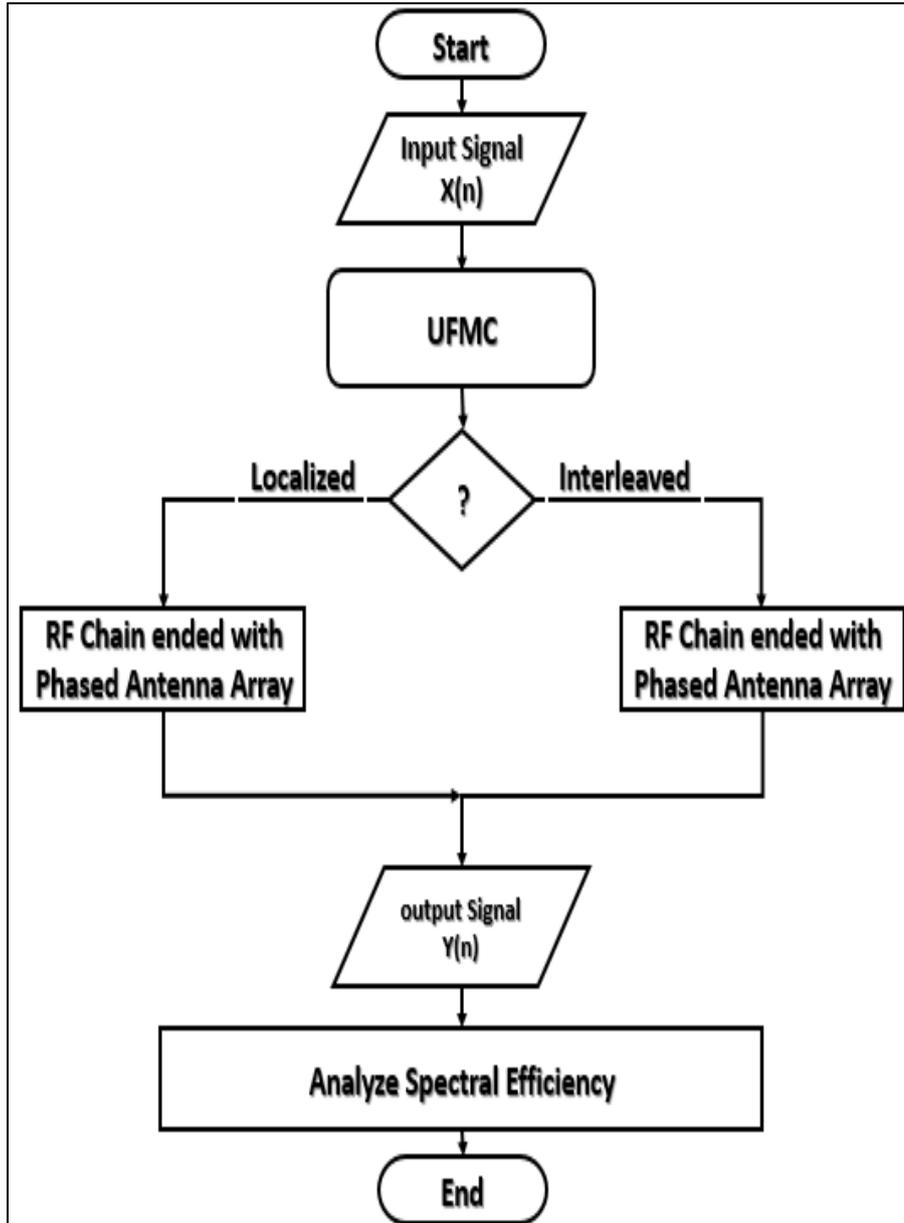


الشكل (2) مخطط صندوقي للتعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC

يتميز مثل هذا النوع من التعديل بتخفيف عدد حزم الحماية بين المجالات الفرعية، وبالنتيجة فهذا النوع من التعديل يتفوق على التعديل OFDM بكفاءة طيف ترددي أعلى وبتأخير زمني أقل، ويتفوق على تعديل FBMC في بساطة بنيته وقابلية تطبيقه بشكل عملي وانخفاض تكلفة تطبيقه [13].

