

# دراسة ومقارنة الأشكال الموجية (OFDM و f-OFDM و FBMC) لشبكات الجيل الخامس وما بعده

محمد مختار علي الجهيمي كلية الهندسة – جامعة مصراته ، مصراته، ليبيا <a href="mailto:mohammed.aljheami@eng.misuratau.edu.ly">mohammed.aljheami@eng.misuratau.edu.ly</a>	عبداللطيف جمعة علي الصغير كلية الهندسة – جامعة مصراته ، مصراته، ليبيا <a href="mailto:t.alzaidy@eng.misuratau.edu.ly">t.alzaidy@eng.misuratau.edu.ly</a>	سالم علي سالم القوي كلية الهندسة – جامعة مصراته ، مصراته، ليبيا <a href="mailto:salem.algwi@eng.misuratau.edu.ly">salem.algwi@eng.misuratau.edu.ly</a>	محمد إمام محمد عبد الرحيم كلية الهندسة – جامعة مصراته ، مصراته، ليبيا <a href="mailto:mohamed.abdurrahim@eng.misuratau.edu.ly">mohamed.abdurrahim@eng.misuratau.edu.ly</a>
---	--	--	--

وبالتالي تأثير قناة الاتصال يخف حيث يصبح تأخير القناة مهملاً أمام طول الرمز. بفضل التعقيد المنخفض لخوارزمية تحويل فوربييه السريعة واستخدام البادئة الدوارة (CP) بين الرموز أصبح التعديل Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) هو التعديل المسيطر في نظم الاتصالات السلكية واللاسلكية وتم استخدامه في كثير من التطبيقات منها LTE، WiMAX، DVB-T، Wi-Fi، DSL، وأخيراً في نظام LTE-Advanced [1].

وبالرغم من كل المزايا التي قدمها نظام OFDM ومئاته الإرسال في القنوات ذات الانتقائية في التردد إلا أنه يعاني من بعض السلبيات، حيث يقلل استخدام البادئة الدوارة من الفعالية الطيفية لنظام الإرسال، كما تكون الفصوص الجانبية للنبضة المربعة في المجال الترددي مرتفعة، وهذا بدوره يسبب تسريب إشارات OFDM خارج الحزمة الترددية المخصصة للنظام وبالتالي التداخل مع النظم المجاورة. إن خاصية الترشيح عالية الانتقائية غير متوفرة في نظام OFDM، وهذا بدوره يجد من استخدامه في نظم الراديو المُعرّف التي تسمح للمستخدم الثانوي بالإرسال ضمن حزم ترددية غير مشغولة من قبل المستخدم الأولي [1].

كان هناك العديد من المحاولات لتجاوز هذه العيوب ولعل أبرزها نظام filtered OFDM (f-OFDM) والذي يستخدم نوافذ زمنية مثل half-sine، Hanning وذلك لجعل الانتقال إلى حالة الصفر في النبضة المربعة أقل حدة، والتي بدورها تقلل من القدرة المتسربة لكنها أيضاً تزيد من زمن رمز OFDM وبالتالي تزيد من الفقد في الفعالية الطيفية. من جهة أخرى بدأ الباحثون باستكشاف تقنيات تعديل متعددة الحوامل أكثر تطوراً لاستخدامها في نظام الجيل الخامس، فكان نظام بنك مرشحات الحوامل المتعددة Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) هو المرشح الأقوى والبديل المناسب لنظام CP-OFDM والتقنية الواعدة في نظم الاتصالات الحديثة. الفكرة الأساسية في نظام FBMC هي استخدام مرشحات عالية الانتقائية الترددية غير النبضة

المخلص / سيتعين على 5G التعامل مع درجة عالية من عدم التجانس من حيث الخدمات والمتطلبات. حيث يُعد الاستخدام المرن والفعال لجميع الأطياف غير المتجاورة المتاحة لسيناريوهات نشر الشبكات المختلفة أحد التحديات التي تواجه الجيل الخامس في المستقبل. لتحقيق أقصى قدر من كفاءة الطيف، ستكون هناك حاجة أيضاً إلى تقنية واجهة هوائية مرنة لشبكات الأجيال التالية قادرة على رسم خرائط للخدمات المختلفة بأفضل التوليفات المناسبة للترددات والموارد الراديوية. في هذا العمل، تم اقتراح مقارنة عادلة في إطار عمل مشترك للعديد من المرشحات الموجية (OFDM و f-OFDM و FBMC). ولهذا الغرض تم استخدام أداة محاكاة الشبكات اللاسلكية والخلوية القائمة على برنامج MATLAB واستخدام أساليب البرمجة الشبكية للمقارنة والمحاكاة للأشكال الموجية عند تعدد الوصلات في نظام الراديو الجديد (الجيل الخامس) من أنظمة الهاتف المحمول. يتم تقييم الأداء للأشكال الموجية بشكل عام من حيث معدل الخطأ في البت (BER)، والكثافة الطيفية للقدرة (PSD). من ثم تم استخدام سيناريو تعدد الوصلات في حالة الوصلة الصاعدة (Uplink) للمقارنة بين هذه الأشكال من حيث معدل الخطأ في البت (BER) وإجمالي الإنتاجية (Sum Throughput)، ونسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (PAPR). تم تسليط الضوء بوضوح على فوائد هذه الأشكال الموجية الجديدة لحالات استخدام 5G المتوقعة. كما تم التأكيد على أن بعض المفاهيم لا تزال بحاجة إلى التحسين لتحقيق النطاق الكامل للفوائد المتوقعة من الجيل الخامس وما بعده.

الكلمات المفتاحية / الجيل الخامس (5G)، المرشحات الموجية (OFDM و f-OFDM و FBMC)، الكثافة الطيفية للقدرة، الإنتاجية، الوصلة الصاعدة.

## 1. المقدمة.

مع التطور المتزايد للأجهزة الذكية والهواتف المحمولة في السنوات الأخيرة، ازداد الطلب على معدلات نقل عالية لنظم الاتصالات اللاسلكية ولاسيما نظم الاتصالات الخلوية. كما نعلم أنه من أجل رفع معدلات نقل المعلومات في النظم الخلوية لا بد من استخدام مصادر طيفية أكثر، والذي بدوره أدى إلى اتساع عرض حزمة الإرسال لهذه النظم [1]. جاءت تقنية الحوامل، والتي فيها يتم تقسيم عرض الحزمة إلى مجموعة من الحزم الجزئية الضيقة حلاً لمشكلة الانتقائية الترددية التي يعاني منها التعديل بحامل وحيد. وكما نعلم تضيق عرض الحزمة يوافق زيادة طول الرمز،

استلمت الورقة بالكامل في 02 يناير 2024 وروجعت في 12 مارس 2024 وقبلت للنشر في 15 يوليو 2024 ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 29 سبتمبر 2024.

شكل الموجة في تقنيات الهاتف المحمول (2G / 3G / 4G) تلبية متطلبات الأجيال الجديدة من الشبكات اللاسلكية. للتغلب على المشاكل الناشئة عن المتطلبات الجديدة، إما أن يكون المطلوب تصميم تقنيات جديدة لشكل الموجة، أو اقتراح إصدارات محسنة من شكل الموجة المستخدم في (4G)، أي تعدد إرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM).

