

مقارنة الصيغ الموجية المستخدمة في أنظمة الجيل الخامس من الاتصالات الخلوية

م. ليلى محمد اسماعيل*

(تاريخ الإيداع 14/ 9/ 2021 . قُبِلَ للنشر في 16/ 11/ 2021)

□ ملخّص □

تتضمّن هذه المقالة دراسة أداء اثنتين من الصيغ الموجية المُستخدمة في الجيل القادم من الاتصالات الخلوية 5G وإمكانية تكاملها مع نظام الجيل الرابع (LTE) Long Term Evolution. تمّت الدراسة بالنسبة للقناة الفيزيائية للوصلة الهابطة في نظام LTE وهي Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) والتي تُستخدم لتبادل الوسائط المتعددة والبيانات، حيث صُمّمت من أجل معدل نقل بيانات عالي مع تقنيات التعديل QPSK, 16 QAM, 64 QAM. تمّت دراسة تكامل تقنيتين جديدتين من الصيغ الموجية، وهما تقنية OFDM المرشحة Filtered-Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing (F-OFDM) وتقنية الحوامل المتعددة المرشحة العالمية Universal Filtered Multi-Carrier(UFMC)، مع سلسلة المعالجة الموجودة في نظام LTE بدلاً من تقنية OFDM ذات البادئة الدوّارة Cyclic-Prefix OFDM(CP-OFDM). حيث تمّ التحقق من إمكانية استخدامهم كصيغ موجية جديدة للاستخدام مع الجيل القادم من الأنظمة الخلوية، وذلك باستخدام بيئة المحاكاة Matlab. الكلمات المفتاحية: 5G، 4G، UFMC، F-OFDM، والصيغ الموجية

Comparison of the waveforms used in 5G cellular systems

(Received 14 / 9 / 2021 . Accepted 16 / 11 / 2021)

□ ABSTRACT □

This article includes a study of two of the waveforms used in the next generation of cellular communications 5G and the possibility of integrating with the fourth-generation Long Term Evolution (LTE).

The Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), is used for multimedia and data exchange, is designed for high data transfer rate with modulation techniques such QPSK, 16 QAM, 64 QAM.

Two new technical integration of waveforms, two of the “Filtered-Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing” (**F-OFDM**) and the “Universal Filtered Multi-Carrier” (**UFMC**), has been studied with the processing chain in the LTE system instead of the technology OFDM with cyclic prefix (**CP-OFDM**). Where the possibility of using these waveforms in 5G has been studied using Matlab simulation.

Key Words: 4G, 5G, F-OFDM, UFMC and Waveforms

1- مقدمة

أهم القضايا التي تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم تكنولوجيا النفاذ الراديوي Radio Access Technology RAT، في الأنظمة الخلوية هي تحسين أداء النظام، كفاءة استخدام الطيف، سعة النظام، وإنصاف المستخدم، وذلك بطريقة فعالة من حيث التكلفة.

قامت الهيئة التشاركية لتطوير الجيل الثالث للاتصالات Third Generation Partnership Project 3GPP بوضع معيار الجيل الخامس 5G الذي بدأ العمل به في بعض البلدان. هناك جوانب متعدّدة للنظام الجديد مع متطلبات المنافسة ومستويات الخدمة المختلفة. وهذا قاد إلى اكتشاف عدة تقنيات وصول راديوي جديدة RAT وذلك لتلبية متطلبات الجيل الخامس الصارمة. [1]

تُوصف تقنيات النفاذ الراديوي عادةً بطريقة النفاذ المتعدد المستخدمة والتي تطورت مع تطور الأجيال الخليوية والتي كان الهدف منها تسهيل عملية وصول المستخدمين إلى موارد النظام ومشاركتها بشكل متزامن وفعال طيفية عالية وكلفة مقبولة ومناسبة. [2] ونذكر منها التقنيات التالية:

- النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي Frequency Division Multiple Access (FDMA)
 - النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني Time Division Multiple Access (TDMA)
 - النفاذ المتعدد بتقسيم الرمز Code Division Multiple Access (CDMA)
 - النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)
 - النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني Spatial Division Multiple Access (SDMA)
- سنسلط الضوء على بعضها ونحلل أدائها في هذا العمل.

2- هدف البحث

يهدف العمل إلى دراسة التكامل بين اثنتين من الصيغ الموجية المعتمدة على تقنية التضمين بالتقسيم الترددي المتعامد OFDM وهما F-OFDM و UFMC، خلال سلسلة معالجة الطبقة الفيزيائية لتقنية LTE MIMO من أجل قناة PDSCH.

حيث يقدّم البحث مقارنة بين هذه التقنيات الأساسية في الجيل الرابع من ناحية جودة الأداء ومعدل خطأ البت Bit Error Rate BER، ومناقشة مدى قابلية تطبيقها في الجيل القادم.

3- طرق البحث ومواده

تم إنجاز هذا البحث بالاعتماد على مراجع علمية حديثة متخصصة في أنظمة الاتصالات الخليوية الحديثة وتطور أجيالها، وتقنياتها، وميزاتها. وأخذت النتائج بعين الاعتبار، حيث استُخدمت البيئة البرمجية Matlab في تصميم النموذج المحاكي وعرض نتائجه.