3-2- خوارزمية العمل المقترحة:

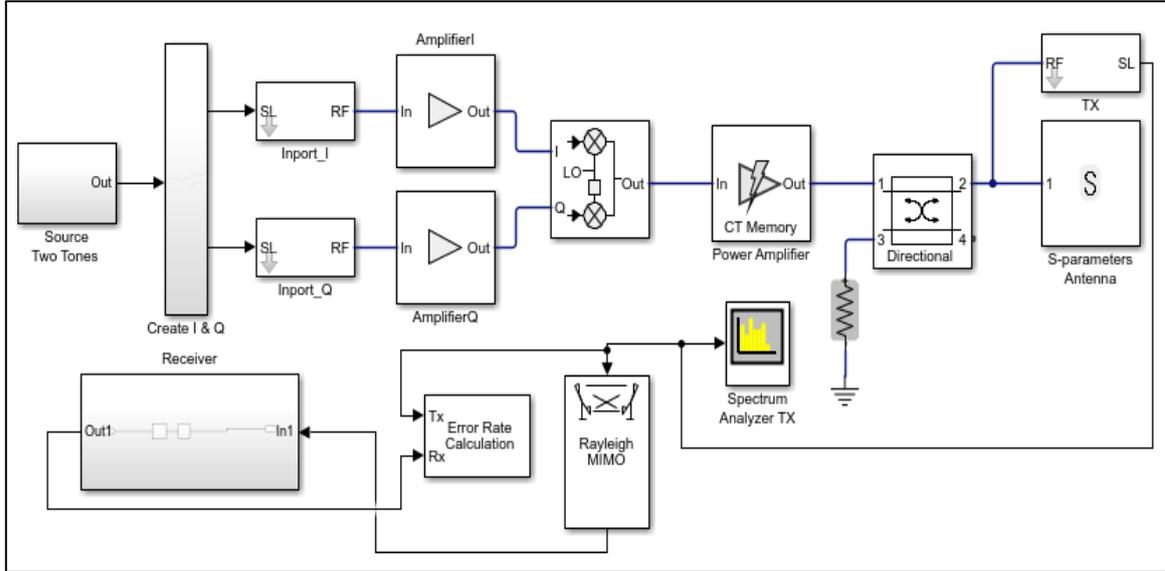
اعتمدت خوارزمية العمل على اختيار أفضل بنية هجينة ممكنة تحقق أفضل النتائج عند استخدام التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC [14]، وتمّ ذلك في الجزء التماثلي من الهيكلية الهجينة، ويمكن لبنية الهوائي أن تؤثر بشكل فعال على ربح الهوائي وبالتالي على الكفاءة الطيفية للإشارة المرسلّة، استخدمنا لهذا الغرض نمطين من أنماط توزع عناصر الهوائيات ضمن المصفوفة الكلية والمصفوفات الفرعية، هما النمطان المذكوران سابقاً النمط الموزع Interleaved والمحلي Localized، وهذان النمطان يعتمدان على مبدأ اتصال عناصر الهوائيات بالسلاسل الراديوية الموجودة وعلى تموضع هذه العناصر ضمن المصفوفات الفرعية بالنظر إلى ارتباطها بتلك السلاسل [15]، قمنا في البداية بتطبيق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC في الجزء الرقمي من الهيكلية الهجينة، أما في يخص الجزء التماثلي والهوائي المصفوفي فقد تم تطبيق النمط Localized بوجود التعديل UFMC ثم تطبيق النمط Interleaved بوجود التعديل نفسه، وفي النهاية قمنا باختبار أداء كلا النمطين بوجود التعديل UFMC، ثم قمنا بمقارنة النتائج بين النمطين للحصول على أفضل بنية تقدّم أفضل النتائج بوجود التعديل UFMC.



الشكل (3) خوارزمية العمل المقترحة.

3-3- نموذج المحاكاة:

تكوّن النظام المقترح من نظام مرسل ونظام مستقبل وقناة اتصال، ويكون الهوائي المرسل عبارة عن هوائي مصفوفي MIMO مكون من 32 عنصر هوائي موزعة على أربع مصفوفات فرعية، قمنا في البداية بتطبيق مصفوفة من النوع Interleaved، قمنا بإجراء هذه المحاكاة على برنامج Matlab Simulink 2019a، ولتبسيط إجراء عملية المحاكاة قمنا بتطبيق قناة اتصال عديمة الضجيج وكما هو مبين في الشكل(4).