يجب أن يفي شكل الموجة المثالي بالمتطلبات التالية:

- (1) استهلاك منخفض للطاقة.
- (2) معدلات بيانات عالية.
- (3) كفاءة في استخدام الطيف.
- (4) زمن انتقال منخفض.
- (5) سهولة التنفيذ.
- (6) انخفاض الانبعاثات خارج النطاق.

بالإضافة إلى ذلك يجب أن يكون شكل الموجة المصمم جيداً قوياً مقاوماً للسمات التخريبية لقنوات الاتصال، وأن يكون قادراً على استخراج هذه التأثيرات بسهولة من جانب المستقبل. وكذلك يجب أن يكون متوافقاً مع أنظمة متعددة المدخلات والمخرجات (MIMO)، ولا يمكن العثور على شكل موجة يلبي جميع المتطلبات بشكل مثالي. ومع ذلك فإن المطلوب إجراء تصميم لشكل موجة دقيق يلبي معظم هذه الميزات بالطرق المثلى.

حتى الآن، تم اقتراح العديد من أشكال الموجة المرشحة لتحقيق متطلبات نظام اتصالات 5G. وتعد الأشكال الموجية متعددة الموجات المستندة إلى عمليات الترشيح من أشكال الموجات المرشحة الجيدة للتغلب على مشاكل البث خارج النطاق. ومن بين هذه الأشكال الموجية المرشحة، بنك المرشحات متعدد الحوامل (FBMC)، ومرشح متعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (F-OFDM) وتعدد الإرسال بتقسيم التردد المعجم (GFDM) والحوامل المتعدد المرشح الشامل (UFMC). ومن هنا تأتي أهمية دراستنا في هذه الورقة للمقارنة بين تقنيات التعديل متعددة الحوامل (OFDM) و (F-OFDM) و (FBMC) في نموذج (5G)، وتقييم الأداء لهذه الأشكال الموجية من ناحية (BER) و (PSD) و (Sum Throughput) و (PAPR). بخلاف ذلك، يمكن أن تظهر من الدراسة أي تقنية ستكون أفضل من ناحية البارامترات الأربعة المحددة.

### 1.1 OFDM كشكل موجة 5G-NR

باتباع نفس الإجراء الذي تم مع تطوير LTE، تم اختيار تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) باعتباره الشكل الموجي لعمليات إرسال 5G-NR. يتم اختيار تعدد الإرسال بتقسيم تعامدي للتردد (OFDM) في المقام الأول بسبب كفاءته في الطيف، والمناعة النسبية للخبو الانتقائي، ومعادلة القناة البسيطة. بالإضافة إلى ذلك، من السهل أيضاً استغلال مجالات الوقت والتردد. يسمح OFDM بتقسيم عرض النطاق الترددي المتاح إلى قنوات فرعية متوازية تسمى الموجات الحاملة الفرعية. تتضمن بعض مزايا استخدام OFDM ما يلي:

المربعة ذات طول كافي ومصممة بشكل مثالي في المجالين الزمني والتردد بحيث تكون فيها الفصوص الجانبية منخفضة بشكل كبير عما هو الحال في النبضة المربعة المستخدمة في نظام CP-OFDM [1].

في [3]، قدم الفريق الباحث في هذه الورقة مقارنة شاملة بين المتنافسين الرئيسيين لشكل الموجة الجديد. حيث قامو بمقارنة FBMC و GFDM و UFMC و RB-F-OFDM، وتمت مقارنة أدائهم بـ OFDM المستخدم في LTE. من خلال تقديم أفضل كفاءة في استخدام الطاقة بعد OFDM وأفضل احتواء للتردد الزمني بين جميع المتنافسين، يبدو GFDM هو الشكل الموجي الأكثر ملاءمة لتطبيق في G5، يليه FBMC [3].

توصل فريق البحث في [4]، أن أداء FBMC أفضل من f-OFDM من حيث BER و FER. وذلك لأن FBMC هو الإصدار "المتطور" من OFDM والذي أدى إلى تحسين متانة وظائف القناة المتغيرة بمرور الوقت وإزاحات تردد الموجة الحاملة. ومع ذلك، لا يزال FBMC يواجه المشاكل في PAPR. يؤدي ارتفاع PAPR إلى تعطيل FBMC للعمل في أفضل حالاته. بخلاف ذلك، فإن النتائج التي تم الحصول عليها قد تلعب دوراً في المحاكاة والسيناريو المستخدم لمقارنة هذين الشكلين الموجيين. وذلك لأن أداء كلا الشكلين الموجيين يتأثر بعدة معلمات أخرى مثل عرض النطاق الترددي والطاقة الطرفية وما إلى ذلك [4].

إن الهدف من هذه الورقة هو مقارنة تقنيات التعديل متعدد الموجة الحاملة، وهي OFDM و f-OFDM و FBMC في نموذج 5G، وكيف يمكن أن تؤثر على معدل الخطأ في البث، وكثافة طيف القدرة، وإجمالي الإنتاجية، ونسبة طاقة الذروة إلى المتوسط بالنسبة للنظام. أيضاً، يمكن أن يظهر من البحث أي من تقنيات التعديل متعدد الموجات الحاملة هي التي ستكون أفضل، وأي تقنية ستتناسب تقنيات 5G وما بعده.

تتألف الأجزاء القادمة من هذه الورقة من الجانب النظري عن تقنيات الحوامل المتعددة المرشح استخدامها في الجيل الخامس 5G وبعض التحليلات الرياضية المتعلقة بها. يلي ذلك الجزء العملي للمشروع والتعريف بالمحاكي المستخدم. ثم يأتي بعد ذلك مناقشة للنتائج المتحصل عليها من المحاكاة. وأخيراً تأتي الاستنتاجات والتوصيات.

## 2. الجانب النظري

اجتذبت تقنية الاتصالات المتنقلة (5G) اهتماماً بحثياً عالمياً في السنوات الأخيرة مع الرؤية المتمثلة في الحصول على 100 مليار اتصال، وزمن وصول ما يقارب لصفير وهو زمن انتقال منخفض، وتعزيز الإنتاجية 1000 مرة. لنظام 5G موثوقية وإنتاجية عالية، ويزيد من قابلية التوسع والكفاءة في استخدام الطاقة. ولتحقيق هذه المتطلبات للجيل الخامس وما بعده يُحتاج إلى اختيار شكل موجي يلبي هذه المتطلبات ويكون كشكل موجي معتمد لنظام (5G).

من الطبيعي أن تتغير معايير التصميم فيما يتعلق بتقدم التقنيات في الجيل الخامس (5G) عن سابقتها من الأجيال، لذلك لا يمكن لتقنيات

بتحويل الإشارة من المجال الترددي إلى المجال الزمني. بعد هذه العملية، تتم إضافة البادئة الدوارة لتقليل تأثير التداخل بين الرموز، ثم بعد ذلك يتم تحويل إشارات المجال الزمني إلى تدفقات متسلسلة بواسطة محول التوازي إلى التوالي. ثم بعد ذلك، يتم تطبيق إشارات النطاق الأساسي على التردد اللاسلكي. أخيراً، يتم تضخيم إشارة التردد اللاسلكي بواسطة مضخم عالي القدرة [7].