3-1-1- الصيغ الموجية المستخدمة في الجيل الرابع

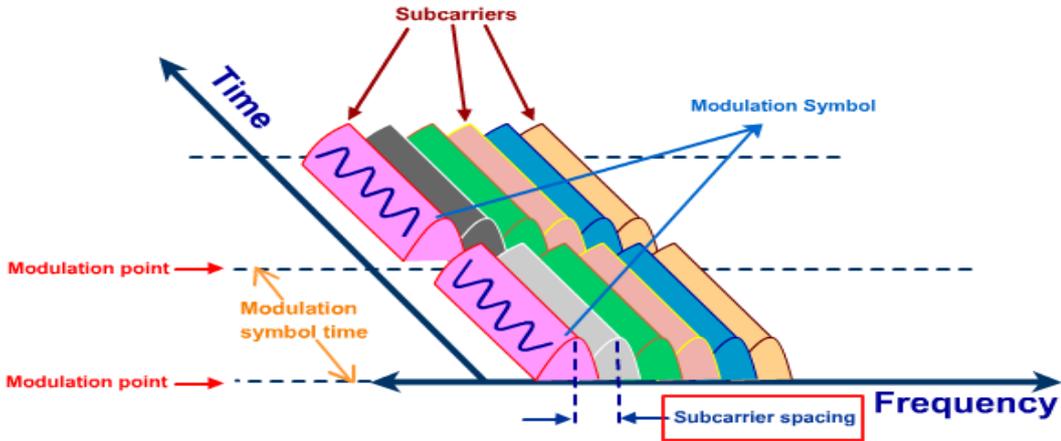
3-1-1- التضمين (التجميع) بالتقسيم الترددي المتعامد

”Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing“ OFDM

تقوم تقنية OFDM بتوزيع الإشارة عريضة الحزمة على عدة حوامل فرعية ضيقة الحزمة، تكون هذه الحوامل متقاربة بمسافة فصل أصغرية بحيث تبقى متعامدة فيما بينها في المجال الترددي كما يبين الشكل (1)، بدلاً من إرسال المعطيات بدفقة واحدة يقوم مرسل OFDM بإرسال المعطيات على شكل دفقات جزئية تُرسل كل منها على حامل فرعي مختلف، مما يؤدي إلى فعالية طيفية عالية مقارنة ب FDMA وتداخل أقل مقارنة ب CDMA. يمكن تخصيص مجموعات مختلفة من الحوامل للإرسال إلى عدة مستخدمين.[3].

إذا تم الإرسال ب OFDM مع المحافظة على معدل النقل نفسه عند الإرسال بحامل وحيد عريض الحزمة، عندئذ يكون معدل النقل بالنسبة لكل حامل فرعي أقل وهذا يؤدي إلى زيادة مدة الرمز مما يقلل معدل الخطأ ويقلل التداخل بين الرموز Inter Symbol Interference ISI الناتج عن تأخير تعدد المسارات.

اختيار OFDMA تم بناءً على طلب فعالية طيفية أعلى وكلفة أقل بالبت كون المشكلة الأساسية لمزود الخدمة هي إيصال المزيد من البيانات للمستخدمين بشكل أعلى وأقل تكلفة لأن تقنية النفاذ المتعدد بتقسيم الرمز عريض الحزمة ”WCDMA“ Wideband Code Division Multiple Access لديها قيود على توسيع النطاق مع الحزمة لذلك تم اختيار OFDMA.



الشكل (1) الحوامل المتعامدة في OFDM

قدمت OFDMA حلول بشأن هذه المشكلة عبر تقسيم دفق البيانات عالي السرعة إلى عدة دفقات بيانات منخفضة السرعة وإرسالها على قنوات ترددية مفردة، وعند المستقبل يتم تجميع هذه الدفقات لبناء دفق بيانات عالي السرعة.

ويمكن تلخيص مزايا OFDM بالنقاط التالية:[4]

- تحدّ OFDM من الطبيعة الانتقائية في التردد للقناة اللاسلكية عريضة الحزمة، حيث تحولها إلى عدّة قنوات فرعية ضيقة الحزمة ذات استجابة مستوية. وذلك يبسط عملية تسوية القناة مما يخفّض تعقيد المستقبل.
 - يخضع كل حامل فرعي إلى تخميد مستقلّ عن بقية الحوامل مما يعطي تنوّع في التردد .freq. Diversity
 - فعالية طيفية عالية بفضل استخدام مسافة فصل أصغر بين الحوامل مع الحفاظ على التعامد دون وجود مجالات الحماية بين الحوامل كما هو الحال في FDMA المستخدمة في النظام العالمي للاتصالات النّقالة GSM Global System for Mobile Communications.
 - تحلّ مشكلة تعدد المسارات التي تؤدي إلى التداخل في الرموز ISI والتي تعاني منها تقنية WCDMA، وذلك بفضل استخدام البادئة الدوّارة والإرسال بمدة رمز كبيرة نسبياً.
 - مقارنةً بمدة الرمز $3.69 \mu s$ في GSM و $0.26 \mu s$ في WCDMA.
 - مرونة تخصيص الموارد وجدولتها.
- تم استخدام تقنية OFDM في الجيل الرابع سابقاً في أنظمة LTE وهي تقنية مرشحة للاستخدام في الجيل الخامس بسبب مقاومتها للتشتت الناتج عن تعدد المسارات وبسبب سهولة التوظيف والنشر باستخدام تحويلات فورييه وفورييه العكسي.[4]

وتعاني OFDM من بعض السلبيات وهي:

- الحساسية لأخطاء التزامن في التردد مما يؤدي إلى التداخل بين الحوامل الفرعية.
 - نسبة الاستطاعة العظمى إلى الاستطاعة الوسطى "Peak power to average PAPR" مرتفعة: وهي النسبة بين الطاقة (القدرة) الأعظمية لرمز OFDM والطاقة المتوسطة لهذا الرمز، وتحدث هذه الحالة عندما تكون الحوامل الفرعية المختلفة واقعة خارج أطوار بعضها البعض.
- تم اعتماد البادئة الدوّارة (CP) Cyclic Prefix لتجنّب هذه الحالات.

3-1-2 البادئة الدوّارة (CP) وفائدة استخدامها مع OFDM:[5]

ينتج انتشار التأخير عن وصول المسارات المتأخّرة من الإشارة الناتجة عن تعدد المسارات Multipath، وهذا يؤدي إلى التداخل بين الرموز ISI. وإنّ أهم فوائد استخدام ال OFDM هو زيادة طول الرمز المرسل مما يقلل من أثر التداخل ISI على الرمز إذ أن مدة التداخل تكون أقل بكثير من مدة الرمز. وتستخدم فترة حماية بين الرموز لامتناس أثر المسارات المتعددة ومنع التداخل بين الرموز الناتج عنها. يتم ذلك باستخدام البادئة الدوّارة CP وهي نسخة مكررة من الجزء الأخير للرمز يتم إضافتها قبل الرمز. تحمي البادئة الدوّارة المعطيات من التداخل مع الرموز الأخرى حيث تصل النسخ المتأخّرة ضمنها كما تفيد في تحسين التزامن.