الشكل (4) نظام إرسال واستقبال مع مصفوفة هوائي كثيف.

تم تحميل إشارة البيانات المعدلة وفق تعديل UFMC على حامل ترددي من نمط الأمواج ميلي مترية من خلال بلوك يقوم بتوليد نغمتين صوتيتين Source Two Tones، بطول موجة ويتردد 72 GHz [16,17]، وفي مرسل الإشارة المعدلة من النوع UFMC يتم تقسيم عرض الحزمة إلى عدد B حزمة فرعية Sub band، وكل حزمة فرعية i وحيدة تحتوي على عدد N من الحوامل الفرعية Sub Carriers، ويتم تشفير بنات البيانات وتحويلها إلى رموز $\text{Sin}(i = 1 \dots B; n = 1 \dots N)$ قبل تحويلها إلى رموز على التوازي عبر محوّل من تسلسلي إلى متوازي Inverse Fourier Transome (S/P)، ثم يتم تطبيق تحويل فورييه العكسي Serial to Parallel Converter (S/P) (IFFT)، ثم يعاد تحويل الإشارة إلى صيغتها التسلسلية في جهة المستقبل عبر بلوك محوّل من تفرعي إلى تسلسلي Parallel to Serial Converter(P/S) ثم يتم ترشيح الإشارة بمرشح طوله $L_f = L_{cp} - 1$ حيث L_{cp} هي طول حزمة الحماية CP، وفي النهاية فإن الإشارات الناتجة y_i عن الحزم الفرعية يتم جمعها مع بعضها، ومن أجل كل كتلة من التعديل UFMC بطول $(N+L_f - 1)$ يتم تعريف الإشارة $S_{UFMC}(K)$ كمايلي [18]:

$$S_{UFMC}(K) = \sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^{L_f} \sum_{n=0}^N S_{i,n} e^{\frac{j2\pi(k-l)}{N}} f_i(l), \quad K = 0 \dots N + L_f - 1 \dots \dots \dots (1)$$

حيث:

$f_i(l)$

-

تمثل معاملات المرشح من أجل $l \in [0 \dots L_f]$.

L_f

-

طول المرشح.

L_{cp}

-

طول حزمة الحماية.

نستخدم الآن المستقبل لنستطيع أن نعبر المصفوفة بشكل رياضي، نفترض أن كل عنصر هوائي يتصل بمزيج طوري Phase Shifter [19]، ونفترض أنه لدينا مصفوفة هوائي الإرسال هي مصفوفة مربعة $M = M_x \times M_y$ حيث M هي عدد المصفوفات الفرعية Sub Arrays، وتحتوي كل مصفوفة فرعية على عدد $N = N_x \times N_y$ من

عناصر الهوائيات، لنفترض الآن أن الموجة المستوية $\tilde{S}(t) = hx(t)$ يصل إلى مصفوفة الاستقبال الهجينة بزاوية ارتفاع θ وزاوية سمت φ حيث $x(t)$ هي الإشارة المرسلية و h هو خسارة المسار $Path\ loss$ ، لنفترض أن $S_m(t)$ هي الإشارة المستقبلية من المصفوفة الفرعية m وهي الإشارة المنجبهة من القسم التماثلي إلى القسم الرقمي من البنية الهجينة في الهوائي المستقبل [20]، وبإهمال التداخل و التراكم في الإشارات فإنه يمكن التعبير عن هذه الإشارة وفق المعادلة الآتية:

$$S_m(t) = \tilde{S}(t) \sum_{i=0}^{N-1} P_{(i,m)}(\theta, \varphi) e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda_c}(x_{i,m}\sin\theta\cos\varphi + y_{i,m}\sin\theta\sin\varphi) + \alpha_{i,m}\right]} + Z_m(t), \quad \dots\dots\dots(2)$$

حيث:

$$P_{(i,m)}(\theta, \varphi)$$

هو مستوي الاستطاعة للإشعاع الراديوي في المصفوفة الفرعية m .

$$\lambda_c$$

هي طول موجة الحامل.

$$\alpha_{i,m}$$

الإزاحة الطورية.

$$Z_m(t)$$

هي مقدار الضجيج الغوسي المضاف على خرج المصفوفة الفرعية.

