

دراسة تحليلية لشبكات الجيل الخامس الخلوية وفق الهيكلية الموزعة باستخدام تقنيات التعديل الترددي متعدد الحوامل

م. عدي قاسم*

(تاريخ الإيداع 2021/ 7/ 28 . قُبِلَ للنشر في 2021/ 9/ 28)

□ ملخص □

لقد تم وضع تصور لبنية الشبكات الخلوية من الجيل الخامس بحيث توفر معدل نقل بيانات أعلى Higher Data Rates، تأخيراً زمنياً منخفضاً أقل Lower Latency، وتحسين جودة الخدمة Quality of Services للمستخدمين النهائيين، و توسعاً أكبر في مجال تطبيقات الوسائط المتعددة، و الواقع المعزز ونظم الزمن الحقيقي أصبح من الضروري زيادة عدد المحطات الراديوية Base Stations لتلبية هذه الاحتياجات، وهذا ما يزيد من التحديات المالية أمام الشركات المشغلة للشبكات الخلوية، مما أبرز الحاجة إلى التفكير في تصميم جديد لهذه الشبكات الحديثة بما يوازن بين الأداء والتكلفة. وبدأت في هذا الاتجاه الشبكات الموزعة Distributed Networks تحصد المزيد من الاهتمام، والتي يتم فيها فصل المحطات الراديوية إلى عدد من الرؤوس الراديوية البسيطة والمتصلة عن بعد Remote Radio Heads (RRHs)، مما يوفر سعة Capacity أكبر للشبكة الخلوية، وتتصل فيما بينها عبر الألياف الضوئية التي تلعب دوراً هاماً في الهيكلية المقترحة، ويوفر عدداً أقل من الخوادم الأساسية Base-Band Servers (BBSs)، ووفق هذه الهيكلية الجديدة نحاول استخدام مجموعة من التعديلات متعددة الحوامل على الإشارة والمقارنة فيما بينها من ناحية فعالية الطيف و معدل خطأ البت، وسوف نستخدم هوائي كثيف قابل للفصل، مكون من مصفوفة هوائيات 8*8 في جهة الإرسال وتتم مقارنة النتائج بين التعديلات الترددية المقترحة. الكلمات المفتاحية: الشبكة الموزعة، الهوائي الكثيف، التعديلات متعددة الحوامل.

* ماجستير في اختصاص هندسة تكنولوجيا الاتصالات، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس، سوريا

A Novel analytical study of distributed 5G networks using multicarrier modulation techniques

Odai Kassem*

(Received 28 /7 / 2021 . Accepted 28 / 9 / 2021)

□ ABSTRACT □

Next generation of cellular systems 5G has been envisioned to provide higher data rates, lower end-to-end latencies, enhanced quality of service for end users and broadened diversity of multimedia applications, augmented reality and real-time systems. it became necessary to increase the number of radio BSs to meet all of these needs, which challenges the low-cost constraints imposed by operators, and that what lead us to think about new architecture designing to make a trade-off between performance and cost. In this direction, new distributed architectures have been recently gaining momentum, in which base stations are decoupled in simplified multiple remote radio heads (RRHs), providing high capacity to the network, and it's connected by fiber optics which play an important role in our proposed architecture, and this will also reduce the number of Base-Band Servers (BBSs). According to our new architecture design, we use a group of multicarrier modulations techniques and we try to compare between of each spectral efficiency and bit error rate, we use a 8*8 massive MIMO antenna at the transmitter side, and final results are put in compare.

Key words: Distributed Networks, Massive MIMO, Multicarrier Modulations.

* Master in Department of Communications Technology Engineering, Faculty of Information & Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

مقدمة:

بما أن مجال البحث في الاتصالات اللاسلكية والخلوية على وجه التحديد يتركز حول كيفية الحصول على معدل نقل بيانات أعلى، تأخير زمني أقل، موثوقية ومرونة أكبر، ومستوى أمان أعلى، فإنه أصبح من الواضح جداً التحديات التي تواجه الهيكلية الجديدة في بناء منظومة اتصالات خلوية، وللحصول على السعة المطلوبة من الشبكة فإنه من المتوقع أن يزداد عدد المحطات BSs المطلوبة، ويصاحب ذلك تقديم نوعين من الخلايا هما Femtocells وخلايا Pico cells التين تقدمان أعلى مستوى من قابلية إعادة استخدام التردد [1] Frequency Reuse، وللتخفيف من التكاليف الناتجة عن زيادة عدد المحطات الراديوية تم تقديم هيكلية جديدة موزعة [3][2]، والتي يتم تقسيم المحطات الراديوية إلى عدد كبير من الرؤوس الراديوية التي تعمل عن بعد (Remote Radio Heads (RRHs)، والتي تعد مسؤولة فقط عن إرسال واستقبال الإشارات إلى المستخدم النهائي، وعدد أقل من وحدات المعالجة للإشارات الراديوية (Base Band Processing Units (BBUs) والتي تتولى مسألة المعالجة الأكبر والأكثر تعقيداً بشكل مركزي أكبر والقادمة إلى الشبكة وفق نظام السحابة Cloud [4][3].