تستخدم أنظمة LTE نوعين مختلفين من حيث المدة للبادئة الدوّارة: البادئة الدوّارة الطبيعية Normal CP مدتها $5.21 \mu s$ للرمز الأول من كل حصة زمنية $T_S=0.5ms$ ، أما للرموز من 1 إلى 6 فتكون $4.7 \mu s$. وهذا كافي لحماية الحصة الزمنية من التداخل الناتج عن النسخ المتأخّرة من الحصص الزمنية الأخرى بفرق مسار أعظمي

1561m بين أقصر مسار وأبعد مسار عن المستقبل. وكافي لحماية الرموز من 1 إلى 6 من التداخل الناتج عن النسخ المتأخرة بفرق مسار أعظمي 1409 m.

تخفّض البادئة الدوّارة الطبيعية معدل النقل بمقدار $6.7\% = [0.5ms / (5.21\mu s + 4.7\mu s \times 6)]$ ولكنه ثمن زهيد مقابل التخلص من التداخل بين الرموز. النوع الثاني للبادئة الدوّارة هو البادئة الدوّارة الموسّعة Extended CP ويستخدم للخلايا كبيرة الحجم. مدّتها $16.7 \mu s$ وهي قادرة على احتواء النسخ المتأخرة بفرق مسار أعظمي 5 km ولكنها تخفّض معدل النقل بمقدار 20%. ومن الجدير بالذكر أن الحصة الزمنية تحوي 6 رموز في حال تمّ استخدام البادئة الدوّارة الموسّعة، بينما تحوي 7 رموز في حال تمّ استخدام البادئة الدوّارة الطبيعية.

3-1-3 تقنية الحوامل المتعددة المرشحة (FBMC) Filter Bank Multicarrier

يكن الاختلاف الأساسي بين FBMC و OFDM هو أنّ الجوانب التي تسبّب التداخل وانتشار الأخطاء يتم ترشيحها في تقنية FBMC، وبالتالي يتم الحصول على إشارة محدودة الحزمة تُسبب زيادة الفعالية الطيفية من دون استخدام البادئة الدوّارة CP.

وبالرغم من أنّ FBMC تُسبب زيادة في التعقيد، لكنّها تؤمن فصل أفضل للحوامل الفرعية. إنّ قدرة هذه التقنية على تحقيق تزامن الشبكة تجعلها تقنية مهمة لأنظمة الجيل الخامس.

ومع استخدام تحويلات فورييه وفورييه العكسي، فإنّ مشاكل تزامن الوصلتين الصاعدة والهابطة يتم القضاء عليها.

وأهمّ النقاط حول تقنية FBMC هي أنّها تتوافق مع تقنية Multiple Input Multiple Output

[6].MIMO

حيث أنّ الأنظمة التي تعتمد على كلا التقنيتين معاً تملك عدّة ميزات منها: [7]

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

تقنية MIMO هي واحدة من التقنيات الأساسية في الأجيال القادمة التي تلعب دور هام في تحسين أداء النظام. ويوجد أربعة أنواع من خوارزميات MIMO تم تحديدها في معيار LTE وهي:

- Transmit diversity (تنوّع الإرسال)
- Receiver-combing (الدمج لدى المستقبل)
- Beam-forming (التشكيل الشعاعي)
- Spatial-multiplexing (التجميع المكاني)

3-1-4 الحوامل المتعددة المرشحة العالمية UFMC [8]

UFMC هي صيغة موجية مشنّقة من الصيغة OFDM وتتشركان بفكرة ما بعد الترشيح، حيث تتم عملية ترشيح مجموعة من الحوامل بالاعتماد على التنفيذ الفعّال لمجال ترددي.

يتم تحفيز عملية الفلترة ذات الحزمة الفرعية هذه (النطاق الفرعي) من حقيقة أنّ أصغر وحدة مُستخدمة من قبل خوارزمية الجدولة في المجال الترددي في نظام 3GPP LTE هي عنصر الموارد أو ما يسمى صندوق الموارد (RB) resource block، والذي هو مجموعة مكونة من 12 حامل.

عملية الترشيح تقود إلى تسرب وانبعث أقل خارج الحزمة مقارنةً ب OFDM. تطبق تقنية UFMC الترشيح على مجموعة جزئية من الحوامل وبالتالي تقدّم فعالية طيفية أفضل ومتانة أفضل مقارنةً ب OFDM.

وعند انخفاض طول المرشح، فإنّ تقنية UFMC تعطي تأخير أقلّ مقارنةً بFBMC.

2-3 النموذج المستخدم:

واجهة تفاعلية مع المستخدم Graphical User Interfaces GUI تمّ تصميمها باستخدام برنامج Matlab وباستخدام لغة البرمجة C++ كما يُظهر الشكل (2)، وهي تسمح بمحاكاة ونمذجة الوصلة من خلال تحديد وتخصيص عدة بارامترات تم اختيارها بناءً على دراسات مرجعية سابقة وأبحاث حديثة في نفس المجال أثبتت جودة أداء هذه البارامترات، وهي كالتالي:

الشكل (2) واجهة GUI الخاصة بنموذج المحاكاة

- الصيغة الموجية المستخدمة في الطبقة الفيزيائية:
 - F-OFDM
 - UFMC
 - CP-OFDM
- عدد هوائيات الإرسال: 1، 2، 4.

▪ عدد هوائيات الاستقبال: 1، 2، 4.

▪ نوع التعديل المستخدم في قناة PDSCH من أجل بيتات المعطيات:

- QPSK
- 16QAM
- 64QAM
- 256QAM

طرق التعديل المختلفة تعمل على خفض معدل خطأ البت BER عند وجود الخفوت fading، التداخل

Interference، انزياح دوبلر Doppler spread، والضجيج الحراري Thermal noise.