يتكون مستقبل نظام OFDM من بنية عكسية مقارنة بجهاز الإرسال. في مستقبل OFDM، يُستخدم المسوي لتعويض تأثير تعدد المسارات. يمكن استخدام مسو بسيط بسبب وجود البادئة الدوارة، حيث تعتبر ميزة لنظام OFDM. ومع ذلك، فإن لكل موجة حاملة فرعية لنظام OFDM فصوص جانبية عالية القدرة، لذلك يزداد انبعاث القدرة خارج النطاق (OOB) Out Of Band، مما يجعل نطاق الحماية أوسع بين قنوات المعلومات، ونتيجة لذلك تتخفف سعة القناة في النظام، حيث يجب التغلب على هذه العيوب من أجل تقنيات الاتصالات الحديثة [7].

## 2.2. مرشح متعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد Filtered OFDM

مرشح متعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (f-OFDM) هو شكل من أشكال الموجة للجيل الخامس (5G)، والذي من الممكن تنفيذه واستخدامه بشكل عملي ومميز من حيث الأداء العام، وله العديد من الميزات مثل دعم الإرسال المتعامد وتقنيات تقليل (PAPR) وتحسين الكفاءة الطيفية وتعقيده الحسابي البسيط وزيادة على ذلك التحسين في شكل النبضة وذلك بتقليل التسرب خارج النطاق، كما أنه يعمل بشكل جيد مع تقنيات الإرسال متعدد الهوائيات (MIMO) بشكل مشابه لنظام (OFDM)، ومع ذلك لا تزال القيمة العالية (PAPR) هي المشكلة الرئيسية لمرشح شكل الموجة (f-OFDM) لأن هذا النظام يدعم الإرسال المتعامد مما يؤدي إلى انخفاض في متوسط القدرة للإشارة وبالتالي تدهور كفاءة المضخمات عالية القدرة. في جهاز الإرسال. تم إجراء العديد من الدراسات لتحسين الكفاءة الطيفية لـ (OFDM) بشكل كبير وبالتالي تلبية متطلبات تطبيقات الجيل الخامس، ومن خلال الدراسات الميدانية لتقنية الجيل الخامس وجد أن f-OFDM يحقق إطار الشكل الموجي أفضل في الكفاءة الطيفية بالمقارنة مع-LTE (OFDM)، وذلك لأن f-OFDM قادر على التغلب على عيوب (OFDM) مع الاحتفاظ بمميزاته [8].

## 1.2.2. هيكلية جهاز الإرسال والاستقبال (f-OFDM):

كما ذكرنا سابقاً، إن أنظمة (OFDM) المختلفة (ربما أشكال موجية أخرى) تتباعد فيها الحوامل الفرعية بشكل مختلف مع طول البادئة الدوارة، حيث يجب تضمين مدة الفاصل الزمني للإرسال بين النطاقات الفرعية بشكل عام بحيث لا تتداخل النطاقات الفرعية مع بعضها البعض. و يكون نطاق الحماية بين هذه النطاقات الفرعية صغيراً حيث يكون أصغر بكثير من نطاق الحراسة المستخدم في-LTE 4G لاستيعاب التداخل والسماح بالانتقال غير المتزامن [9].

✓ لا حاجة إلى معادلة انتشار التأخير. نتيجة لذلك، لا تواجه رموز OFDM المستلمة أي تداخل للرموز المتجاورة.

✓ تعديل قوي للخبو الانتقائي. حيث تنقسم القناة إلى إشارات متعامدة وبالتالي يتم تحويل الخبو الانتقائي إلى خبو مسطح لحامل فرعي واحد.

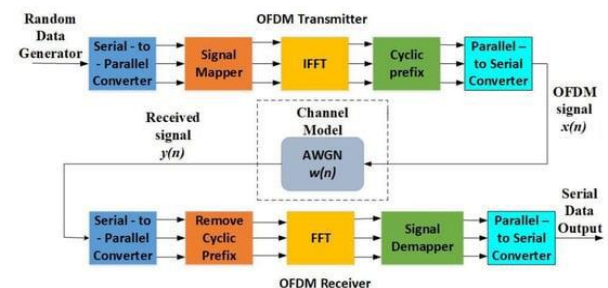
✓ كفاءة طيفية عالية. تكون الموجات الحاملة الفرعية قريبة من بعضها البعض وهو أمر جيد لتحقيق الكفاءة الطيفية.

لكن OFDM له أيضاً بعض العيوب، مثل نسبة الذروة إلى متوسط القدرة (PAPR)، والتي تُعرّف على أنها النسبة بين قدرة الذروة ومتوسط قدرة الإشارة، والتي يتم التعبير عنها عادةً بالديسيبل. كنتيجة لارتفاع PAPR، سيكون هناك نطاق ديناميكي عالٍ، وبالتالي ستكون هناك حاجة إلى تضخيم خطي عالي للقدرة. عادةً ما تكون المضخمات ذات النطاق الديناميكي العالي غير فعالة في استهلاك الطاقة. هناك طريقة أخرى شائعة الاستخدام وهي تقليل PAPR باستخدام تقنيات قص الذروة. عيب آخر لـ OFDM هو أنه حساس لتخالف تردد الموجة الحاملة، التي تُنشئ ظاهرة تعرف باسم تداخل الموجة الحاملة، والتي تؤدي إلى تدهور جودة الإرسال.

تسمح الطبقة الفيزيائية المصممة في 5G-NR بتكوين OFDM للوصلة الهابطة والوصلة الصاعدة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام OFDM المشفر مسبقاً لتحويل فورييه كشكل موجة في الوصلة الصاعدة نظراً لكفاءتها في سيناريوهات الطاقة المحدودة. يمكن تقليل استهلاك الطاقة لمضخم الطاقة بمقدار ضعفين. لكن استخدام OFDM المشفر مسبقاً بواسطة تحويل فورييه له أيضاً بعض العيوب. لإعطاء مثال، يصبح تعدد الإرسال المكاني أكثر تعقيداً، وأيضاً باستخدام هذا المخطط تُفقد إمكانية تخصيص الموارد في ترددات غير متجاورة، لذلك فهو يعني ضمناً قيود الجدولة فضلاً عن فقدان تنوع التردد [5].

## 1.1.2. المخطط الصندوقي لنظام OFDM:

يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لتعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM):



الشكل (1) المخطط الصندوقي لتعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد (OFDM) [6].

في عملية الإرسال لنظام OFDM، يتم تحويل رموز البيانات إلى تدفقات متوازية من تدفقات متسلسلة بواسطة المحول من توالي إلى توازي. حيث يتم تعيين الرموز المتغيرة على كل حاملة فرعية من خلال عملية معكوس تحويل فورييه السريع. تقوم عملية المعكوس

يمكن التفريق بين نوعين رئيسيين من FBMC، أحدهما مبني على إرسال إشارات معدلة تعديل سعوي تربيقي "Quadrature QAM Amplitude Modulation" عقديّة، ويشار إليه أيضاً بالنعجمات المتعددة المرشحة "Filtered Multi Tone" FMT ، والآخر مبني على أساس رموز QAM مزاحة بقيم حقيقية "Offset QAM" ، يضمن هذا الأخير التعامد في المجال الحقيقي لزيادة الكفاءة الطيفية [7].