هدف البحث:

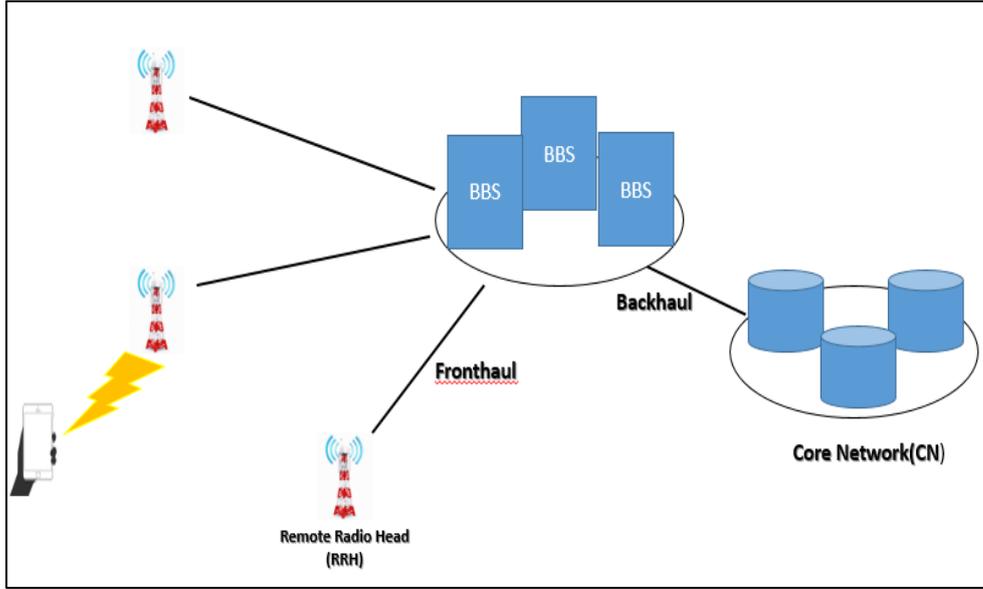
يهدف هذه البحث إلى إجراء دراسة تحليلية للشبكة الخليوية من الجيل الخامس التي يتم بناؤها وفق هيكلية موزعة ومن ثم تطبيق تقنيات التعديل متعددة الحوامل OFDM,FBMC,UFMC,GFDM، وإجراء مقارنة فيما بينها من خلال فعالية الطيف الترددي ومقاومة الطيف للضجيج والترددات الغير مرغوبة والتداخل وغيرها، وإجراء تقييم نهائي للتعديل الترددي الأنسب لاستخدامه مع هذا النوع من الشبكات الخلوية.

طرائق البحث ومواده:

أولاً-الدراسات المرجعية:

❖ الهيكلية الموزعة Distributed Architecture:

تتكون بشكل رئيسي من مخدّمات الإشارة الأساسية (Base Band Servers (BBS) ورؤوس الإرسال الراديوي (Remote Radio Heads (RRH)، ووفق هذا التقسيم تتم مكاملة مجمل عمليات معالجة الإشارة الأساسية ضمن مجموعة من رؤوس الإرسال الراديوي RRHs متصلة مع خادم وحيد BBS مما يزيد من مركزية عمليات معالجة الإشارة وبالتالي زيادة مساحة التغطية لرؤوس الإرسال بسبب انخفاض تكلفة كل رأس RRH مقارنة بتكلفة تركيب محطة BS متكاملة [5]، الجدير بالذكر أنه يتم ربط الرؤوس الراديوية RRH مع الخوادم BBS عبر شبكة ألياف ضوئية مما يزيد من موثوقية الإشارات و سرعة انتقالها، كما هو موضح في الشكل (1)، وكلما زاد عدد الرؤوس الراديوية زاد عدد الوصلات الضوئية، وكما نعلم فإن تقنيات تعديل الإشارة الضوئية التقليدية تزيد التكلفة بشكل كبير، ولذلك فإن استخدام تقنية الراديو عبر الليف Radio Over Fiber (RoF) تُبسّط بشكل كبير عملية تعديل الإشارات وتخفض من التكلفة المادية المترتبة على ذلك، وستلعب الدور الأساسية في الهيكلية الموزعة المقترحة [6].



الشكل (1) الهيكلية الموزعة.

❖ تعديلات الجيل الجديد للاتصالات الخليوية:

يزداد الضغط على الطيف الترددي يوماً بعد يوم، والمشيح أصلاً بالترددات المشغولة، مع زيادة عدد الأجهزة المتصلة بالشبكة، ودخول أجهزة انترنت الأشياء IOT وانتشارها أيضاً واستخدامها على نحو متزايد للنطاق الترددي المحدود، مما يؤدي إلى نقصان في الترددات الشاغرة، يعتبر التعديل متعدد الحوامل Multicarrier Modulation من أكثر الطرق الشائعة للتعديل من أجل الدخول إلى المجال الترددي [7,8] ويعرّف على أنه صيغة من صيغ التقسيم الترددي، حيث تُرسل البيانات عبر القناة وفق حوامل فرعية subcarriers متعددة، وتتم عملية التعديل متعدد الحوامل وفق طرق متعدد من بينها التعديل الترددي المتعامد OFDM والتعديل بالمرشحات الحزمية FBMC، Universal-Filtered Multi-Carrier، والتعديل (UFMC)، وGeneralized Frequency Division Multiplexing (GFDM). [9,10].

وعلى الرغم من أن تقنية التعديل الترددي المتعامد قد جرى اعتمادها في الجيل الرابع لما لها من خصائص مقاومة للضجيج وموثوقية عالية إلا أنها لاتزال تعاني من العديد من السلبيات التي تعترض سبيل اعتمادها كتقنية تعديل في الأجيال الخلوية القادمة وخاصة الجيل الخامس.