▪ نمط تأخير الخفوت لتقنية MIMO: [9]

المعيار 3GPP LTE حدد ثلاث نماذج للخفوت متعدد المسارات وهي:

- Extended Pedestrian A EPA (حركية مشاة موسعة)
- Extended Vehicular A EVA (حركية عربات موسعة)
- Extended Typical Urban ETU (المناطق الحضرية النموذجية)

الجدول (1) يبين قيم الطاقة وأنماط التأخير لكل منها: [9]

الجدول (1) قيم التأخير لأنماط الخفوت والطاقة النسبية المقابلة

Channel model	Excess tap delay (ns)	Relative power (dB)
EPA	[0 30 70 90 110 190 410]	[0 -1 -2 -3 -8 -17.2 -20.8]
EVA	[0 30 150 310 370 710 1090 1730 2510]	[0 -1.5 -1.4 -3.6 -0.6 -9.1 -7 -12 -16.9]
ETU	[0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]	[-1 -1 -1 0 0 0 -3 -5 -7]

▪ انزياح دوبلر الأعظمي بوحدة الهرتز، القيمة العددية غير السالبة تدل على الحد الأقصى

لانزياح دوبلر.

▪ نسبة الإشارة إلى الضجيج بوحدة الديسبل (dB)، القيمة العددية تدل على مستوى Signal to

Noise Ratio SNR بوحدة الديسبل من أجل الوصلة.

▪ عدد الإطارات الفرعية للمحاكاة، هو مقياس رقمي يحدد طول المحاكاة، ويقاس بخطوات من رتبة

1msec والتي تقابل إطار فرعي واحد من البيانات التي تتم معالجتها.

▪ مستوى الارتباط (الترابط): منخفض، متوسط، أو مرتفع.

يتم في تقنية MIMO إرسال واستقبال معطيات متعددة على نفس القناة الراديوية في نفس الوقت

ومع انتشار متعدد المسارات، وبالتالي من المستحسن استخدام الترابط Correlation بين منفذ الهوائي

عند طرفي المرسل والمستقبل.

ومن المرغوب دائماً أن يكون الترابط أقل ما يمكن.

يبين الجدول (2) المستويات الثلاث للترابط والمحددة في نظام LTE: [10]

الجدول (2) مستويات الترابط في نظام LTE MIMO

LTE MIMO channel correlation levels	α	β
Low correlation	0	0
Medium correlation	0.3	0.9
High correlation	0.9	0.9

- الخيار (Enable constellation diagram) (تمكين رسم التجميع (مخطط الكويكبات)): هو من أجل عرض الرسم المجموعاتي للإشارة في سلسلة المعالجة لدى المستقبل.
- **مخطط الكويكبات (constellation diagram):** هو مخطط يعطي كيفية توزع الرموز symbols هندسياً على المحورين "In-phase" و "Quadrature" Q.
- الخيار (Enable spectrum analyzer) (تمكين محل الطيف): لعرض الطيف للإشارات المرسل والمستقبل.
- يعرض محل الطيف رمز OFDM الأخير للإطار الفرعي.
- عند اختيار الزر simulate link (محاكاة الوصلة)، فإنه تتم معالجة الوصلة المشكّلة. وعند الانتهاء من المحاكاة يتم عرض النتائج لمعدل خطأ البت (BER) Bit Error Rate وقيمة مربع متوسط الجذر (RMS) (root mean square) لقيمة مطال شعاع الخطأ (EVM) (error vector magnitude) من أجل رموز المعطيات.

4- المحاكاة ومناقشة النتائج

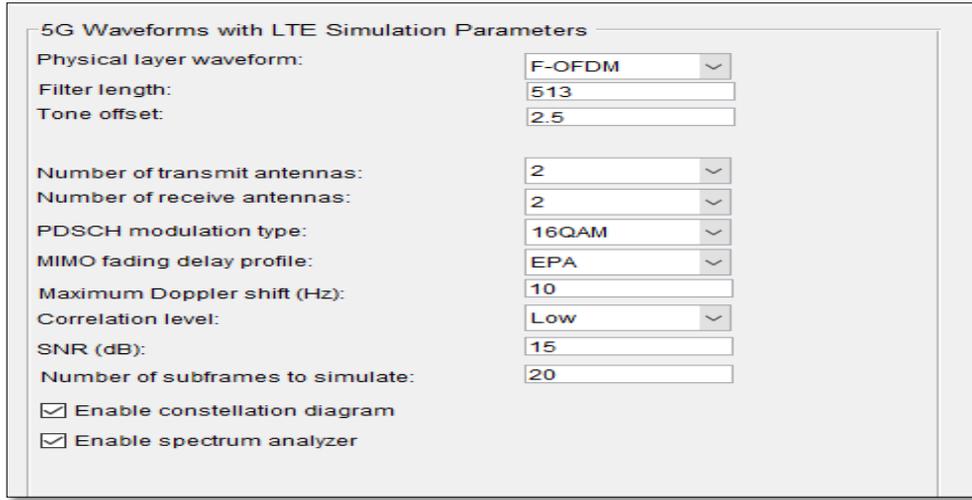
يسمح النموذج الذي تم تصميمه في هذا العمل بالمقارنة بين عدة تقنيات ومن أجل عدة حالات وعدة قيم للمحددات الأساسية، كما أنه يعطي إمكانية إظهار مخططات ومنحنيات بيانية بالإضافة للنتائج العددية للقيم المقاسة. سنناقش حالتين لانتئين من التقنيات (F-OFDM, UFMC) فيما يلي، ونقدم مخططات توضح أداء كل منها، ومن ثم سنعرض نتائج مقارنة التقنيات الثلاث المدروسة.

1-4 حالة اختيار تقنية F-OFDM

بهدف محاكاة تقنية F-OFDM تم تحديد القيم التالية للمحددات كما يبين في الشكل (3).

- ✓ اثنين من الهوائيات في الإرسال والاستقبال.
- ✓ نسبة إشارة إلى الضجيج مقدارها 15dB.
- ✓ نوع التعديل المستخدم هو 16QAM (يمكن دراسة تأثير الأنواع الأخرى في الأبحاث اللاحقة)
- ✓ نمط الخفوت الخاص بتقنية MIMO هو EPA والذي يماثل حركية مقارنة لحركية المشاة.
- ✓ انزياح دوبلر 10 Hz.
- ✓ مستوى منخفض للترابط.