يعمل النوع الأول FMT حالياً في معايير مثل خدمة توزيع معدات الاتصالات "Telecommunication Equipment Distribution Service" TEDS ، ويحقق التعامد بين الحوامل الفرعية عن طريق التقليل فيزيائياً من تداخل المجالات الترددية لها، مما يقلل من الفعالية الطيفية "Spectral Efficiency" SE في FBMC/OQAM .CP-OFDM على العكس، قادر على تحقيق الحد الأقصى من SE بفرض التعامد في المجال الحقيقي فقط. بالنظر إلى SE المثلّي من FBMC/OQAM ، فإن هذا البديل يعتبر عالمياً كتعديل FBMC الأساسي.

توجد طرق بديلة متعددة لتطبيق FBMC/OQAM بطريقة فعّالة حسابياً لكن الأهم في سلسلة الشبكات متعددة الأطوار

"Poly Phase Networks" PPN وتطبيقات الانتشار الترددي "Frequency Spreading" FS ، بنية PPN موضحة في الشكل (4) [4] ، حيث تغذي رموز OQAM عملية FFT بحجم NFFT ثم إلى PPN. ويقوم جهاز الاستقبال بتطبيق ميزة الترشيح المتطابق قبل إجراء التحويل FFT لحجم NFFT ويتم إجراء معادلة متعددة على أساس كل حامل بمفرده [5].

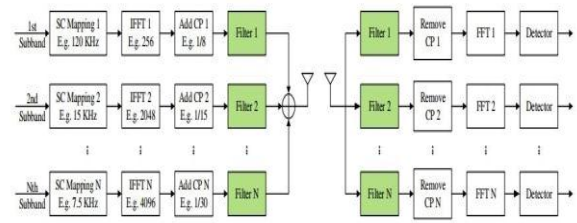
الاختلاف الأساسي بين FBMC و OFDM هو أن الجوانب التي تسبب التداخل وانتشار الأخطاء يتم ترشيحها في تقنية FBMC وبالتالي يتم الحصول على إشارة محدودة الحزمة تسبب زيادة الفعالية الطيفية من دون استخدام البادئة الدورية.

بالرغم من أن FBMC تُسبب زيادة في التعقيد، لكنها تُؤمن فصل أفضل للحوامل الفرعية، و إن قدرة هذه التقنية على تحقيق تزامن الشبكة تجعلها تقنية مهمة لأنظمة الجيل الخامس. ومع استخدام تحويلات فورييه وفورييه العكسي فإن مشاكل تزامن الوصلتين الصاعدة والهابطة يتم القضاء عليها [5].

أهم النقاط حول تقنية FBMC هي أنها تتوافق مع تقنية MIMO ، حيث أن الأنظمة التي تعتمد على كلا التقنيتين معا تمتلك عدة ميزات منها [11]:

- عدد أقل من الحوامل الفرعية.
- تأخير وتعقيد أقل.
- فعالية أعلى لعرض الحزمة، ونسبة PARP أقل.

يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي لمرسال ومستقبل PPN-FBMC.

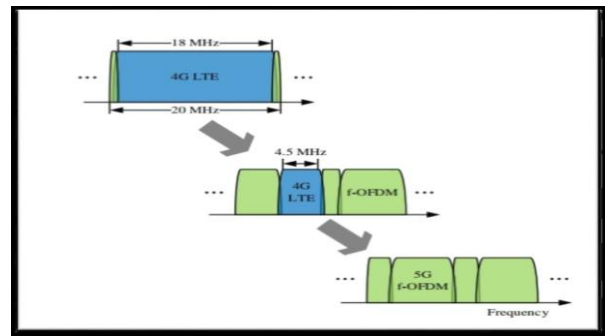


الشكل (2): بنية جهاز الإرسال والاستقبال لـ f-OFDM [9]

يوضح الشكل (2) عملية التشكيل f-OFDM لنظام (5G)، بما في ذلك تقسيم عرض النطاق الفرعي، وتعيين الناقل الفرعي (IFFT)، إضافة (CP) والمرشحات وما إلى ذلك. ويظهر بالمقارنة مع الشكل (OFDM) يقسم (f-OFDM) عرض النطاق الترددي بأكمله إلى عدة نطاقات فرعية مستقلة، ويمكن تعيين كل معلمة عرض النطاق الفرعي وفقاً لخصائص القناة، ويقوم بإجراء التعديل (OFDM) وأخيراً يضيف معالجة مرشح في النهاية، بالإضافة إلى مزايا (OFDM) التقليدية، يتمتع (f-OFDM) بأداء جيد في تسرب طيف الإشارة خارج النطاق واستخدام الطيف الأمثل [9].

### 2.2.2. مسار التطور في f-OFDM :

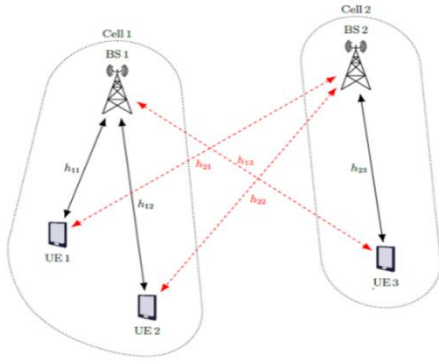
مع أشكال الموجة المستقلة المدمجة في كل نطاق فرعي f-OFDM، من المتوقع أن يقدم التطور من (OFDM) إلى (f-OFDM) خطة للتطور من (OFDM) للجيل الرابع إلى (f-OFDM) في الجيل الخامس. كمرحلة أولية سيتم توفير 10% من نطاق الحماية لشبكات 4G للبيانات في نظام (f-OFDM)، وليس هناك حاجة لتغيير أجهزة الهواتف المحمولة القديمة للجيل الرابع، أما على المدى الطويل فإن عرض النطاق الترددي المخصص للجيل الرابع سيتم تخفيضه ومن المرجح أن لا يستمر، في حين أن النطاق الترددي المتبقي والأطيف الجديدة سوف يتم تخصيصها لشبكة 5G للحصول على طيف أكثر مرونة وكفاءة باستخدام (f-OFDM)، وبهذه الطريقة يوفر f-OFDM التوافق بين الإصدارات السابقة والحالية [9].



الشكل (3): خطة التطور من (OFDM) للجيل الرابع إلى (f-OFDM) في الجيل الخامس [9].

### 3.2. بنك مرشحات الحوامل المتعددة Filter Bank Multi Carrier (FBMC)

تتكون الصيغة الموجية FBMC من مجموعة من البيانات المتوازية التي تنتقل من خلال مجموعة من المرشحات المعدلة حيث يمكن اختيار مرشح النموذج الأولي الذي يحدده العامل المتداخل K بحيث يكون هناك تسرب منخفض في القناة المجاورة [7].

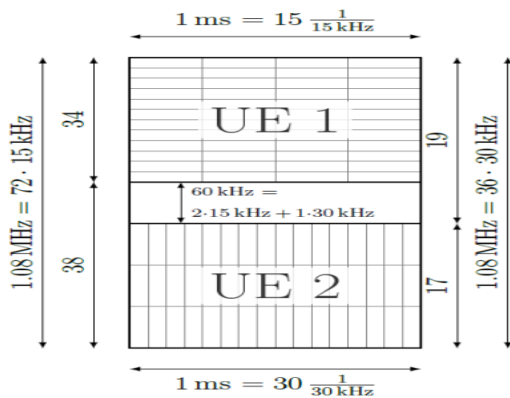


الشكل (5): الهيكل النموذجي للشبكة الخلوية [14].