❖ السلبيات الأساسية للتعديل الترددي المتعامد OFDM:

لقد أحدثت تقنية التعديل الترددي المتعامد ثورة في الاتصالات الترددي المتعامدة، وأثبتت جدارتها في مقاومتها العالية للتداخل، بسبب خاصية الحوامل الفرعية التعامدية، وتدعم مقاومة تداخل الرموز Inter-symbol عبر حزمة حماية Cyclic Prefix قيل وبعد كل رموز من رموز OFDM [10]، وتساهم هذه الحزم أيضاً في تسهيل عملية الإرسال متعدد المسارات Multipath propagation. يخفض استخدام حزم الحماية من فعالية الطيف الترددي المستخدم، كون هذه الحزم هي ترددات فارغة من أية إشارة، وبالتالي تحجز مكاناً فارغاً ضمن طيف الإشارة المرسل [11]، كما أنه إذا تم فقدان التزامن بين الرموز في جهة الإرسال مع الاستقبال فإن الخاصية التعامدية لهذا التعديل سيتم فقدانها بشكل كامل، ويمكن

تجاوز هذه المشكلة في القنوات ذات الضجيج العالية وذلك بزيادة حجم حزم الحماية بين الرموز، ولكن ذلك يخفّض بشكل كبير من فعالية الطيف الترددي.

❖ التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC:

اكتسب التعديل بالمرشحات الحزمية المزيد من الاهتمام بعد ظهور العديد من السلبيات في التعديل الترددي المتعامد خصوصاً مع الجيل الجديد من الاتصالات الخلوية واستخدام الترددات العالية، وبشكل عام فإن التعديل بالمرشحات الحزمية يحقق كفاءة طيفية أكبر لأنه لا يحوي حزم حماية Cycle prefix كما هو الحال في تعديل OFDM كما يلغي الحاجة إلى التزامن بني المرسل والمستقبل لعدم وجود الخاصية التعامدية ضمنه، ويتميز عن التعديل OFDM في أنه يتم ترشيح كل حامل فرعي بمفرده للتخفيف من الوريقات الجانبية side lobes قدر الإمكان [12][11]، وهذا يخفف من التداخل وبالتالي لا حاجة إلى حزم الحماية، وهو ما يحقق معدلات إرسال أعلى من نظيرتها في تعديل OFDM، ولكن يزداد تعقيد استخدام مثل هذا التعديل في الهوائيات متعددة الدخل والخرج MIMO والهوائيات الكثيفة Massive MIMO.

❖ الترشيح الكلي متعدد الحوامل Universal-Filtered Multi-Carrier UFMC:

بدلاً من أن يتم ترشيح كل حامل فردي بمفرده كما هو الحال في نظام FBMC فإنه يتم ترشيح كل مجموعة حوامل فرعية مع بعضها البعض، ويطبّق على كل مجموعة تحويل فورييه العكسي بشكل مستقل، ونحصل بالنتيجة على بنية أقل تعقيداً، وكما هو مبين في الشكل (2) فإن يتم جمع الخرج الناتج عن عملية الترشيح للحصول على إشارة UFMC الأساسية. ويتميز مثل هذا النوع من التعديل بتخفيف عدد حزم الحماية بين المجالات الفرعية، وبالنتيجة فهذا النوع من التعديل يتفوق على التعديل OFDM بكفاءة طيف ترددي أعلا [13].

❖ التعديل المعمّم باقتسام التردد Generalized Frequency Division Multiplexing

:GFDM

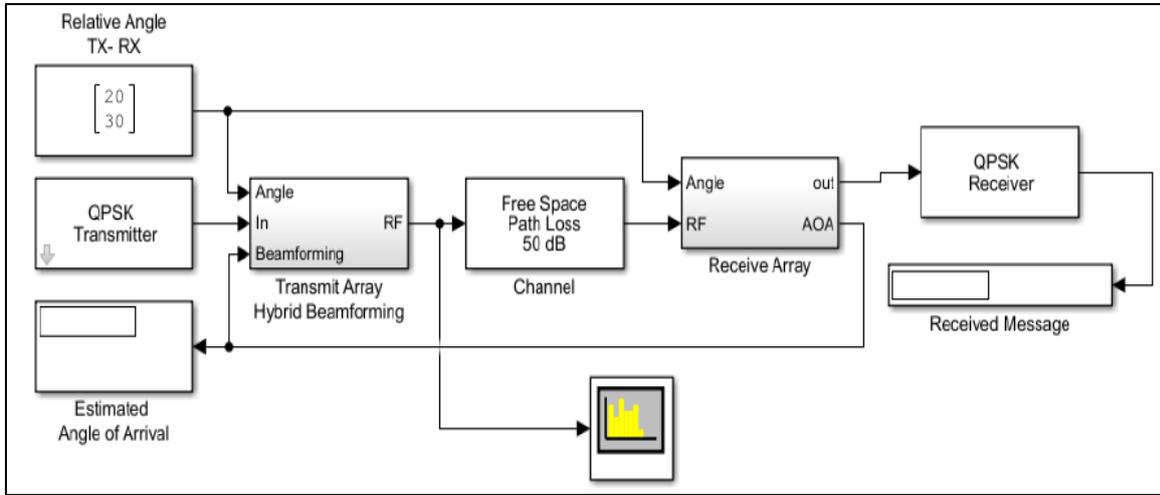
يظهر هذا النوع من التعديل كبديل عن تعديل OFDM في السيناريوهات التي تطلب حزم ترددي ضيقة مثل تطبيقات انترنت الأشياء، وليس من الضروري أن تكون الحوامل الفرعية متعامدة بشكل كامل كما هو الحال في تعديل OFDM، بل يمكن اعتماد خصائص كل حامل فرعي بمفرده وبشكل أكثر مرونة، وبإدخال أنواع مختلفة من هذه الحوامل معاً ضمن حزمة ترددية واحدة يمكننا تحقيق كفاءة طيف ترددي عالية وانخفاض في تشتت الإشارة وتوجيه القسم الأكبر منها وفق اتجاهية محددة [15][14].