إن كل عناصر الهوائيات في جميع المصفوفات الفرعية التي تكوّن المصفوفة المربعة تمتلك نفس مستوي استطاعة الإشعاع الراديوي، عندئذ $P_{(i,m)}(\theta, \varphi) = 1$ وبالتالي يمكن تبسيط المعادلة السابقة إلى الشكل التالي:

$$S_m(t) = \tilde{S}(t) P_{(i,m)}(\theta, \varphi) e^{j\left[\frac{2\pi}{\lambda_c}(m_x d_x^s \sin\theta\cos\varphi + m_y d_y^s \sin\theta\sin\varphi)\right]} + Z_m(t) \dots\dots\dots(3)$$

حيث:

$$d_x^s$$

d_y^s ، هما المسافة بين عناصر المصفوفات الفرعية المرتبطة بسلسلة راديوية واحدة ضمن المصفوفة المربعة.

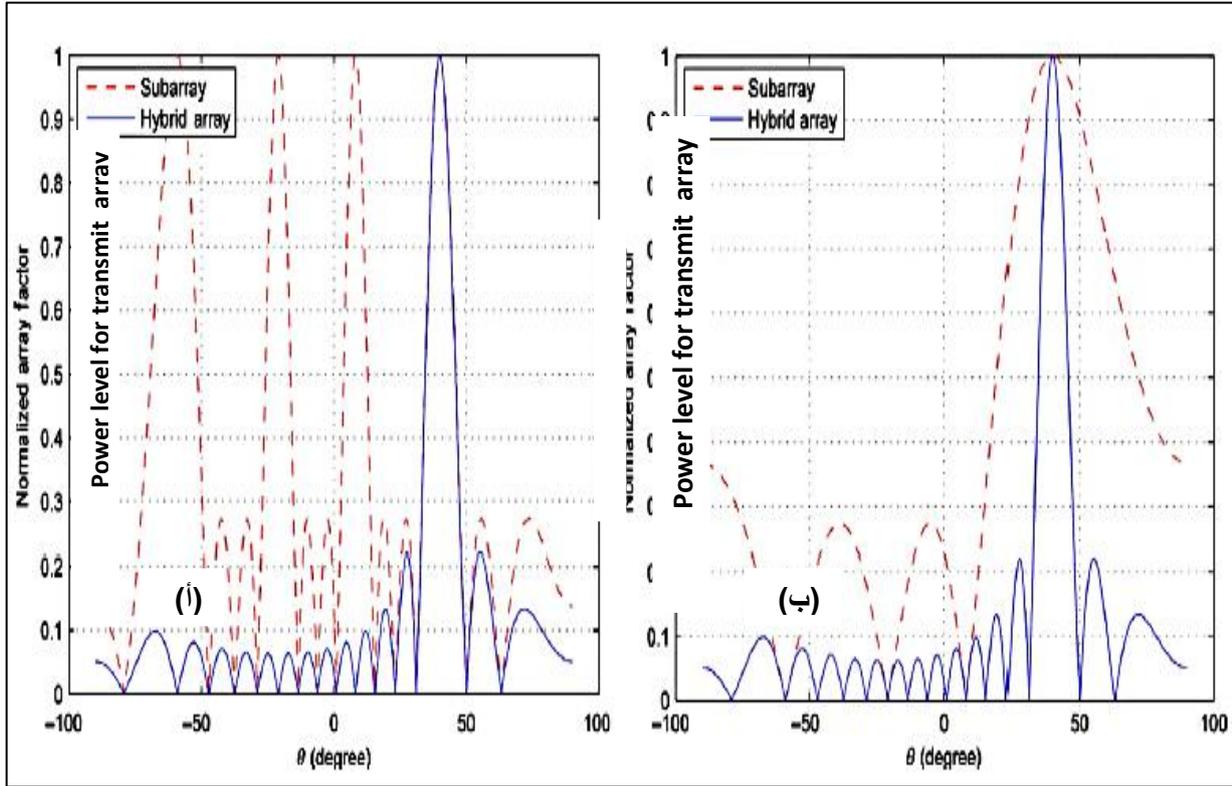
$$m_y =$$

m_x هي عدد المصفوفات الفرعية وفق الاتجاه الأفقي والشاقولي على الترتيب.

من المعادلة 3 نلاحظ أن المسافة بين عناصر المصفوفة يرتبط بعلاقة لوغاريتمية مع الإشارة الصادرة عن مصفوفة الهوائي، وبالتالي يمكن للنمط المستخدم في تحديد توزيع عناصر الهوائيات أن يلعب دوراً مهماً في تحديد شكل وقوة الإشارة المرسلية.