هنا تفترض المحاكاة خليتين، لكل منهما محطة أساسية واحدة. يتم توصيل المُستخدمين الأول والثاني بالمحطة الأساسية الأولى وبالتالي ينتمون إلى الخلية رقم 1، بينما يتم توصيل المُستخدم الثالث بالمحطة الأساسية الثانية وينتمي إلى الخلية الثانية.

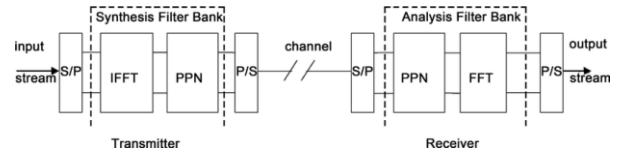
في هذه الورقة، تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام نموذج التداخل بين الخلايا عند تعدد الوصلات (MultiLink) في 5G. في هذا السيناريو، سيتم دراسة تأثير التداخل بين المستخدمين من ناحية الوصلة المساعدة فقط. بفرض أن اثنين من المستخدمين يستخدمان تباعد مختلف بين الموجات الحاملة الفرعية، وبالتالي لا يكونان متعامدان مع بعضهما البعض.

يتم جدولة المُستخدمين بجوار بعضهما البعض في التردد كما هو مبين في الشكل (6) بحيث يواجهان تداخلاً بسبب البث خارج النطاق (OOB) العالي لتعدد الإرسال بتقسيم تعامدي للتردد (OFDM). قد يكون هناك طريقة ترقيم وشكل موجة وتشفير قناة واحدة فقط لكل خلية. لذلك، يكون إعداد الهيكل كما يلي: هناك محطتان أساسيتان ومستخدمان إجمالاً، مستخدم واحد لكل خلية. يتم تعيين المستخدم الأول إلى المحطة الأولى وتعيين المستخدم الثاني إلى المحطة الثانية. ومع ذلك، لوضع هذين المستخدمين فعلياً داخل خلية واحدة، فإننا نستغل وصلات التداخل ونضبط التوهين بين الخلايا على نفس القيمة، مثل فقد مسار القناة. من خلال هذا، تصبح قنوات التداخل والقنوات المرغوبة غير قابلة للتمييز. يتيح ذلك التحقيق في تأثير التداخل بين المستخدمين.



الشكل (6): تخصيص موارد المستخدم داخل الخلية [14].

تم ضبط الإعدادات على أن يتم إنشاء وصلات التداخل من UE2 إلى BS1 ومن UE1 إلى BS2 تلقائياً. تم مضاعفة قدرة إرسال



الشكل (4): مرسل ومستقبل PPN-FBMC [12].

#### 4.2. الأعداد في 5G

في سياق 5G-NR، يرتبط مصطلح الأعداد (Numerology) بمعلمات التصميم التي يمكن تعريفها لشكل موجة معين. في LTE، يوجد نوع واحد فقط من تباعد الموجات الحاملة الفرعية بمقدار 15 كيلوهرتز. يختلف هذا تماماً عن 5G نظراً لأن أحد التحديات الرئيسية هو دعم سيناريوهات حالة الاستخدام المختلفة وبالتالي لا يمكن أن يكون هناك (Numerology) واحدة فقط. هناك حاجة إلى (Numerology) متدرجة. نتيجة لذلك، يتم تعريف واحدة جديدة تماماً وهي مبينة في الجدول (1) [13].

$\mu$	$\Delta f$ [kHz]	$T_u$ [ $\mu$ s]	TCP [ $\mu$ s] for Symbols 1 to 6
0	15	66.7	4.7
1	30	33.3	2.3
2	60	16.7	1.2
3	120	8.33	0.59
4	240	4.17	0.29

الجدول (1): الأعداد في 5G-NR [13]

### 3. الجانب العملي

من خلال أداة محاكاة نظام 5G المُستخدمة، يتم تمكين تقييم أداء مخططات الوصول إلى الطبقة الفيزيائية المستقبلية. وبهذا يهدف إلى الحفاظ على مرونة عالية لسيناريوهات المحاكاة وإعدادات المعاملات. فهذه الأداة لا تدعم أشكال الموجات ورموز القنوات المختلفة بشكل عام فحسب، بل تسمح أيضاً لهذه المعاملات بأن تكون مختلفة من خلية إلى أخرى. هذا يسهل التحقيق في التوافق والتداخل بين 5G ومخططات الطبقة الفيزيائية المحتملة للأجيال التالية.

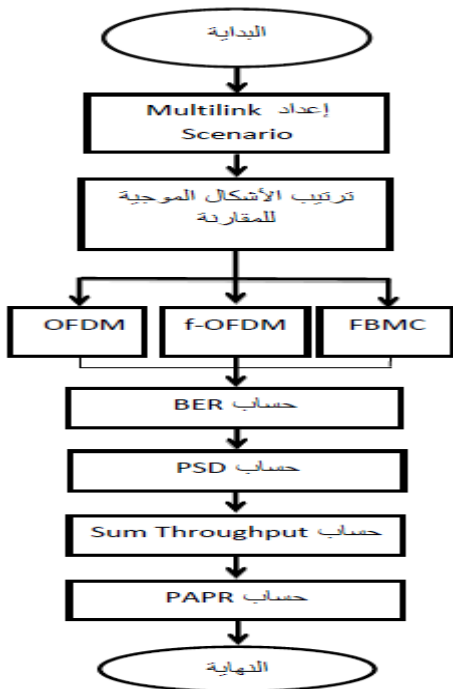
لمزيد من شرح عمليات المحاكاة ذات الأشكال الموجية المختلفة في الخلايا المختلفة، سيتم استخدام الهيكل النموذجي للشبكة الخلوية كما هو موضح في الشكل (5) [14].



من UE1 بمقدار 30dBm. ويمكن أن يتوافق هذا مع UE2 قريب و UE1 بعيد في الإرسال على الوصلة الصاعدة. شكل الموجة محدد مسبقاً لهذا السيناريو هو OFDM. وسيتم العمل على شكل الموجة FBMC و f-OFDM أيضاً. مقارنة نتائج المحاكاة لاحقاً، سيلاحظ أن ضعف أداء UE2 ناتج من شكل الموجة مع الفصوص الجانبية المتناقصة بسرعة [14].

#### 4. مناقشة النتائج

يقدم هذا الجزء سرداً للنتائج المُتحصل عليها للسيناريو المدروس وكذلك نتائج محاكاة لدراسة تغيير الخطأ في البت مع نسبة الإشارة إلى الضوضاء بين الأشكال الموجية الثلاثة. ونظراً لأن الأداة المُستخدمة تدعم العديد من أشكال الموجات المختلفة التي تحقق معدلات SNR مختلفة لإجمالي قدرة إرسال معينة. فهذه الأداة تتحرف قليلاً عن النهج الشائع في برامج المحاكاة، وبالتالي يتم تحديد SNR كدالة لشكل الموجة المطبق. بالإضافة إلى ذلك، نظراً لأنها تدعم عمليات الإرسال متعددة الوصلات، فإنها تُقدم معلومات فقدان المسار الفردية لهذه الوصلات، لتمكين التحكم في SIR للاتصالات الفردية. وكذلك يتم وضع فقد المسار كعامل إدخال في عملية المحاكاة. يوضح الشكل (7) خطوات المعالجة والمحاكاة الأساسية التي تطبقها أداة المحاكاة.