وبعد كل الميزات والسلبيات التي تمتلكها جميع أنواع التعديلات الترددي متعددة الحامل التي ذكرناها، فيبدو لدينا أن التعديل الترددي المتعامد هو نواة كل هذه التقنيات المذكورة ورغم ذلك يجب إيجاد التعديل الأنسب لاعتماده في تقنية الجيل الخامس.

ثانياً- نموذج المحاكاة:

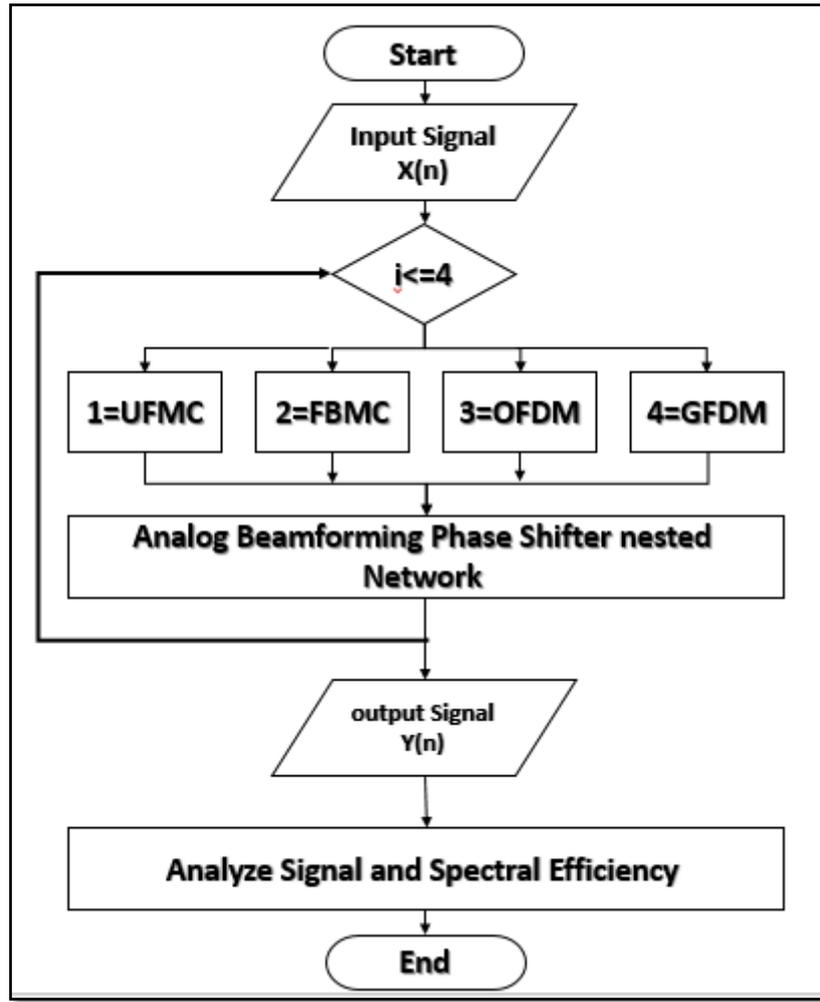
تم إجراء هذه المحاكاة على برنامج Matlab Simulink 2019a باستخدام هوائي كثيف Massive MIMO يعمل بموجة ميلي مترية ترددها 66GHz و يحتوي على 32 عنصر هوائي، ونطبّق أنظمة التعديل الرقمي

التي ذكرناها ضمن بلوك معالجة إشارة الإرسال الأساسية الذي قمنا بتسميته اصطلاحاً QPSK Transmitter، ويبين الشكل (1) نظام إرسال واستقبال مع مصفوفة هوائي كثيف.



الشكل (1) نظام إرسال واستقبال مع مصفوفة هوائي كثيف.

ويبين الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزمية العمل التي تمثل إرسال إشارة متعددة الحوامل عبر الهوائي الكثيف المقترح، حيث قمنا باقتراح إجراء تعديل على الخوارزمية يتمثل في تطبيق حلقة تكرارية من أربعة تكرارات يتم في كل منها اختيار نوع تعديل معين من التعديلات الترددية متعددة الحوامل، وبقمنا بوضع شرط ضمن المخطط الانسيابي للدلالة على أن أحد هذه التعديلات سيتم اختياره في كل مرة تشغيل للخوارزمية وليس المقصود تشغيل التعديلات الترددية الأربعة معاً في وقت واحد.



الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزمية العمل المقترحة المعدلة.

بافتراض أن T_g هي الفترة الزمنية لحزمة الحماية، $T_s = T_u + T_g$ هي الفترة الزمنية التي يشغلها رمز OFDM مع حزمتي الحماية قبله وبعده [16][11]، بالتالي فإن الإشارة المُرسلة بالشكل العقدي هي مجموع رموز OFDM في المجال الزمني كما يلي:

$$\tilde{S}(t) = \sum_{s=0}^{s-1} \tilde{x}'_s(1 - s T_s) \quad (1)$$

حيث أن:

\tilde{x}'_s : هي الإشارة المراد إرسالها بعد إضافة حزمة الحماية Cycle Prefix عليها.

$S(t)$: هي الإشارة المرسلّة بشكلها العقدي.