4- النتائج والمناقشة:

تم إجراء المحاكاة من أجل الحصول على أفضل أداء لمصفوفة الهوائي مع التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UPMC، حيث تم استخدام نمطين لمصفوفة الهوائي هما Localized و Interleaved، وهما في الجزء التماثلي من البنية الهجينة للهوائي المرسل، أما في الجزء الرقمي من البنية فيوجد التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل، وتم قياس النتائج عند زوايا مختلفة من جهة الاستقبال لمراقبة مدى فعالية ودقة توجيه الوريقة الرئيسية لإشعاع الهوائي المرسل، وباستخدام الهوائي ككل مرة، وبأخذ النتائج باستخدام إحدى المصفوفات الفرعية مفردة مرة أخرى.



الشكل (5) المخطط الإشعاعي للهوائي المرسل والمصفوفات الفرعية عند زوايا استقبال مختلفة وفق النمطين

(أ) Interleaved، (ب) Localized

نلاحظ من الشكل (5) أن المصفوفة الفرعية تبدو أقل اتجاهية عند زوايا مختلفة من ناحية الاستقبال، بينما تحافظ المصفوفة الكلية على أداء متشابه في كلا النمطين عند زوايا مختلفة من ناحية الاستقبال، لا يبدو هذا التأثير مهماً في حالة مستخدم وحيد، ولكن هذا السيناريو غير واقعي، حيث أنه في حالة مستخدمين متعددين سيكون أداء المصفوفات الفرعية سيئاً من ناحية التوجيه.

نقوم بالمقارنة بين النمطين من خلال معد خطأ البت والكفاءة الطيفية واستطاعة الوريقة الرئيسية للإشعاع المرسل، ومن حيث الزمن اللازم لإجراء عملية المحاكاة، ونلاحظ أن النمط Interleaved يقدم أداءً أفضل من حيث الاتجاهية وبالتالي استطاعة القناة، ومن حيث معدّل خطأ البت BER أما من ناحية الزمن اللازم لإجراء عملية المحاكاة فإن النمط Localized أسرع من النمط Interleaved.

الجدول (1) ملخص نتائج المحاكاة من أجل اختبار الهوائي المصفوفي الهجين وفق النمطين (Interleaved, Localized) وفق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل.

	Channel power (dBm)	BER	Occupied BW (KHz)	تأخير الحساب (ms)
UBMC With Interleaved Array	-44.430	$0.8 \cdot 10^{-4}$	320.8021	340ms
UFMC With Localized Array	-44.430	$0.94 \cdot 10^{-4}$	340.1014	310ms

5- الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية:

تم بتطبيق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC في القسم الرقمي من البنية الهجينة للهوائي المصفوفي المرسل، أما في القسم التماثلي من البنية الهجينة فاعتمدنا على تطبيق نمطين من أنماط توزيع عناصر الهوائي ضمن المصفوفة هما النمطان Localized و Interleaved، ثم مقارنة أداء التعديل UFMC وفق النمطين المذكورين، ثم توصلنا إلى أن أداء التعديل UFMC وفق نمط توزيع Interleaved يعدّ الخيار الأفضل للعمل ضمن سيناريو متعدد المستخدمين، لكن الدراسة التي تم إجراؤها تحتاج إلى مزيد من التعمق من ناحية أخذ عوامل أخرى يمكن أن تؤثر في فاعلية التعديل UFMC بعين الاعتبار، فمثلاً يعد اختيار مضخمات الاستطاعة Power Amplifier PA عاملاً مؤثراً بشكل كبير، والتردد الحامل المستخدم يلعب دوراً حاسماً في فاعلية المضخمات، كما يمكن إجراء دراسة معمقة عن مدى تأثير دقة المحولات الرقمية التشابهيّة على فاعلية التعديل المستخدم.