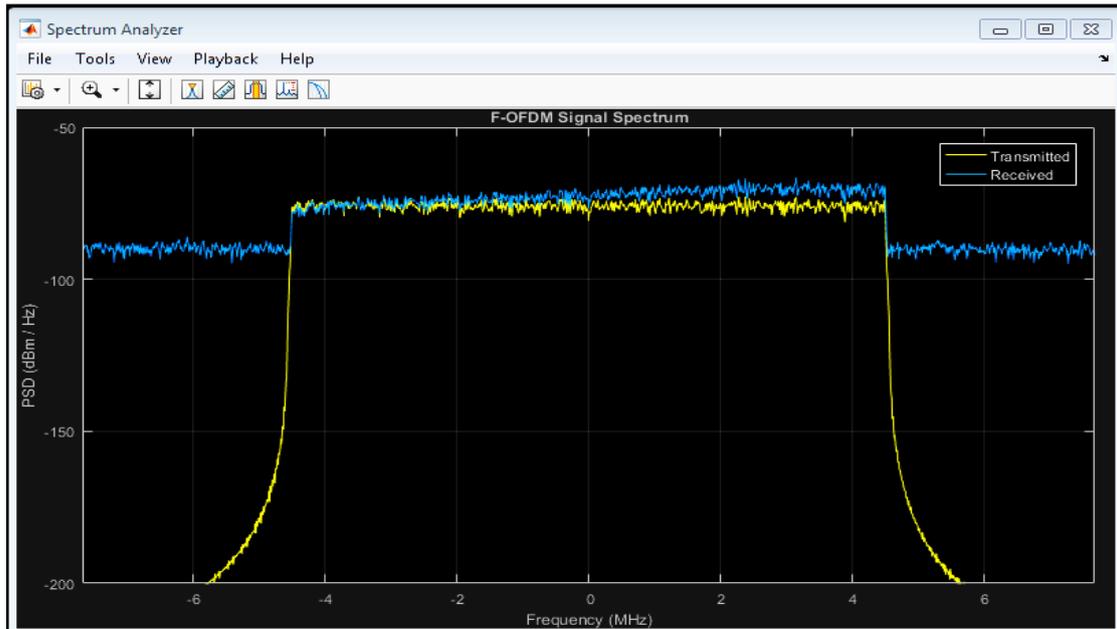
✓ عدد الإطارات الفرعية للمحاكاة تم تحديده ليكون 20 إطار فرعي.



الشكل (3) البارامترات المستخدمة في حالة F-OFDM

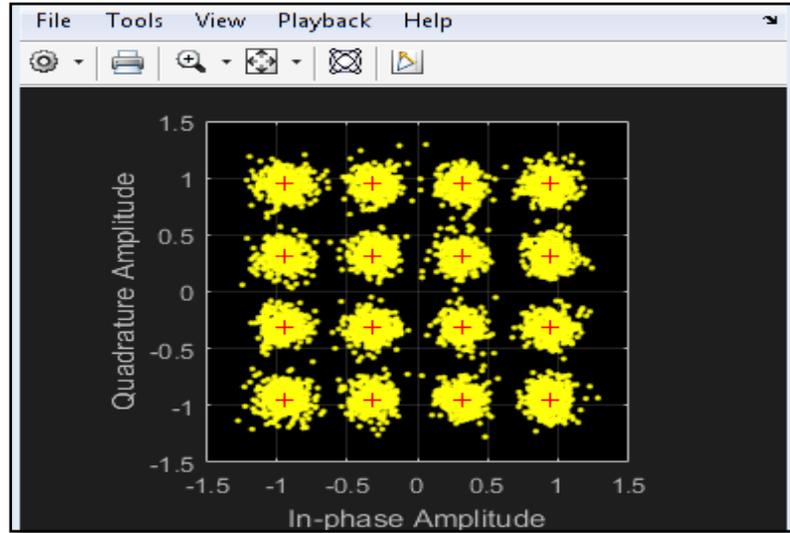
يُعرض محلل الطيف (spectrum analyzer) في الشكل (4) الإشارة المرسلَة والمستقبلة، حيث يتم رسم قيمة الكثافة الطيفية للطاقة (Power Spectrum Density (PSD) بدلالة المجال الترددي المستخدم.

يُظهر طيف الإشارة المرسلَة (نو اللون الأصفر) الانبعاث الحاصل خارج الحزمة والذي ينتج عن الخفوت الموجود بالشبكة ولكنه ليس بقيمة كبيرة، بينما طيف الإشارة المستقبلة (نو اللون الأزرق) يقدّم رؤية عن انتقائية التردد للقناة عبر عرض الحزمة المخصص، مع العلم أنه تم تحليل إشارة الإطار الفرعي بالكامل.



الشكل (4) طيف الإشارة المستقبلة في حالة تقنية F-OFDM

يبين الشكل (5) مخطط تجميع الإشارة المستقبلية. حيث تعرض إشارة فك الترابط (فك التقابل) للرمز إشارة مرئية عن أداء الوصلة. ويسمى هذا المخطط بمخطط الكويكبات والذي يعطي فكرة عن كيفية توزع الرموز خلال تعديل OFDM. حيث نلاحظ أن الرموز تتوزع حول قيمة مركزية دون أن تتداخل مع بعضها البعض وهذا يعكس أداء جيد للقناة المستخدمة ضمن شروط الخفوت والتداخل وانزياح دوبلر ونسبة SNR المطبقة.