T_s : هي الفترة الزمنية التي يشغلها رمز OFDM واحد.

S : ثابت عقدي.

وبعد تحميل الإشارة على تردد الحامل تصبح جاهزة للإرسال بالشكل الآتي:

$$S(t) = Re\{\tilde{S}(t)e^{j2\pi f_c t}\}; \quad (2)$$

أما عند استخدام التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC ، فلنفترض أنه لدينا $x_{m,n}$ رمز عقدي مُرسل عبر الحامل الفرعي m في الزمن n ، و يمكن التعبير عن الإشارة المرسله بالمعادلة الآتية [12]:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g_{m,n}(t)x_{m,n}(t) \quad (3)$$

$$g_{m,n}(t) = p_{tx} \left(t - \frac{NT_0}{2} \right) e^{j2\pi F(t-NT_0)} e^{j\theta_{m,n}} \quad (4)$$

حيث p_{tx} هي نبضة التشكيل الأساسية، $g_{m,n}(t)$ هي التردد المُزاح، و T_0 التباعد الزمني، F هو مقدار التباعد في بين الحوامل الفرعية، N هو العدد الكلي للرموز، و M هو العدد الكلي للحوامل الفرعية، ونلاحظ هنا في معادلة الإشارة المرسله أننا لم نضع حزم حماية كما فعلنا في تعديل OFDM. أما الإشارة المرسله وفق التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFMC فإنها تبدو أعقد قليلاً لكون عملية الترشيح تتم لكل مجموعة من الحوامل على حدى، نفترض أن $g_Q[n]$ هو المرشح المزاح إلى الترددي المركزي للحزمة الفرعية sub-band، وبالتالي فإن الإشارة المرسله تُعطى بالعلاقة [17][13]:

$$x_n[n] = \sum_{s=0}^{s-1} \sum_{r=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{l=0}^{L-1} S_{s,q,r} g_Q[n-1-rN_{ufmc}] e^{\frac{j2\pi Q}{2n}} e^{\frac{j2\pi(S_0+S_Q)(n-rN_{ufmc})}{Nc}} \quad (5)$$

حيث أن:

$$g_Q[n] =$$

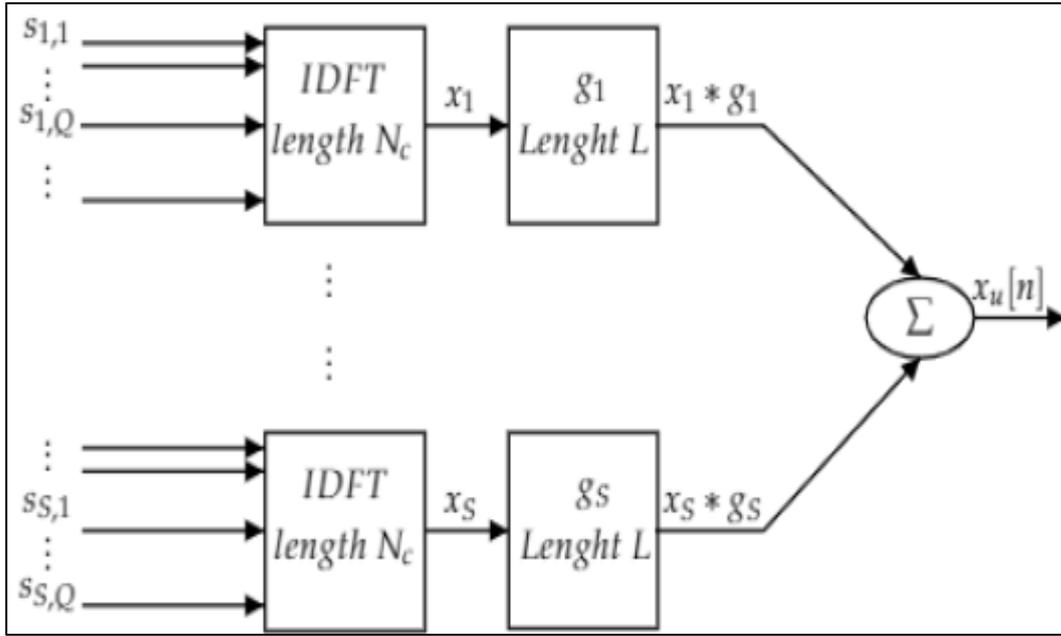
$$e^{\frac{j2\pi Q/2n}{Nc}}$$

$N_{ufmc} = N_c + L - 1$ هو طول الإشارة المرسله و N_c هي طول إشارة تحويل فورييه العكسي (IDFT).

$$g_Q$$

هي إشارة المرشح المستخدم مع مجموعة الحزم الفرعية S .

ويعبر الشكل (3) أدناه -الذي يمثل مرسل UFMC- عن البارامترات الموجودة في معادلة إشارة UFMC المرسله.



الشكل (3) مُرسِل UFMC.

أما الإشارة المرسلَة وفق التعديل GFDM فتُعطى بالعلاقة الآتية [18][15]:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} d^{(k,m)} h(n - mk) e^{j2\pi n \frac{k}{K}} \quad (6)$$

حيث أن:

K

-

هي عدد الحوامل الفرعية.

M

-

هي الرموز الجزئية Sub-symbols.