الشكل (7): خطوات المعالجة والمحاكاة الأساسية

أولاً: نتائج سيناريو تعدد الوصلات:

تم استخدام سيناريو تعدد الوصلات للمقارنة بين الأشكال الموجية الثلاثة من ناحية معدل الخطأ في البت (BER) Bit Error Rate، وإجمالي الإنتاجية (Sum Throughput)، ونسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (Peak to Average Power Ratio (PAPR)).

للحصول على تداخل بين المستخدمين بقوى مختلفة. بينما يتم استخدام تباعد الموجة الحاملة الفرعية بمقدار 15 kHz في الخلية الأولى، يتم استخدام 30kHz في الخلية الثانية. العدد الإجمالي للحاملات الفرعية 72 و 36، وقد تم اختياره بحيث يكون إجمالي عرض النطاق الترددي المستخدم متساوياً في كلتا الخليتين. أي أن  $15 \text{ kHz} \times 36 = 30 \text{ kHz} \times 72$ . بينما تقوم أداة المحاكاة بالحسابات الرقمية على أساس الإطار، يجب أن تتطابق مدة الإطارات لكلا الخليتين.

لذلك، فإنه يتم اختيار عدد الرموز بحيث يكون لكلا الإطارين نفس المدة، بمعنى آخر

$$1 \text{ ms} = 15 \frac{1}{15 \text{ kHz}} = 30 \frac{1}{30 \text{ kHz}}$$

كما يتم اختيار مدة الحماية (طول CP) وفقاً لذلك. في نظام يشبه LTE، يتم التخلي عن واحد من أصل 15 رمزاً على 14 رمزاً متبقية لمدة CP تبلغ:

$$\frac{1}{15 \text{ kHz} \cdot 14} = 4.76 \mu\text{s}$$

من أجل مدة الإطار المطابقة، يتم تقاسم فترتي رمز بين 28 رمزاً متبقية لمدة CP تبلغ:

$$\frac{2}{30 \text{ kHz} \cdot 28} = 2.38 \mu\text{s}$$

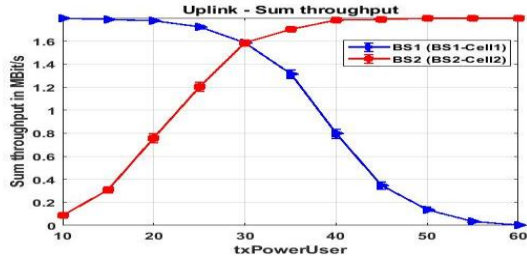
من الواضح أن العامل 2 يظهر أيضاً بين فترتي CP للخلية الأولى والخلية الثانية.

لإجراء مقارنة عادلة، يكون لكلا المستخدمين نفس العدد من إجمالي عناصر الموارد المخصصة. يتم استخدام نطاق حماية في مجال التردد بين المستخدمين عن طريق الجدولة. يتم تقسيم نطاق الحماية هذا بين المستخدمين بحيث يفقد كلاهما نفس العدد من عناصر الموارد. وهذا يعني أن UE1 يفقد موجتين فرعيتين إلى نطاق الحماية بينما يفقد UE2 موجة حاملة فرعية واحدة مقارنة بنصف النطاق الترددي الإجمالي.

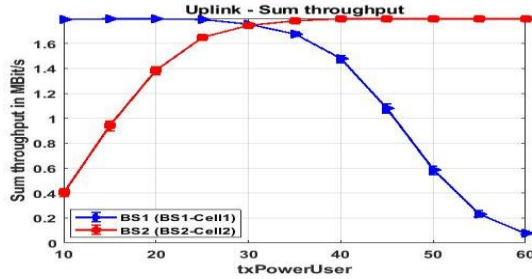
الجدول (3): نظرة عامة على معلمات المحاكاة

PARAMETER	VALUE		
WAVEFORM	OFDM	f-OFDM	FBMC
FILTER TYPE/LENGTH	-	7.14μs	PHYDAS-OQAM
CP length	4.76 μs	4.76 μs	-
Subcarrier spacing	User 1: 15kHz, User 2: 30kHz		
Guard band	2x15kHz + 1x30 kHz = 60kHz		
Bandwidth per user	x 15kHz = 17 x 30 kHz = 0.51 34MHz		
Modulation / Coding	QAM/LDPC, r = 0.65 ) 64(CQI12		
Channel mode	Block fading pedestrian A		

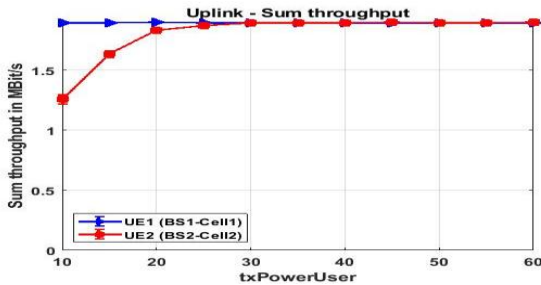
وستظهر آثار التداخل بين المستخدمين بوضوح في نتائج المحاكاة. وبينما يتم مضاعفة قدرة إرسال UE2 حتى قيم عالية جداً قد تبلغ 60dBm، يجب رؤية هذه القدرة بالنسبة لقدرة إرسال UE1. نظراً لأن قدرة إرسال UE1 تبلغ 30dBm، فإن قدرة إرسال UE2 أقوى



الشكل (9-أ): إجمالي الإنتاجية للوصلة المساعدة باستخدام OFDM.



الشكل (9-ب): إجمالي الإنتاجية للوصلة المساعدة باستخدام f-OFDM.

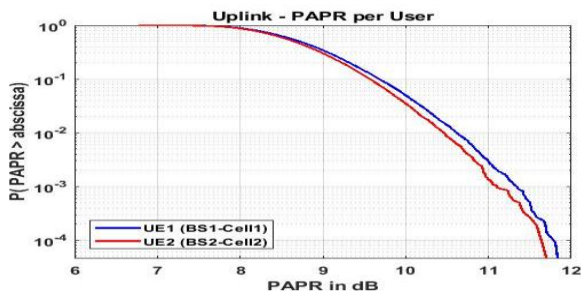


الشكل (9-ج): إجمالي الإنتاجية للوصلة المساعدة باستخدام FBMC.

من الشكل (9-ج) نلاحظ الحصول على نتائج أفضل من المُتحصل عليها في الشكلين (9-أ) و(9-ب)، حيث يتبين لنا أنه عند استخدام شكل الموجة OFDM و f-OFDM انخفاض إجمالي الإنتاجية Sum Throughput للمحطة القاعدية الأولى وازدياد إجمالي الإنتاجية للمحطة القاعدية الثانية بسبب تأثير التداخل الناتج عن المستخدم الثاني أما عند استخدام شكل الموجة FBMC نلاحظ تحسن في إجمالي الإنتاجية للمحطة القاعدية الأولى والثانية، حيث يظهر انخفاض تأثير التداخل بشكل كبير.