الشكل (5) مخطط الكويكبات الناتج عن فك الترابط في حالة F-OFDM

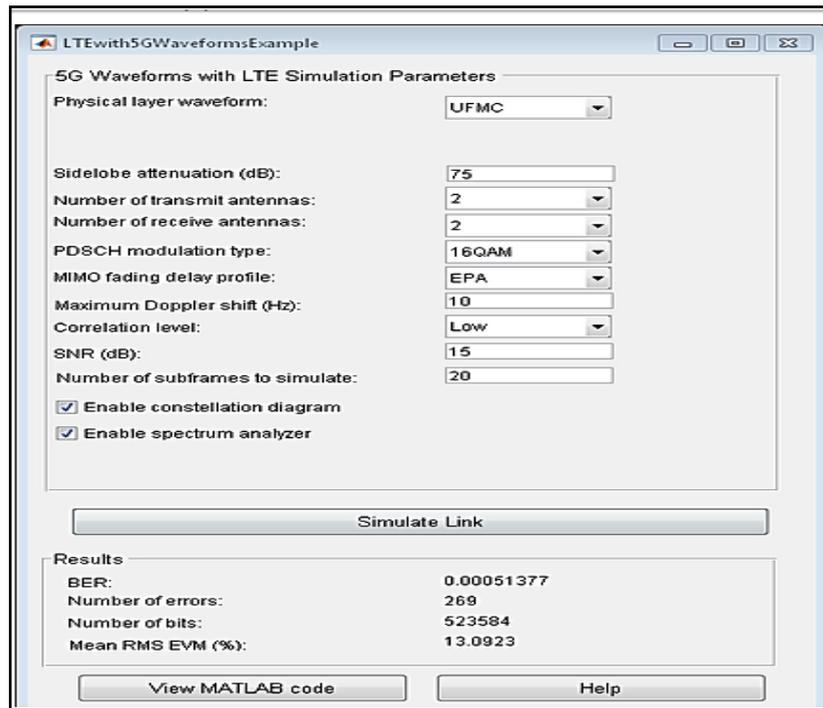
تعرض نافذة الأوامر Command window لبرنامج Matlab تفاصيل آنية لعملية المعالجة ورقم الإطار الفرعي الذي تتم معالجته في تلك اللحظة. عند انتهاء عملية المحاكاة، يتم عرض (معدل خطأ البت النهائي BER، العدد الكلي للأخطاء التي تمت ملاحظتها، والعدد الكلي للبيئات التي تمت معالجتها) بواسطة واجهة المستخدم ونافذة الأوامر في برنامج Matlab. وكذلك يتم عرض القيمة المتوسطة الفعالة لمطال شعاع الخطأ RMS EVM على طول فترة المحاكاة لرموز المعطيات.

فيما يلي نوضح النتائج العددية للمحاكاة:

BER	Number of errors	Number of bits	Mean RMS EVM (%)
0.00035715	187	523584	12.7916

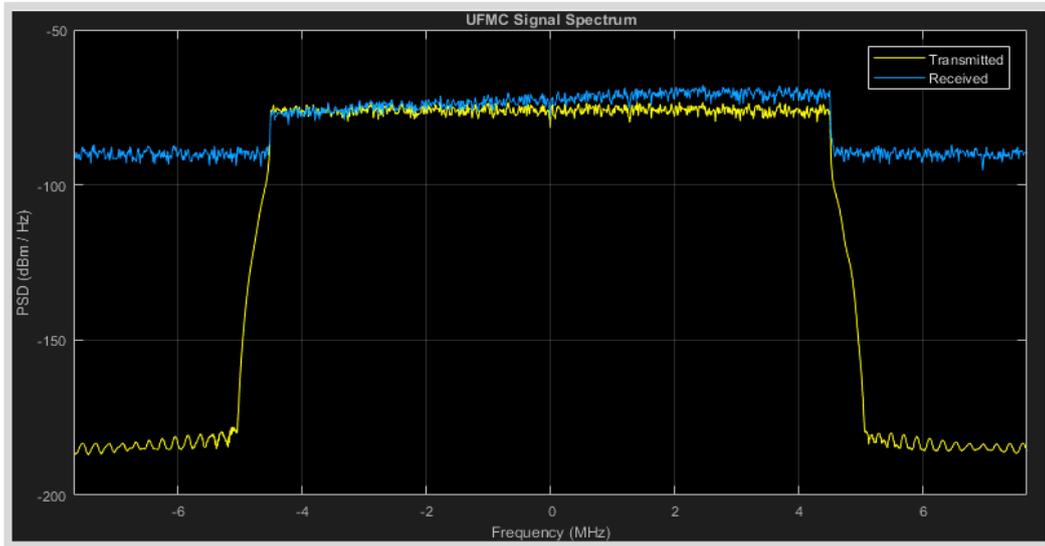
4-2- حالة اختيار تقنية UFMC

تشمل الحالة الثانية اختيار تقنية UFMC ومحاكاتها وبنفس القيم السابقة للمحددات الخاصة، كما موضح في الشكل (7). بالإضافة إلى عرض النتائج بعدها.



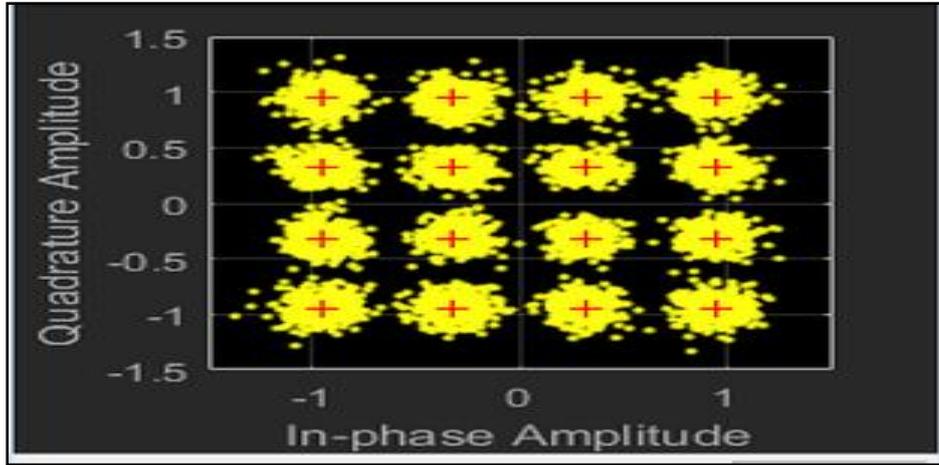
الشكل (7) البارامترات المستخدمة في حالة UFMC

يبين الشكل (8) الطيف لكل من الإشارة المرسلّة والمستقبلة والانبعث الحاصل.