المراجع:

- [1] D. Digdarsini, M. Kumar, T.V.S. Ram, "Design & hardware realization of FPGA based digital beam forming system," in *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2016, pp. 275-278
- [2] Y. Y. Lin, C. L. Liao, T. H. Hsieh, W. K. Liao, "A novel beam switching array antenna using series-fed slots with PIN diodes," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 1393-1396.
- [3] L. Li, W. Hong, P. Chen, Y. Zhang, Z. Chen, W. Yang, "A planar active antenna array for hybrid phased array-MIMO," in *IEEE International Wireless Symposium*, 2014, pp. 1-4.
- [4] X. Yu, J. Zhang, K. B. Letaief, "A hardware-efficient analog network structure for hybrid precoding in millimeter wave systems," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, Vol. 12, no. 2, pp. 282-297.
- [5] Z. Wang, M. Li, Q. Liu, A. Lee Swindlehurst, "Hybrid precoder and combiner design with low-resolution phase shifters in mmWave MIMO systems," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 256-269.
- [6] S. Payami, M. Ghorraishi, M. Dianati, M. Sellathurai, "Hybrid beamforming with a reduced number of phase shifters for massive MIMO systems," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 6, 2018, pp. 4843-4851.
- [7] M. C. Tan, M. Li, Q. H. Abbasi, M. Imran, "A wideband beamforming antenna array for 802.11ac and 4.9 GHz," in *13th European Conference on Antenna and Propagation (EUCAP)*, 2019.
- [8] J. Lee, G. T. Gil, Y. H. Lee, "Channel Estimation via Orthogonal Matching Pursuit for Hybrid MIMO Systems in Millimeter Wave Communications" in *IEEE Transactions on Communications*, doi:10.1109/TCOMM.2016.2557791.
- [9] Q. Shi and M. Hong, "Spectral Efficiency Optimization for Millimeter Wave Multi-User MIMO Systems" in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol 12, pp. 455-468, doi: 10.1109/JSTSP.2018.2824246, June 2018.
- [10] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi and R. W. Heath, Jr., "Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems" in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, May 2013, doi:10.1109/TWC.2014.011714.1308.
- [11] K. Satyanarayana, M. El-Hajjar, P. H. Kuo, A. Mourad and L. Hanzo, "Millimeter Wave Hybrid Beamforming with DFT-MUB Aided Precoder Codebook Design" in *IEEE Vehicular Technology Conference*, May 2017, doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288023.
- [12] A. Almradi, M. Matthaiou, P. Xiao, and V. F. Fusco, "Hybrid precoding for massive MIMO with low rank channels: A two-stage user scheduling approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 8, pp. 4816_4831, Aug. 2020.
- [13] S. Wang, M. He, Y. Zhang, and R. Ruby, "Equivalent channel-based joint hybrid precoding/combining for large-scale MIMO systems," *Phys. Commun.*, vol. 47, Aug. 2021, Art. no. 101287.
- [14] S. S. Nair and S. Bhashyam, "Hybrid beamforming in MU-MIMO using partial interfering beam feedback," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 7, pp. 1548_1552, Jul. 2020.
- [15] Y. Zhang, J. Du, Y. Chen, X. Li, K. M. Rabie, and R. Khkrel, "Dualiterative hybrid beamforming design for millimeter-wave massive multiuser MIMO systems with sub-connected structure," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 11, pp. 13482_13496, Nov. 2020.

- [16] J. Lee and Y. H. Lee, "AF relaying for millimeter wave communication systems with hybrid RF/baseband MIMO processing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Jun. 2014, pp. 5838_5842.
- [17] X. Xue, T. E. Bogale, X. Wang, Y. Wang, and B. L. Long, "Hybrid analog/digital beamforming for multiuser MIMO millimeter wave relay systems," in *Proc. IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*, Nov. 2015, pp. 1_7.
- [18] X. Xue, Y. Wang, L. Dai, and C. Masouros, "Relay hybrid precoding design in millimeter-wave massive MIMO systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 8, pp. 2011_2026, Apr. 2018.
- [19] W. Xu, Y. Wang, and X. Xue, "ADMM for hybrid precoding of relay in millimeter-wave massive MIMO system," in *Proc. IEEE 88th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Aug. 2018, pp. 1_5.
- [20] C. Xing, X. Zhao, S. Wang, W. Xu, S. X. Ng, and S. Chen, "Hybrid transceiver optimization for multi-hop communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1880_1895, Aug. 2020.
- [21] D. Zhang, Y. Wang, X. Li, and W. Xiang, "Hybridly connected structure for hybrid beamforming in mmWave massive MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 2, pp. 662_674, Feb. 2018.