$d^{(k,m)}$

-

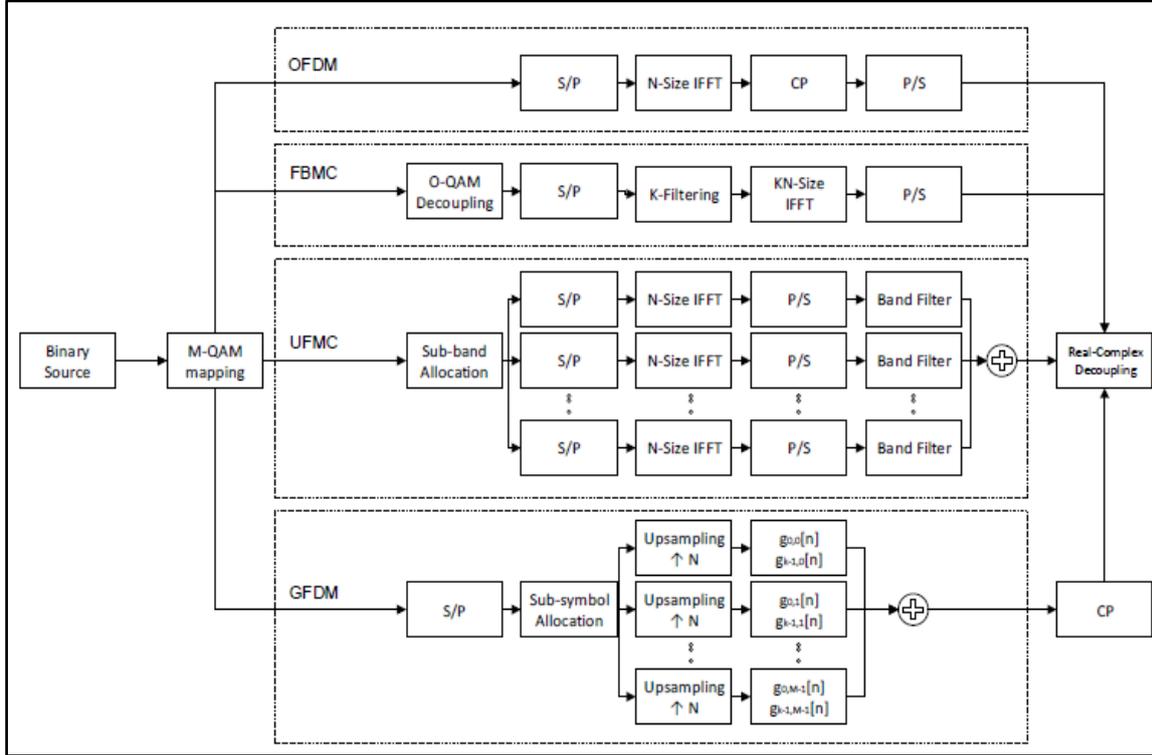
هي إشارة الرمز المرسل بالحامل الفرعي k الذي يحمل الرمز الجزئي m = sub-symbol.

$h(n -$

-

$mk)$ هي الإشارة الصادرة عن المرشح و n عدد صحيح حيث: $n=1,2,3,\dots,MK$.

ويبين الشكل (4) مخططاً للإرسال يختصراً أنواع التعديل الترددي متعدد الحوامل المذكورة في بحثنا هذا [19].



الشكل (4) مخطط إرسال لأنواع التعديل متعدد الحوامل OFDM, FBMC, UFMC, GFDM.

النتائج والمناقشة:

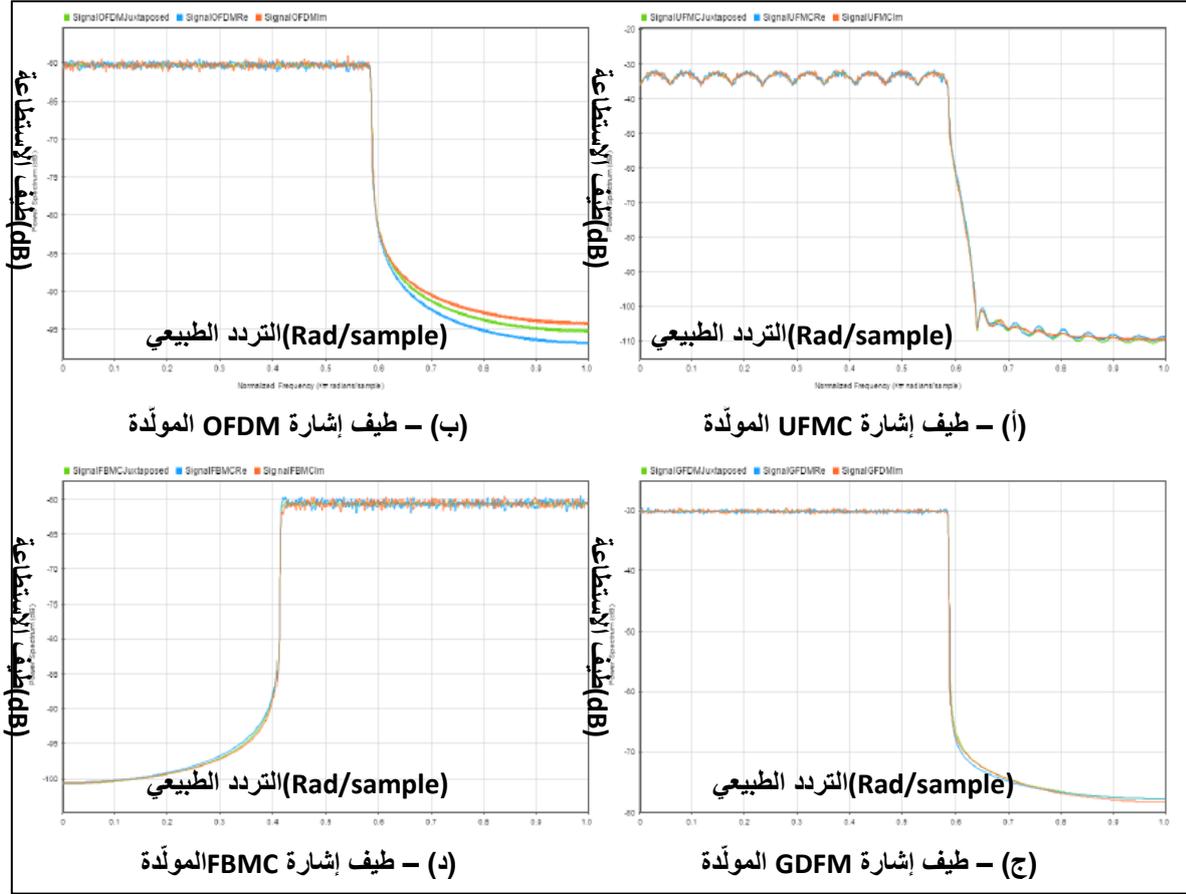
تم إجراء المحاكاة من أجل الحصول على أفضل تعديل ترددي يمكن استخدامه مع الهوائي الكثيف المقترح، حيث لاحظنا أن معدل خطأ البت وفق التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC هو الأقل من بين التعديل المستخدمة عبر كل مستويات الطاقة المستقبلية، فيما كان معدل خطأ البت باستخدام التعديل المعمم باقتسام التردد GFDM هو الأسوأ من بين التعديلات المستخدمة، أما التعديلان OFDM و UFMC فقد كان أدائهما في الوسط بين التعديلين المذكورين أعلاه من ناحية معدل خطأ البت، مع ملاحظة أداء أفضل للتعديل الترددي المتعامد OFDM من التعديل UFMC من ناحية معدل خطأ البت، من غير المستغرب أن يحقق التعديل GFDM الأداء الأسوأ لأنه من خلال معادلة الإشارة المرسلية يمكن ملاحظة أنه يتم التضحية بمعدل خطأ البت في مقابل الحصول على مرونة أكبر والنقل من إشعاع الإشارة و تبديدها عبر وسط الانتشار، لكن نلاحظ أنه من النتائج الغير متوقعة هو الأداء الأسوأ للتعديل بالترشيح الكلي UFMC مقارنة بالتعديل الترددي المتعامد OFDM، ويرجع السبب في معدل خطأ البت السيئ هنا إلى ظاهرة إزاحة الحوامل الترددية المستخدمة (Carrier Frequency Offset CFO) التي تحدث في التعديل UFMC بسبب عدم اعتماده على تزامن الحوامل كما هو الحال في التعديل الترددي المتعامد [20][19]، فيما يمكن تفسير الأداء السيئ للتعديل OFDM من ناحية معدل خطأ البت وذلك بسبب الترددات المرتفعة جدا في الهوائي الكثيف والذي استخدمنا فيها التردد 60GHz (أمواج ميلي مترية) والتي تؤثر بشكل سلبي على الخاصية التعامدية للحوامل الفرعية في التعديل OFDM.

نلاحظ أيضاً من الجدول (1) أن التعديل الترددي المتعامد يحقق اتجاهية أعلا من بقية الترددات بالنسبة للوريقة الرئيسية للإشارة الصادرة عن الهوائي، ولكن التعديلين FBMC و UFMC يحققان كفاءة طيفية أعلا وذلك لعد اعتمادهما على حزم الحماية Cycle Prefix كما هو الحال في التعديل المتعامد. يبدو واضحاً أيضاً أن التعديل GFDM يحتاج إلى زمن معالجة ومحاكاة هو الأقل من بين التعديلات المقترحة لسهولة مراحل التعديل نسبياً مقارنة مع باقي التعديلات، فيما يحتل التعديل بالمرشحات الحزمية الزمن الأكبر بسبب العدد الكبير من عمليات الترشيح ضمنه.

الجدول(1) ملخص نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء التعديلات (FBMC,UFMC,GFDM,OFDM) وفق منظومة اتصال تعتمد هوائي كثيف للإرسال.

	Channel power (dBm)	BER	Occupied BW (KHz)	computational complexity(ms)
OFDM	-44.430	$0.9*10^{-1}$	312.827	250ms
GFDM	-44.430	$0.98*10^{-1}$	312.687	190ms
FBMC	-44.430	$0.8*10^{-1}$	340.8021	340ms
UFMC	-44.430	$0.94*10^{-1}$	320.1014	310ms

أما من خلال الشكل (5) فيمكننا أن نشاهد بوضوح أن التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC يحقق أقل نسبة تسريب خارج الحزمة (Out-of-Band Leakage) يلي بالترتيب تعديل GFDM، تعديل UFMC وانتهاءً بتعديل OFDM، كما نلاحظ أن التعديلات السابقة كلها تحافظ على الشكل الطيفي الرئيسي للوريقة الإشعاعية الصادرة عن الهوائي الكثيف مما يشكل أساساً مهماً لأبحاث مستقبلية يمكنها الاعتماد على أحد هذه التعديلات في عمليات إرسال الإشارة الخليوية من هوائي كثيف كما في الجيل الخامس والجيل السادس الخليوي.



الشكل (5) مقارنة بين طيف الإشارة المولدة باستخدام أنواع التعديلات الترددية (FBMC, UFM, OFDM, GDFM).

الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية:

قمنا بتطبيق مجموعة من التعديلات الترددية هي التعديل بالمرشحات الحزمية FBMC، التعديل الترددي المتعامد OFDM، التعديل العمم باقتسام التردد GFDM، التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFM، وذلك على منظومة اتصال خلوية من الجيل الخامس اعتمدنا فيها على تصميم هوائي كثيف يعمل بتردد عالي (60GHz) مستخدماً الأمواج الملي مترية (Mm Waves) وبهيكلية معمارية هجينة Hybrid (Beamforming)، وبعد إجراء المحاكاة ومراقبة أداء التعديلات المقترحة من ناحية طيف الإشارة وزمن المحاكاة ومعدل خطأ البت، نستنتج أن التعديل بالمرشحات الحزمية يمثل تقنية واعدة في الأجيال الخلوية القادمة وخاصة في الجيل الخامس والسادس، لما يحققه من ميزات وإيجابيات لا يحققها التعديل الترددي المتعامد، وخاصة فيما يتعلق بالتخلص من خاصية التزامن الإجبارية بين الحوامل الفرعية في جهة الإرسال والاستقبال، كما يمكن تجاوز سلبيات التعديل بالمرشحات الحزمية فيما يتعلق بمعدل خطأ البت و تعقيد البنية من خلال التركيز على التعديل بالترشيح الكلي متعدد الحوامل UFM والذي يعد كحالة خاصة من التعديل بالمرشحات الحزمية ويمكن التركيز على تحسين آلية عمله وكيفية اختيار المرشحات المستخدمة و أساس استخدامها وعددها في الأبحاث المستقبلية.

المراجع:

- [1] A. Gran. *Next Generation 5G OFDM-Based Modulations*. GitHub.com. july,2019
- [2] I. F. Akyildiz, S.C. Lin, and P. Wang. *Wireless Software-Defined Networks (W-SDNs) and Network Function Virtualization (NFV) for 5G Cellular Systems: An overview and qualitative evaluation*. june, 2018
- [3] I. F. Akyildiz, S. Nie, S.C. Lin, and M. Chandrasekaran. *5G roadmap: 10 key enabling technologies*. *Computer Networks*, 106:17 – 48, 2016.
- [4] F. Barrami, Y. Le Guennec, E. Novakov, J. M. Duchamp, and P. Busson. *A novel FFT/IFFT size efficient technique to generate real time optical OFDM signals compatible with IM/DD systems*. In 2013 European Microwave Conference, pages 1247–1250, Oct 2013.
- [5] M Bellanger, D Le Ruyet, D Roviras, M Terr'e, J Nossek, L Baltar, Q Bai, D Waldhauser, M Renfors, T Ihalainen, et al. *FBMC physical layer: a primer*. PHYDYAS, January, 25(4):7–10, 2010.
- [6] A. Gran, S. C. Lin, and I. F. Akyildiz. *Towards Wireless Infrastructure-as-a-Service (WaaS) for 5G Software-Defined Cellular Systems*. In 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), pages 1–6, May 2017.
- [7] E. Hossain and M. Hasan. *5G Cellular: Key enabling technologies and research challenges*. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 18(3):11–21, June 2015.
- [8] K. Lee and G. Choi. *Effect of CFO on UFMC System*. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 2016.
- [9] L. Or'us and C. Mateo. *Diseño e implementación de una aplicación de transmisión y recepción de señales multiportadora enfocadas a redes 4G y 5G*. 2016.
- [10] H. Zhang, H. Lv, and P. Li. *Spectral Efficiency Analysis of Filter Bank MultiCarrier (FBMC) Based 5G Networks with Estimated Channel State Information (CSI)*. In *Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective*, chapter 03. InTech, Rijeka, 2016.
- [11] Matthe, M.; Zhang, D.; Schaich, F.; Wild, T.; Ahmed, R.; Fettweis, G. *A Reduced Complexity Time-Domain Transmitter for UF-OFDM*. In *Proceedings of the 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 15–18 May 2016*; pp. 1–5.
- [12] Final 5GNOW Transceiver and Frame Structure Concept; Available online: https://is-wireless.com/wp-content/uploads/2015/11/5GNOW_Deliverables-Final-5GNOW-Transceiver-and-frame-structure-concept.pdf. April,2018
- [13] Munshi, A.; Unnikrishnan, S. *Vehicle to Vehicle Communication Using DS-CDMA Radar*. *Procedia Comput. Sci.* **2015**, 49, 235–243.
- [14] Shaojian, X.; Bing, C.; Ping, Z. *Radar-Communication Integration Based on DSSS Techniques*. In *Proceedings of the 2006 8th international Conference on Signal Processing*, Guilin, China, 16–20 November 2006; Volume 4.
- [15] Hara, S.; Prasad, R. *Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective Rayleigh fading channels*. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **1999**, 48, 1584–1595.
- [16] Napolitano, A. *Cyclostationarity: Limits and generalizations*. *Signal Process.* **2016**, 120, 323–347.
- [17] Cho, Y.S.; Kim, J.; Yang, W.Y.; Kang, C.G. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010.
- [18] Napolitano, A. *Generalizations of Cyclostationary Signal Processing: Spectral Analysis and Applications*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2012; Volume 95.

[19] Gelli, G.; Paura, L.; Verde, F. *A two-stage CMA-based receiver for blind joint equalization and multiuser detection in high data-rate DS-CDMA systems. IEEE Trans. Wirel. Commun.* **2004**, 3, 1209–1223.

[20] Braun, M. *OFDM Radar Algorithms in Mobile Communication Networks. Ph.D. Thesis*, KIT-Bibliothek, Karlsruhe, Germany, 2014.