الشكل (8) طيف إشارة UFMC

في حين يبين الشكل (9) مخطط الكويكبات لتوزع الرموز والنتائج عن عملية فك الترابط لرموز UFMC. حيث نلاحظ من المخطط التوزع المقبول للرموز مع المستويات المقابلة، حيث أنه لا نلاحظ وجود تداخل بينها يسيء إلى أداء النظام، حيث أن كل عينة من الرموز المتوزعة باللون الأصفر تتمركز حول نقطة معينة ولا تتداخل مع العينات المجاورة لها.



الشكل (9) مخطط الكويكبات الناتج عن فك الترابط في حالة UFMC

فيما يلي النتائج العددية للحالة الثانية:

BER	Number of errors	Number of bits	Mean RMS EVM (%)
0.00051377	269	523584	13.0923

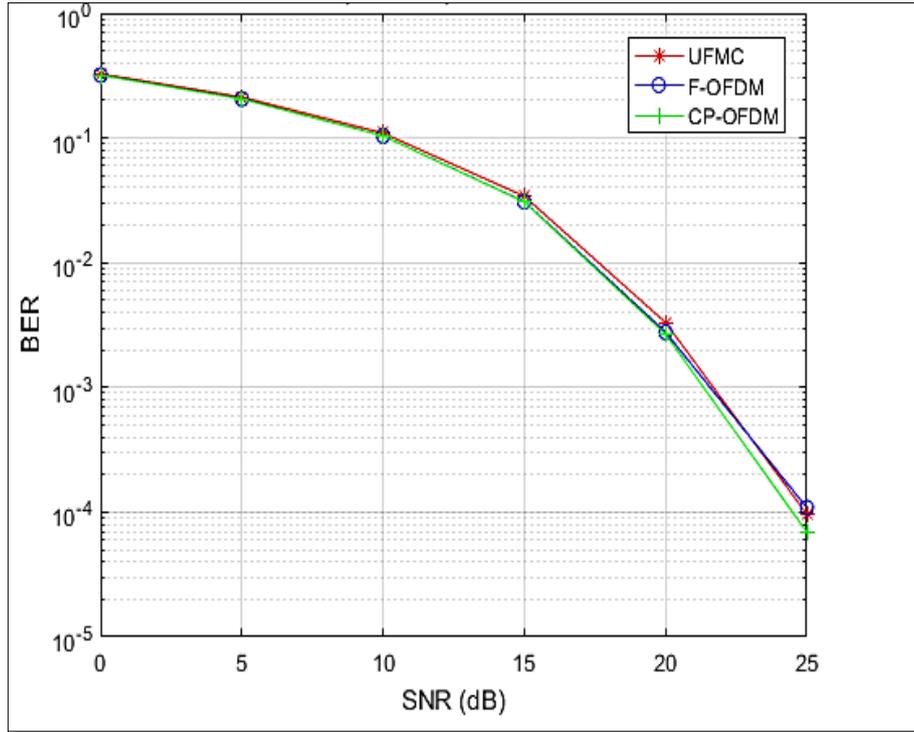
نلاحظ من النتائج العددية للمحددات السابقة أن القيم متقاربة نوعاً ما ولا يوجد فارق كبير بينها في الحالتين. حيث أن النسبة المئوية RMS EVM في الحالة الأولى (حالة F-OFDM) كانت تساوي 12.7916%، أما في الحالة الثانية (حالة UFMC) كانت تساوي 13.0923%. وهما قيمتان متقاربتان جداً وهذا يفسر الأداء المتقارب للصيغ الموجهة المقترحة والذي سيبدو واضحاً عند رسم منحنيات معدل خطأ البت BER.

3-4 مقارنة أداء التقنيتين المدروستين مع CP-OFDM

الخطوة التالية هي لمقارنة معدل خطأ البت BER الخاص بالصيغ الموجهة الثلاث لمقارنة أدائها، وذلك من خلال محاكاة القناة PDSCH في نظام الجيل الرابع LTE. الحالة الأولى من أجل نمط تأخير الخفوت لتقنية MIMO هو EVA-10 والذي يقارب حركية أسرع مشابهة لحركية العربات والآليات المتحركة.

الشكل (10) يبين معدل خطأ البت BER مقارنةً مع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، وذلك لكل من UFMC, F-OFDM, CP-OFDM.

حيث تم تحديد عرض النطاق الترددي ليكون مساوياً 10 MHz.

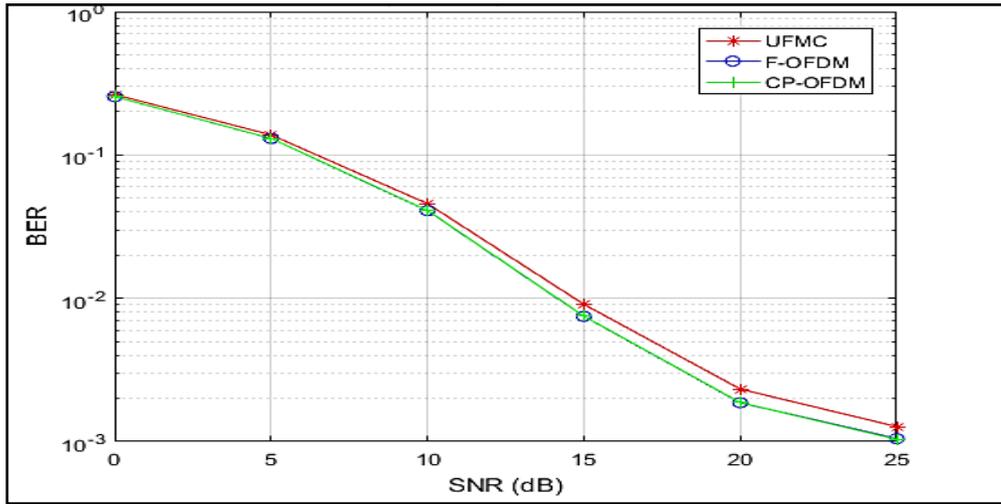


الشكل (10) مقارنة معدل خطأ البت للصيغ الموجية الثلاث

- نلاحظ من المنحني السابق أنّ معدّل خطأ البت متقارب جداً للصيغ الثلاث، أي أنّ أداء الصيغ الجديدة مشابه بدرجة كبيرة لصيغة الجيل الرابع الأساسية CP-OFDM وتعطي الوصلة أداء جيد جداً.
- كما نلاحظ أنّ منحنى BER لتقنيتي F-OFDM و UFMC شبه منطبقين والذي يوضح الأداء المتقارب لهذه الصيغ.
- بالإضافة إلى أنّه كلما ازدادت نسبة الإشارة إلى الضجيج كلما كان الأداء أفضل، حيث يتناقص معدل خطأ البت مع زيادة هذه النسبة.