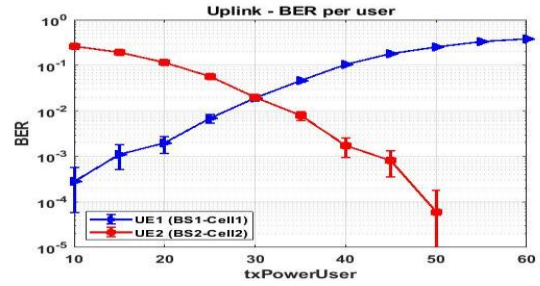
### 3.4. نسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (PAPR):

الآن، سيتم مقارنة نسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (PAPR) بين الأشكال الموجية الثلاثة في الوصلة المساعدة كما هو موضح في الأشكال (10-أ) و(10-ب) و(10-ج):

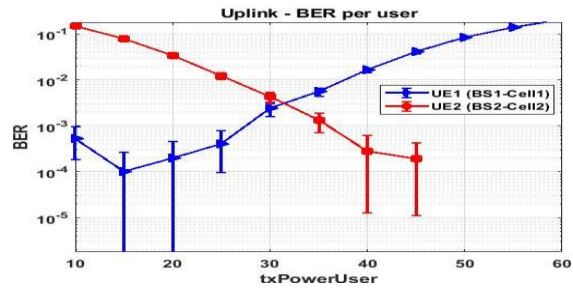


### 1.4. معدل الخطأ في البت (BER):

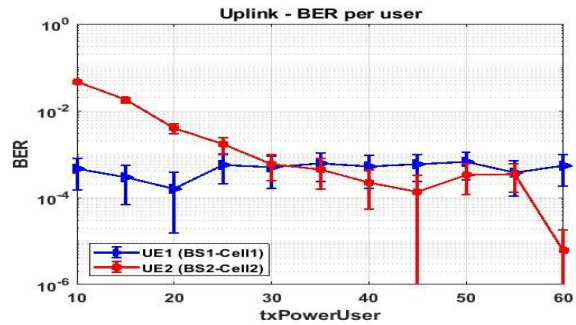
نبدأ بمقارنة معدل الخطأ في البت (BER) مع قدرة إرسال المستخدم في الوصلة المساعدة كما موضح في الأشكال (8-أ) و(8-ب) و(8-ج):



الشكل (8-أ): معدل الخطأ في البت للوصلة المساعدة باستخدام OFDM.



الشكل (8-ب): معدل الخطأ في البت للوصلة المساعدة باستخدام f-OFDM.



الشكل (8-ج): معدل الخطأ في البت للوصلة المساعدة باستخدام FBMC.

من الشكل (8-ج) نلاحظ الحصول على نتائج أفضل من المُتحصل عليها في الشكلين (8-أ) و(8-ب)، حيث يتبين لنا أن معدل الخطأ في البت للمستخدم الأساسي أكبر في OFDM و f-OFDM منه في FBMC بسبب تأثير التداخل الناتج عن المستخدم الثانوي، حيث أنه في FBMC نلاحظ تحسناً لمعدل الخطأ في البت للمستخدم الأساسي وانخفاض تأثير التداخل بشكل كبير.

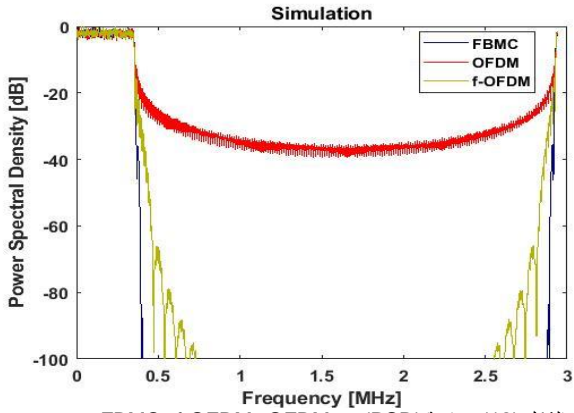
### 2.4. إجمالي الإنتاجية (SumThroughput):

يتم مقارنة إجمالي الإنتاجية مع قدرة إرسال المستخدم في الوصلة المساعدة كما هو موضح في الأشكال (9-أ) و(9-ب) و(9-ج):

أيضاً أنه عند قيم SNR أقل من 30dB فإن جميع الأشكال الموجية تعطي تقريباً نفس الأداء.

#### 5.4. كثافة طيف القدرة (PSD) Power Spectral Density:

تمت المقارنة بين الأشكال الموجية الثلاث من ناحية كثافة طيف القدرة كما هو موضح بالشكل (12):



الشكل (12): مقارنة (PSD) بين OFDM و f-OFDM و FBMC.

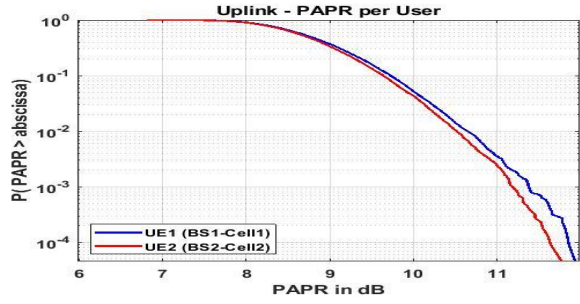
يمكننا من الشكل (12) ملاحظة أن FBMC لديه أداء طيفي أفضل بكثير مقارنة بـ OFDM و f-OFDM. كما أن انبعاث OOB من f-OFDM سينخفض بشكل كبير بعد عدد قليل من الفصوص الجانبية، أما OFDM فكان لديه أسوأ أداء من ناحية كثافة طيف القدرة.

#### 5. الخلاصة

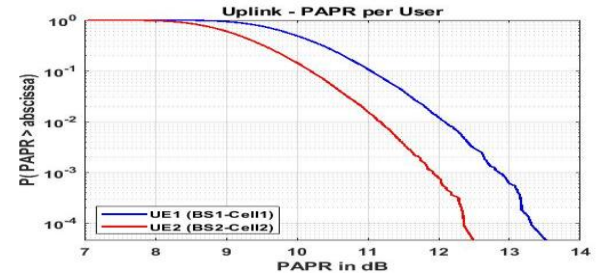
في هذه الورقة، تم دراسة ومقارنة أداء الأشكال الموجية OFDM و f-OFDM و FBMC المستخدمة في الجيل الخامس 5G، وكانت المقارنة بشكل عام من حيث كثافة طيف القدرة ومعدل الخطأ في البت، وكذلك بتقييم إجمالي الإنتاجية ومعدل الخطأ في البت ونسبة طاقة الذروة إلى المتوسط لسيناريو تعدد الوصلات. ومن خلال معاينة النتائج لهذا البحث أمكن ملاحظة عدة مشاهدات تم تلخيصها في النقاط التالية:

- ✓ استخدام الشكل الموجي FBMC يقلل معدل الخطأ في البت للمستخدم الأساسي وذلك بسبب عمل المرشح على تقليل التداخل الناتج من المستخدم الثانوي، وتعود هذه الميزة التي يقدمها هذا المرشح للانبعث الأقل خارج النطاق فهو أقل بكثير مقارنة باستخدام الشكلين الموجيين f-OFDM و OFDM.
- ✓ ازدياد إجمالي الإنتاجية للشكل الموجي FBMC مقارنةً بالشكلين الموجيين f-OFDM و OFDM.
- ✓ من خلال مقارنة PAPR لكل من f-OFDM و OFDM و FBMC، تُظهر النتيجة أن كلاً من FBMC و f-OFDM واجهوا نسبة PAPR عالية مقارنة بـ OFDM الذي له أقل نسبة.
- ✓ يحتوي منحني كثافة طيف القدرة لـ OFDM على فصوص جانبية أعلى ويتسبب في تسرب خارج النطاق، ومن ثم فإن مخطط FBMC أفضل بالمقارنة مع OFDM و f-OFDM.