الحالة الثانية تتضمن دراسة أداء الصيغ السابقة في حالة حركية أسوأ، وذلك من خلال تغيير نمط تأخير الخفوت المستخدم ليصبح **ETU-10** والذي يقارب الحركية الكثيفة في المناطق المزدحمة ومناطق المدن التي تعطي خفوت أكبر ناتج عن ظاهرة تعدد المسارات المتزايدة في هذه الحالات. [9]

وهذا ما يوضحه الشكل (11).



الشكل (11) تأثير تغيير نمط تأخير الخفوت على معدل BER

نلاحظ في هذه الحالة (والتي كان الخفوت فيها أكبر من السابقة) أنّ الأداء أيضاً متقارب نوعاً ما بين الصيغتين الجديتين والصيغة الأساسية للجيل الرابع حيث أنّ الفارق بينها صغير جداً لدرجة يمكن إهماله، كما أنّ منحنى معدل خطأ البتّ هو نفسه تقريباً في الحالتين المدروستين. وبالتالي نستنتج مما سبق أنّ الصيغ الموجهة المقترحة للاستخدام في الجيل القادم من الاتصالات المتنقلة هي صيغ جيدة ومناسبة جداً، حيث أنها تعطي تحسّناً مهمّاً في الفعالية الطيفية من دون التأثير على أداء الوصلة أو على معدل BER.

5- الاستنتاجات والتوصيات

- تمّ في هذا البحث تسليط الضوء على أهمّ التقنيات المستخدمة في الجيل الرابع والمستخدم في الجيل الخامس حديثاً والتي أكثرها استخداماً في الوقت الحالي هي تقنية CP-OFDM وتقنية UPMC ولكن مع بعض التحسينات والتطويرات عما كانت عليه في الجيل الرابع، لاسيما في اتجاه الوصلة الهابطة.
- بالإضافة إلى أنّه تمّ تسليط الضوء على تكامل هذه الصيغ الجديدة، F-OFDM و UPMC في نظام LTE الذي يستخدم تقنية الهوائيات MIMO وفي ظلّ ظروف انتشار وخفوت متعددة وسيئة.
- قُدمت مقارنة لمعدل خطأ البتّ للتقنيات الجديدة من أجل التشكيلات والمحددات المختارة.
- تبيّن وجود تقارب بين أداء الصيغ المدروسة والذي هو أداء جيد ومناسب للأنظمة الحالية، حيث أنّ تقنية CP-OFDM تعطي أداء جيد لقدرتها على الحدّ من تداخل الرموز ISI بدرجة كبيرة جداً.

- ولكن تعتبر الصيغة الموجية UFMC هي الخيار الأهم، وذلك لأنّ توابع تشكيل النبضات المستخدمة تعمل على تحسين الأداء في حالة السيناريوهات متعددة المستخدمين وغير المتزامنة. كما أنها تحافظ على التوافق مع خوارزميات OFDM المعروفة والأساسية (تقدير القناة، MIMO).
- بالاعتماد على تحليل الأداء الذي قمنا به في هذا العمل، نستنتج أن تقنيات الجيل الخامس المرشحة، خاصة UFMC، تُعد بمكاسب جيّدة في الفعالية الطيفية من دون أيّ تدهور في أداء الوصلة.

6- المراجع

- [1] Sharma, S. K. a. C. S., 2016. - Multiple Access Techniques for Next Generation Wireless: Recent Advances and Future Perspectives. *EAI Endorsed Transactions on Wireless Spectrum*, 19 1
- [2] X. Gao, W. Wang, X. Xia, E. K. S. Au, and X. You, "Cyclic prefixed OQAM OFDM and its application to single-carrier FDMA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 5, 2019, pp. 1467-1480.
- [3] M. H. Mahmud, M. M. Hossain, A. A. Khan, S. Ahmed, M. A. Mahmud and M. H. Islam, "Performance Analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM Under Rayleigh Fading Channel for 5G Wireless Communication," 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), 2020, pp. 1172-1177, doi: 10.1109/ICISS49785.2020.9316134.
- [4] H. SATO and K. NISHIMORI, "Study on simple performance evaluation for MU-MIMO-OFDMA," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2021, pp. 513-514, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391492.
- [5] G. Kongara, C. He, L. Yang and J. Armstrong, "A Comparison of CP-OFDM, PCC-OFDM and UPMC for 5G Uplink Communications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 157574-157594, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2949792.
- [6] Y. Zhang, Y. Qiu, X. Liu, Y. Nie, H. Zheng and D. Qu, "Smoothing Beamformer for MIMO-FBMC Based on Frequency Spreading," 2019 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp), 2019, pp. 23-28, doi: 10.1109/ComComAp46287.2019.9018740.
- [7] S. Jang, D. Na and K. Choi, "Comprehensive Performance Comparison Between OFDM-based and FBMC-based Uplink Systems," 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), 2020, pp. 288-292, doi: 10.1109/ICOIN48656.2020.9016425.
- [8] A. K. M. Baki, R. A. Ahsan and A. Awsaf, "Novel Methods of Filtering For FBMC/UPMC Based 5G Communication Systems," 2019 7th International Conference on Smart Computing & Communications (ICSCC), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSCC.2019.8843617.
- [9] M. K. shaybeth, S. Goli and A. S. Elameer, "Analysis and Simulation of LTE Downlink: EPA and ETU model," 2018 International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE), 2018, pp. 185-188, doi: 10.1109/ICOASE.2018.8548788.