الشكل (10- أ): نسبة الذروة إلى المتوسط للوصلة الصاعدة باستخدام OFDM.



الشكل (10- ب): نسبة الذروة إلى المتوسط للوصلة الصاعدة باستخدام f-OFDM.



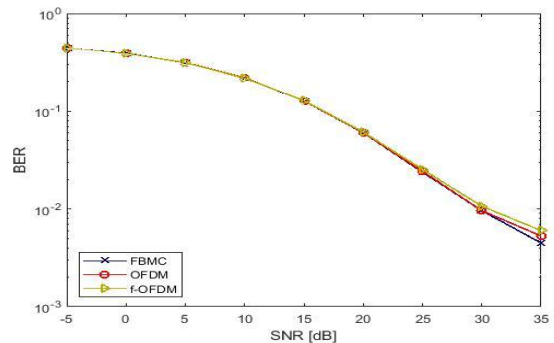
الشكل (10- ج): نسبة الذروة إلى المتوسط للوصلة الصاعدة باستخدام FBMC.

نلاحظ من الشكل (10- ج) أن نسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (PAPR) لم تتحسن عن الشكلين (10- أ) و (10- ب)، وهذا يعني أن نسبة طاقة الذروة إلى المتوسط (PAPR) مرتفعة في FBMC كما في f-OFDM و OFDM. وهذا بدوره يؤدي إلى أن هناك حاجة للمزيد من التحقيق في كيفية تقليل PAPR للحصول على أداء أفضل للشكل الموجي في 5G وما بعده.

ثانياً: تمت المقارنة بين الأشكال الموجية الثلاثة OFDM و f-OFDM و FBMC من ناحية معدل الخطأ في البت، وكثافة طيف القدرة.

#### 4.4. معدل الخطأ في البت (BER) Bit Error Rate:

يتم مقارنة معدل الخطأ في البت مع قدرة الإشارة إلى الضوضاء للأشكال الموجية الثلاثة كما هو موضح في الشكل (11):



الشكل (11): مقارنة BER بين OFDM و f-OFDM و FBMC.

يتضح من الشكل (11) أنه عندما تصل قيمة SNR إلى حوالي 30dB وأكثر فإن الشكل الموجي FBMC يعطي نتيجة أفضل من باقي الأشكال الموجية، يليه OFDM ثم f-OFDM. ومن الملاحظ



and performance. Gerzaguetetal. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2017) 2017:13 DOI10.1186/s13638-016- 0792-0

[8] Yasir Amer AJawhar, Khairun N. Ramli, Montadar Abas Taher, Nor Shahida M. Shah, Salama A. Mostafa, Bashar Ahmed Khalaf, Improving PAPR performance of filtered OFDM for 5G communications using PTS, ETRI Journal WILEY. (April 13 2020).

[9] Xi Zhang, Ming Jia, Lei Chen, Jianglei Ma, Jing Qiu. Filtered-OFDM Enabler for Flexible Waveform in The 5th Generation Cellular Networks, IEEE Globecom, San Diego. ,( Aug 29, 2015).

[10] DSW aldhauser, LGB altar, JANossek, in Proc. IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. MMSE subcarrier equalization for filter bank based multicarrier systems, pp.525529. doi:10. 1109/SPAWC. 2008.4641663.2008.

[11] Andrea S. Marcano and Henrik L. Christiansen , A novel method for improving the capacity in 5G mobile networks combining NOMA and OMA , 978-1-5090-5932-4/17©2017 IEEE.

[12] [https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-filter-bank-multi-carrier-FBMC-5-6\\_fig2\\_320525996](https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-filter-bank-multi-carrier-FBMC-5-6_fig2_320525996) , seen in 05/07/2022 /21:58:44

[13] Xianzhen Yang, Siyuan Yan, Xiao Li and Fu Li. (August 11, 2020). A Unified Spectrum Formulation for OFDM, FBMC, and F-OFDM electronics 2020,9,1285,

[14] 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, [https://nt.tuwien.ac.at/wpcontent/uploads/2020/05/5G\\_LL\\_userManual.pdf](https://nt.tuwien.ac.at/wpcontent/uploads/2020/05/5G_LL_userManual.pdf), seen in 22/03/2022/15:55:23

OFDM من خلال توفير كفاءة طيفية أعلى، بسبب التصفية لكل ناقل فرعي.

✓ تُظهر جميع عمليات المحاكاة التي تم إجراؤها أن تقنية FBMC هي المنافس الواعد لشكل الموجة للاتصالات اللاسلكية المستقبلية وخاصة اتصالات 5G، حيث تمت معالجة أوجه القصور في تقنية f-OFDM و OFDM وإزالتها من قبل FBMC.

## 6. التوصيات

من خلال الدراسة التي تم إجراؤها في هذه الورقة فإنه يجب التوصية بالتالي:

- دراسة وتحقيق حول كيفية تقليل PAPR للتعويض عن شكل موجة التعديل عالية الأداء في 5G وما بعده.
- دراسة ومقارنة أداء أشكال موجية أخرى مقترحة استخدامها في الجيل الجديد والأجيال القادمة من أنظمة الهاتف المحمول.
- توفير مرجع باللغة العربية يتناول موضوع الأشكال الموجية المرشح استخدامها في الأجيال التالية والمقارنة فيما بينها.

## 7. المراجع

- [1] محمد رزق عساف (25 يوليو 2018)، دراسة وتحسين أداء نظام FBMC/OQAM في قنوات اتصال انتقائية في التردد، المعهد العالي للعلوم والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية.
- [2] Mathieu Van Eeckhaute and three others, OFDM Versus Filter Bank Multicarrier, Signal Processing Magazine, IEEE , vol.28, no.3, pp.92,112, May 2011.
- [3] Farhang-Boroujeny, B., Performance of emerging multi-carrier waveforms for 5G asynchronous communications, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2017) 2017:29.
- [4] Ezmin Abdullah and four others, Comparison of F-OFDM and FBMC in terms of PAPR, BER and FER in Multilink Scenario, 2021 IEEE 11th IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE).
- [5] Guillermo Palomino Lozano. An Open Source Project for Learning 5G Waveforms at an Electrical Engineering Graduate Level, 2020.
- [6] <https://www.mdpi.com/14248220/21/9/3080/htm> , seen in 05/07/2022 /21:55:23
- [7] Robin Gerzaguet1\*, Nikolaos Bartzoudis2 , Leonardo Gomes Baltar3 , Vincent Berg1, Jean Baptiste Doré1, Dimitri Kténas1, Oriol Font B ach2, Xavier Mestre2, Miquel Payaró2, Michael F ärber3 and Kilian Roth3, The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity