الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

النفاذ المتعدد غير المتعامد من أجل منظومات شبكات الهاتف النقالة الجيل الخامس

أطروحة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الاتصالات المتقدمة

إعداد المهندس
عمار حسن

المشرف العلمي
الدكتور عادل خضور علي

لجنة الحكم

الأستاذ الدكتور نديم شاهين
الأستاذ الدكتور فريز عبود
الأستاذ الدكتور عبد الرزاق بدوية
الأستاذ الدكتور ياسر عملة
الأستاذ المساعد الدكتور عادل خضور علي

حزيران 2021

Syrian Arab Repablic
Damascus University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Electronics and Communication Engineering Department

NON-Orthogonal Multiple Access for Mobile Networks in 5G Systems

Thesis submitted to obtain PhD Degree in Advanced Communication Engineering

Prepared By

Eng Ammar Hasan

Supervised by

Dr. Aadel Khadour Ali

Jury

Professor Dr..nadim Chahin

Professor Dr..fariz Abboud

Professor Dr..Abd Alrazzak Badawieh

Professor Dr. Yaser Omla

Associate Professor Dr. Adel Khaddour Ali

June 2021

كلمة الشكر

أتوجه بجزيل الشكر للمشرف على البحث، **الدكتور عادل خضور علي**، لما قدمه لي من نصائح وتوجيهات ودعم علمي. فما كنت لأستطيع استكمال البحث لولا دعمه وتشجيعه.

وكذلك أتوجه بالشكر الجزيل لرئيس قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات، **الدكتور نضال زيدان**، لما بذله من جهد ودعم لإنجاح هذا العمل.

كما أتقدم بالشكر **للأساتذة في القسم** الذين أغنوا البحث بتوجيهاتهم أثناء السيمنارات الدورية.

كلمة الإهداء *Dedication*

أهدي هذه الأطروحة لزوجتي الغالية التي تحملت عناء الفراق ومشقة البعد وحولته إلى ثقة و إيمان بقدرتي على إنجاز هذا البحث

أهدي هذه الأطروحة **لعائلتي** التي لم تبخل علي يوماً بالدعم والتشجيع حتى استطعت إنجاز هذا االعمل

كما أهدي هذه الأطروحة **لأصدقائي وزملائي** لما قدموه لي من مساعدة وتشجيع.

وأخيراً أهدي هذا البحث لكل من ساهم بإنجازه.

الفهارس

indexes

فهرس المحتويات Table of Contents

كلمة الشكر 2

كلمة الإهداء 3

فهرس المحتويات 4

فهرس الأشكال 10

قائمة المصطلحات 12

قائمة الاختصارات 16

الملخص 21

مقدمة عامة 18

مشكلة البحث 20

الهدف من البحث 20

أبحاث ودراسات مرجعية 21

مساهمات البحث 22

منهجية البحث وأدواته 23

1. **الفصل الأول : تطور الأنظمة الخليوية** 24

1.1. المقدمة 25

2.1. أجيال الأنظمة الخليوية 25

3.1. أساسيات الجيل الخامس 5G 26

1.3.1. الاتصالات المتعددة الدخل المتعددة الخرج الكثيفة Massive MIMO 28

2.3.1. اتصالات الأمواج المليمترية mm-Waves 29

3.3.1. تقنيات تشكيل الحزمة Beamforming 30

4.3.1. الاتصالات المزدوجة الكاملة 31

5.3.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA: 32

4.1. النفاذ المتعدد 33

1.4.1. النفاذ المتعدد المتعامد OMA 34

2.4.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد Non-orthogonal Coded Access 40

5.1. أنظمة النفاذ العشوائي 42

1.5.1. النفاذ العشوائي المعتمد على الضمان 43
2.5.1. النفاذ العشوائي الخالي من الضمان..... 45
3.5.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان GF_NOMA..... 46
6.1. الخلاصة..... 49
الفصل الثاني : النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA **50**
1.2. مقدمة..... 51
2.2. البنية العامة والموحدة لنظام الإرسال والاستقبال في تقنية NOMA 51
3.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA..... 54
1.3.2. المبدأ الأساسي لتقنية PD_NOMA..... 54
2.3.2. مقارنة تحليلية عددية بين PD_NOMA و OMA في إرسال الوصلة الصاعدة..... 55
4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الرماز Code Domain_NOMA 61
1.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام الترميز Coding_based NOMA..... 62
2.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام البعثرة Scrambling_based NOMA 65
3.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام النثر Spreading_based NOMA 66
4.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام التشابك Interleaving_based NOMA 68
5.2. مستقبلات NOMA..... 71
1.5.2. حذف التداخل IC..... 71
2.5.2. كاشف عدة مستخدمين MUD..... 73
6.2. الخلاصة..... **77**
الفصل الثالث: نموذج النظام..... 78
1.3. مقدمة..... 79
2.3. نمذجة النظام..... 79
3.3. تخصيص الموارد الترددية والطبقات..... 83
1.3.3. الطريقة الأولى: الاختيار اعتماداً على القناة 83
2.3.3. الطريقة الثانية: الاختيار العشوائي..... 86
3.3.3. مقارنة بين طريقتي تخصيص الموارد 87
4.3. تحليل السعة..... 88

3-5 الخلاصة 99
الفصل الرابع : انتاجية التوصيل 100
1.4. مقدمة 101
2.4. تحليل إنتاجية التوصيل 101
1.2.4. إنتاجية التوصيل في النظام الهجين المقترح 101
2.2.4. إنتاجية التوصيل في نظام OMA 103
3.2.4. النتائج العددية والمحاكاة 104
3.4. أمثلة إنتاجية التوصيل 111
4.4. تقييم النتائج 117
5.4. الخلاصة 123
الفصل الخامس : أداء معدل الخطأ 124
1.5. مقدمة 125
2.5. فرضيات الدراسة 125
3.5. تقييم أداء معدل الخطأ 128
5-4 تحسين أداء معدل الخطأ 132
5.5 إقرار صلاحية النتائج ومقارنتها مع دراسات سابقة 138
6.5. الخلاصة 141
الخاتمة 142
الأعمال المستقبلية 144
المراجع 149
Abstract 149

فهرس الأشكال.....

الشكل(1-1) النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي FDMA.....36

الشكل(1-2) النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني TDMA.....37

الشكل(1-3) النفاذ المتعدد بتقسيم الرماز CDMA 38

الشكل(1-4) النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني SDMA 39

الشكل(1-5) النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد OFDMA.....40

الشكل(1-6) إجرائيات النفاذ العشوائي 45

الشكل(1-7) إجرائية الإرسال الخالي من الضمان في الوصلة الصاعدة.....47

الشكل(1-8) مثال توضيحي لبنية كتل النفاذ المتعدد المتعامدة.....49

الشكل(1-9) تمثيل موارد النفاذ المتعامد المحددة مسبقاً في الإرسال الخالي من الضمان.....49

الشكل(2-1) البنية العامة والموحدة لنظام الإرسال والاستقبال في تقنياتNOMA 54

الشكل(2-2) مقارنة استخدام الطيف بين نظام OMA ونظام PD-NOMA في الوصلة الصاعدة 55

الشكل(2-3) شبكة الوصلة الصاعدة PD_NOMA 57

الشكل(2-4) مقارنة مناطق السعة بين PD_NOMA و OMA في إرسال الوصلة الصاعدة لقنوات متماثلة 61

الشكل(2-5) مقارنة مناطق السعة بين PD_NOMA و OMAفي إرسال الوصلة الصاعدة لقنوات غير متماثلة 61

الشكل(2-6) معدل نقل المعطيات الكلي بدلالة نسبة الإشارة للضجيجSNR1 في الوصلة الصاعدة. 62

الشكل(2-7) النثر منخفض الكثافة مع تمديد شعاع التوقيع LDS-SVE.....64

الشكل(2-8) النفاذ المتعدد بالرمازات المخلخلة SCMA 65

الشكل(2-9) النفاذ المتعدد بتقسيم النمط PDMA.....66

الشكل(2-10) النفاذ المتعدد بنشر الموارد RSMA 67

الشكل(2-11) النفاذ التشاركي لعدة مستخدمين MUSA.....68

الشكل(2-12) نفاذ مجموعة مرمزة تعامدياً GOCA.....68

الشكل(2-13) النفاذ المتعدد بالتشابك الشبكي IGMA.....70

الشكل(2-14) النفاذ المتعدد بالتقسيم التكراري RDMA.....70

الشكل(2-15) مستقبل حذف التداخل التتابعي SIC.....73

الشكل(2-16) مخطط الوصلات لنظام SCMA 77

الشكل(3-1) مخطط توضيحي لنظام النفاذ المتعدد غير المتعامد متعدد الطبقات في مجال الاستطاعة.....81

الشكل(3-2) مخطط إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان في مجال الاستطاعة.....83

الشكل(3-3-1) الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة تبعاً لعدد الطبقات. 86

الشكل(3-3-2) الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة تبعاً لعدد القنوات الجزئية M ..86

الشكل(3-4) متوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد العشوائية تبعاً لعدد الطبقات.....87

الشكل(3-6) عدد الطبقات الأعظمي تبعاً لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج 89

الشكل(3-7) مجموع معدل نقل المعطيات تبعاً لعدد الطبقات 94

الشكل(3-7) معدل نقل المعطيات لكل مستخدم تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لـ Γ وM . 95
الشكل(3-8) فعالية السعة لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع OMA تبعاً لعدد المستخدمين 96
الشكل(3-10) ربح السعة لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع نظام OMA تبعاً للنسبة Mo/M و Γ 97
الشكل(3-11) الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج تبعاً للنسبة Mo/M 99
الشكل(4-1) النتائج العددية ونتائج المحاكاة لاحتمال التوصيل الطبقة في النظام الهجين و في نظام OMA 105
الشكل(4-2) احتمال التوصيل في النظام المقترح تبعاً لعدد القنوات الجزئية M 106
الشكل(4-3) إنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين في النظام الهجين وفي نظام OMA 107
الشكل(4-4) عدد المستخدمين الذي تكون عنده إنتاجية النظام أعظمية تبعاً لعدد الموارد المتاحة في النظام 108
الشكل(4-5) المخطط التدفقي لخوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ 111
الشكل(4-6) إنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين باستخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ 111
الشكل(4-7) المخطط التدفقي لخوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات والقنوات الجزئية 117
الشكل(4-8) انتاجية التوصيل العظمى في النظام الهجين تبعاً لـ Mo وفعاليتها مقارنة مع OMA. 118
الشكل(4-9) حل مسألة الأمثلة تبعاً لعدد القنوات الجزئية Mo من أجل $\Gamma min = 1dB$. 119
الشكل(4-10) فعالية انتاجية التوصيل العظمى في النظام الهجين تبعاً لـ Γmin 120
الشكل(4-11) حل مسألة الأمثلة تبعاً لقيمة Γmn عند أعلى فعالية إنتاجية ممكن تحقيقها 121
الشكل(4-12) عدد القنوات الجزئيةMo التي تكون عندها فعالية الإنتاجية أعظمية تبعاً لقيمة لـ Γmin 121
الشكل(4-13) إنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين بعد تطبيق خوارزمية JOSNLS عند قيم المعاملات الأمثلية 122
الشكل(5-1) الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج تبعاً لعدد طبقات 129
الشكل(5-2) معدل الخطأ BER تبعاً لـ SNR من أجل كل L وقيم $\Gamma_{L\text{-}max}$ الموافقة لها 130
الشكل(5-3) معدل الخطأ BER تبعاً لعدد طبقات L من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة للضجيج 131
الشكل(5-4) معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأعظمية من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة للضجيج 131
الشكل(5-5) معدل الخطأ BER تبعاً لـ Γ_min من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات 132
الشكل(5-6) التحسين على معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة CDS من أجل .Γ_min=1,2,3dB 134
الشكل(5-7) التحسين على معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة RS من أجل .Γ_min=1,2,3dB 135
الشكل(5-8) نقاط كوكبة الترميز التراكبي SC من أجل Γ=3dB و L=8 136
الشكل(5-9) المسافة الإقليدية الأصغرية بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي تبعاً لـ .Γ_min 137
الشكل (5-11) منحنيات المقارنة 140
الشكل (5-12) قيم المعاملات الأمثلية عند القيود المفروضة للمقارنة 140

قائمة المصطلحات Terminology List

المقابل العربي	المصطلح الإنكليزي
حذف التداخل الذاتي في مجال الدارات التماثلية	Analog-Circuit-Domain Self-interference Cancellation
المحطة القاعدية	Base Station
تشكيل الحزمة	Beamforming
المحدد المؤقت والوحيد للشبكة الراديوية	Cell-Radio Network Temporary identifier
مسوي القناة	Channel equilization
معلومات الحالة للقناة	Channel state information
الاختيار اعتماداً على القناة	Channel-dependent selection
تبديل الدارات	circuit switched
شبكة النفاذ اللاسلكية السحابية	Cloud radio access network
النفاذ المتعدد بتقسيم الرمز	Code division multiple access
مجال الترميز	Code domain
كلمات ترميز	Code words
انتاجية التوصيل	Connection Throughput
ربح تشكيل كوكبة التعديل	Constellation shapping gain
بادئة دورية	Cyclic prefix
ربح التنوع	Diversity Gain
خوارزمية تقدير الإشارة الأولية	Elementary Signal Estimation Algorithm
المجال العريض المعزز	Enhanced Mobile BroadBand
انتشار الخطأ	Error propagation
خوارزمية انتشار التوقع	Expectation Propagation Algorithm
ومعامل الحمل الزائد	Factor Overloading
مرشح استجابة نبضية منتهي	Finite impulse response filter
خفوت مسطح	Flat fading

المصطلح الإنكليزي	المقابل العربي
frequency division duplex	الطريقة المزدوجة بتقسيم التردد
Frequency division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي
Frequency selective fading	الخفوت الانتقائي للتردد
Full-duplex communication	اتصالات الوصلة المزدوجة
Grant free transmission systems	أنظمة الإرسال الخالية من الضمان
Group orthogonal coded access	النفاذ المرمّز المتعامد المجمع
Inter Carrier Interference	التداخل بين الحوامل
Inter symbol Interference	تداخل بين الرموز
Interleave-division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم التشابكي
Interleave-grid multiple access	النفاذ المتعدد الشبكي
interleaving	التفريق
Internet of things	انترنت الأشياء
Joint Access Control and NOMA Power Level Selection Algorithm	خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ
Latency	زمن تأخير (زمن تلبث)
Long-Term Evolution	التطور طويل الأمد
Low code rate and Signaturebased Shared Access	النفاذ التشاركي بالاعتماد على التوقيع والمعدل المنخفض الترميز
Low coding rate spreading	النثر بمعدل ترميز منخفض
Massive Machine Type Communication	الاتصالات ذات التوصيلات الكثيفة
Massive Multiple-Input Multiple-Output Communications	الاتصالات المتعددة الدخل المتعددة الخرج الكثيفة
Maximum a posteriori probability	أقصى تقدير لاحتمال لاحق
Message Passing Algorithm	خوارزمية تمرير الرسالة
Millimeter wave	الأمواج المليمترية
Minimum Mean square Error	الحد الأدنى لمتوسط الخطأ التربيعي
Multi User Detection	الكشف عن عدة مستخدمين
Multi-Access Edge Computing	الحوسبة متعددة النفاذ

المقابل العربي	المصطلح الإنكليزي
تداخل المسارات المتعددة	Multipath interference
النفاذ المتعدد	Multiple Access
النفاذ المشترك لعدة مستخدمين	Multi-user shared access
الإرسال التراكبي متعدد المستخدمين	Multiuser superposition transmission
المحاكاة الافتراضية لوظائف الشبكة	Network function virtualization
النفاذ المرمّز غير المتعامد	Non-orthogonal Coded Access
النفاذ المتعدد المرمّز غير المتعامد	Non-orthogonal Coded Multiple Access
النفاذ المتعدد غير المتعامد	Non-orthogonal multiple access
النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد	Orthogonal frequency division multiple acces
النفاذ المتعدد المتعامد	Orthogonal multiple access
تراكم	Overlapping
حذف التداخل المتوازي	Parrallel interference cancellation
معامل فقد المسار	Path loss exponent
النفاذ المتعدد باقتسام النمط	Pattern Division Multiple Access
نسبة استطاعة الذروة إلى الاستطاعة المتوسطة	Peak to average power ratio
مجال الاستطاعة	Power domain
المهيء – المعد	Preambles
حذف التداخل الذاتي في مجال الانتشار	Propagation-Domain Self-interference Suppression
النفاذ العشوائي	Random Access
الاختيار العشوائي	Random select
النفاذ المتعدد بالتقسيم التكراري	Repetition division multiple access
طلب الجدولة الديناميكية	Request Dynamic scheduling
النفاذ المتعدد بنشر الموارد	Resource spread multiple access
البعثرة	Scrambling
خدمة الرسائل القصيرة	short messaging services
نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج	Signal to interference plus noise ratio

المقابل العربي	المصطلح الإنكليزي
التشوير الزائد	Signaling overhead
النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي بحامل واحد	Single carrier Frequency division multiple access
الخلايا الصغيرة	Small cells
الشبكات المعرفة بالبرمجيات	Software-Defined Networking
النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني	Space division multiple access
النفاذ المتعدد باستخدام الرمازات المتباعدة	Sparse code multiple access
دفاتر ترميز متباعدة	Sparse codebook
تضميم مكاني	Spatial multiplexing
حذف التداخل التتابعي	Successive interference cancellation
الترميز التراكبي	Superposition coding
كاشف الرمز	Symbol detector
نشر الرموز على الموارد الراديوية	Symbol to Re Mapping
الطريقة المزدوجة بتقسيم الزمن	time division duplex
النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني	Time division multiple access
حيز زمني	Time slot
اتصالات عالية الوثوقية منخفضة زمن التلبث	Ultra-Reliable Low Latency Communication
تصميم الشكل الموجي	Waveform Design

قائمة الاختصارات List of Abbreviations

الاختصار	المصطلح بالانكليزي	المصطلح بالعربي
AMPS	Advanced Mobile Phone Services	خدمات الهواتف النقالة المتقدمة
BPSK	Binary phase-shift keying	التبديل بإزاحة الطور الثنائي
BS	Base Station	محطة قاعدية
CDMA	Code division multiple access	النفاذ المتعدد بتقسيم الرمز
CDS	Channel-dependent selection	الاختيار بالاعتماد على معلومات القناة
CP	Cyclic prefix	بادئة دورية
CSI	Channel state information	معلومات حالة القناة
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	الطيف المنثور ذو التتابع المباشر
EMBB	Enhanced Mobile BroadBand	المجال العريض المعزز
EPA	Expectation Propagation Algorithm	خوارزمية توقع الانتشار
FD	Full-duplex	الازدواج الكامل
FDD	frequency division duplex	الازدواج بالتقسيم الترددي
FDMA	Frequency division multiple access	النفاذ بالتقسيم الترددي
FIR	Finite impulse respons	الاستجابة النبضية المنتهية
GF	Grant Free	خالي من الضمان
GOCA	Group orthogonal coded access	النفاذ المرمز المتعامد المجمع
ICI	Inter Carrier Interference	تداخل بين الحوامل
IDMA	Interleave-division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم التشابكي
IGMA	Interleave-grid multiple access	النفاذ المتعدد الشبكي
IOT	Internet of things	انترنت الأشياء
ISI	Inter symbol Interference	تداخل بين الرموز
JOSNLS	Joint Access Control and NOMA Selection Algorithm	خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ
LCRS	Low coding rate spreading	النثر بمعدل ترميز منخفض
LSSA	Low code rate and Signaturebased Shared Access	النفاذ التشاركي بالاعتماد على التوقيع والمعدل المنخفض الترميز
LTE	Long-Term Evolution	التطور طويل الأمد
MABs	orthogonal multiple access blocks	كتل نفاذ متعدد متعامدة
MAP	Maximum a posteriori probability	أقصى تقدير لاحتمال لاحق

MEC	Multi-Access Edge Computing	الحوسبة متعددة النفاذ
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	المتعددة الدخل المتعددة الخرج
MMSE	Minimum Mean square Error	الحد الأدنى لمتوسط الخطأ التربيعي
MMTC	Massive Machine Type Communication	الاتصالات ذات التوصيلات الكثيفة
MM-WAV	Millimeter wave	الأمواج الميليمترية
MPA	Message Passing Algorithm	خوارزمية تمرير الرسالة
MUD	Multi User Detection	الكشف عن عدة مستخدمين
MUSA	Multi-user shared access	النفاذ المشترك لعدة مستخدمين
MUST	Multiuser superposition transmission	الإرسال التراكبي متعدد المستخدمين
NCMA	Non-orthogonal Coded Multiple Access	النفاذ المتعدد المرمّز غير المتعامد
NFV	Network function virtualization	المحاكاة الافتراضية لوظائف الشبكة
NOCA	Non-orthogonal Coded Access	النفاذ المرمّز غير المتعامد
NOMA	Non-orthogonal multiple access	النفاذ المتعدد غير المتعامد
OFDM	Orthogonal frequency division multiple	النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد
OMA	Orthogonal multiple access	النفاذ المتعدد المتعامد
PAPR	Peak to average power ratio	نسبة الاستطاعة الذروة إلى الاستطاعة المتوسطة
PDMA	Pattern Division Multiple Access	النفاذ المتعدد باقتسام النمط
PIC	Parrallel interference cancellation	حذف التداخل المتوازي
RAR	Random Access Response	استجابة النفاذ العشوائي
RDMA	Repetition division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم التكراري
RS	Random select	الاختيار العشوائي
RSMA	Resource spread multiple access	النفاذ المتعدد بنشر الموارد
SC	superposition coding	الترميز التراكبي
SC-FDMA	Single carrier Frequency division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي بحامل واحد
SDMA	Space division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني

SDMA	Sparse code multiple access	النفاذ المتعدد باستخدام الرمازات المتباعدة
SDN	Software-Defined Networking	الشبكات المعرفة بالبرمجيات
SIC	Successive interference cancellation	حذف التداخل التتابعي
SINR	Signal to interference plus noise ratio	نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج
SMS	short messaging services	خدمة الرسائل القصيرة
TDD	time division duplex	الازدواج بتقسيم الزمن
TDMA	Time division multiple access	النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication	اتصالات عالية الوثوقية منخفضة زمن التلبث
GPRS	General Packet Radio Service	الخدمة الراديوية العامة للرزم
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution	معدلات البيانات المعززة لتطوير العالمي
ITU	International Telecommunication Union	الاتحاد الدولي للاتصالات
3GPP	3rd Generation Partnership Project	مشروع شراكة الجيل الثالث
LDS-SVE	Low density spreading with signature vector extension	النثر منخفض الكثافة مع تمديد شعاع التوقيع

الملخص

تهدف التقنيات الجديدة في الجيل الخامس لأنظمة الاتصالات اللاسلكية إلى تحقيق متطلباته المتزايدة بشكل سريع. يعتبر النفاذ المتعدد غير المتعامد إحدى التقنيات الواعدة التي تم بحثها بشكل كبير في السنوات الأخيرة من أجل إرسال الوصلة الهابطة والصاعدة للمساعدة في تحقيق جميع الأهداف في تحسين سعة النظام، زمن التلبث والكفاءة الطيفية ودعم أنظمة الإرسال الخالي من الضمان [1][10].

بهدف تخفيض تعقيد الكشف واحتمالية التصادم في إرسال الوصلة الصاعدة تم اعتماد نموذج نظام إرسال هجين مؤلف من نفاذ متعدد الطبقات غير متعامد في مجال الاستطاعة ونفاذ متعامد، حيث تُقسم الخلية إلى عدة طبقات بالاعتماد على مستويات الاستطاعة المستقبلة المحددة مسبقاً.

يقدم البحث خوارزمية أمثلة مقترحة تمكننا من تحديد القيم الأمثلية لمعاملات النظام المقترح والتي تناسب متطلبات التطبيق المفروض.

تم الوصول إلى هذه الخوارزمية من خلال إجراء دراسة تحليلية لإنتاجية توصيل هذا النظام والتي تمثل متوسط عدد المستخدمين النافذين إلى الشبكة خلال شريحة زمنية محددة بدون حدوث تصادم (اختيار عدة مستخدمين لنفس الموارد الراديوية)، حيث بينت النتائج العددية إمكانية تحقيق إنتاجية توصيل أعلى مقارنةً مع نظام نفاذ متعدد متعامد Orthogonal Multiple Access (OMA) خصوصاً عند معدلات نقل منخفضة والتي تنخفض عندها جودة الوصلة. لذلك يجب إجراء مقايضة بين إنتاجية التوصيل وجودة الوصلة من خلال التحكم بالحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج المطلوبة أو تطوير آليات جديدة في المستقبل تساهم في انقاص معدل خطأ البت، حيث تم اقتراح آلية تعتمد على تغيير كوكبة التعديل المستخدم في مرسل كل مستخدم وفقاً للطبقة المختارة والتي قدمت تحسينا مقبولا من أجل قيم منخفضة لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج خصوصاً عند نسب إشارة للضجيج عالية.

مقدمة عامة

شهد العالم تطوراً تكنولوجياً كبيراً في مختلف المجالات خلال السنوات الأخيرة والذي أدى إلى ظهور بيئات عمل تُشكل منظومات الاتصالات اللاسلكية النقالة أو الثابتة أحد أهم عناصرها من أجل تأمين تبادل المعلومات بين مختلف التجهيزات. واكبت شبكات الاتصالات اللاسلكية النقالة مختلف التطبيقات والسيناريوهات من خلال تطوير أجيال الأنظمة الخليوية بمعدل جيل كل عشر سنوات حتى الجيل الحالي 4G. لكن مع التزايد المتسارع والمستمر لهذه الأنظمة ظهرت تحديات جديدة لا تستطيع هذه الأجيال التغلب عليها مثل سرعة نقل المعطيات، زمن التلبث latency، استهلاك الطاقة وكثافة التوصيل...الخ، بسبب محدودية الموارد الراديوية، و وزيادة حجم البيانات بشكل كبير وظهور تطبيقات حرجة تتطلب زمن تأخير شبه معدوم ما أدى إلى الحاجة إلى تطوير جيل جديد 5G قادر على تلبية متطلبات التطبيقات الجديدة مثل انترنت الأشياء IOT التي تغطي مجالاً واسعاً من التطبيقات في مختلف مجالات الحياة الصناعية، الزراعية والطبية...الخ. [4].[1]

تعتبر تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامدة NOMA من الحلول الواعدة لتحسين معايير الأداء في شبكات الجيل الرابع 4G للأنظمة الخليوية ومواكبة متطلبات شبكات الجيل الخامس 5G وذلك من خلال الترميز التراكبي Superpostion Coding (SC) لإشارات المستخدمين في مجالات مختلفة في جانب المرسل واستخدام تقنيات حذف التداخل IC وكواشف متعددة المستخدمين Multi user detection (MUD). تقدم هذه التقنيات آليات جديدة لتشارك الموارد بهدف تحسين الفعالية الطيفية وزيادة سعة النظام بالإضافة إلى تحقيق عدالة بين المستخدمين [44],[30] [9] كما تدعم الإرسال الخالي من الضمان Grant Free GF في إرسال الوصلة الصاعدة UL الذي يقلل زمن التلبث latency. [8],[15], [17], [52]

مشكلة البحث

- يعتبر الطلب المتزايد بشكل كبير على معدلات النقل العالية و النفاذ إلى الشبكة من أكبر التحديات التي تواجه الشبكات الحالية. بسبب محدودية المجال الطيفي والموارد المتاحة (التردد، الزمن...)
- تم تطوير تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد كأحد الحلول الواعدة في أنظمة الجيل الخامس لما توفره من موارد إضافية والعديد من المكاسب لكنها تحتاج إلى وضع معايير وإطار عمل موحد لمعالجة التحديات والمسائل المطروحة للبحث مثل:

1. الحد الأعظمي لعدد المستخدمين الذين يمكن تخديمهم حيث يرتبط هذا الحد بعدد الطبقات الذي تتعلق قيمته بعدة قيود يجب دراسة أثرها ومراعاة انعكاس هذا العدد(عدد الطبقات) على تعقيد وقدرة المستقبل على حذف التداخل.
2. استنتاج النماذج الرياضية التي تعبر عن تأثير مختلف المعاملات على الأداء وتعطي أمثل توزيع للموارد.

الهدف من البحث

يهدف البحث إلى صياغة مسألة أمثلة انتاجية التوصيل (عدد المستخدمين القادرين على النفاذ إلى الشبكة بشكل صحيح) مع المحافظة على معدل النقل لكل مستخدم وعدم تجاوز الحد الأعظمي لاستطاعة الإرسال مع مراعاة معدل خطأ البت من خلال إجراء دراسة تحليلية للمعاملات والقيود المؤثرة على إنتاجية توصيل نظام إرسال هجين مقترح مؤلف من نفاذ متعدد الطبقات غير متعامد ونفاذ متعامد تم اقتراحه بهدف تخفيض تعقيد الكشف واحتمالية التصادم (اختيار عدة مستخدمين لنفس الموارد الراديوية)، ، ومقارنة النتائج مع نظام نفاذ متعدد متعامد OMA ، ثم توظيف نتائج هذه المسألة في إيجاد القيم الأمثلية لمعاملات النظام المقترح حسب متطلبات التطبيق المرغوب استخدامه.

أبحاث ودراسات مرجعية

جذبت تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA انتباه العديد من الباحثين بعد أن وافقت شراكة الجيل الثالث 3GPP في العام 2014 على دراسة النفاذ المتعدد غير المتعامد تحت مسمى الإرسال المتراكب لعدة مستخدمين في الوصلة الهابطة MUST [20]، حيث ظهرت العديد من الأبحاث التي اهتمت باستخدام هذه التقنيات في إرسالات الوصلة الصاعدة والهابطة نذكر منها:

1. أكد كل من Liu.Y **[19]** و Wang. B, **[8]** في أبحاثهم على قدرة تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد على رفع إنتاجية النظام في كلا الوصلتين الصاعدة والهابطة وتحقيق مناطق سعة أفضل مقارنةً مع تقنيات OMA لكن اعتمدت هذه الأبحاث في تحليلها ودراستها على فرضية تخصيص مستخدمين اثنين بمستويي استطاعة مختلفين بينما تم في هذا البحث اعتماد عدد طبقات L محدود باستطاعة الإرسال العظمى.
2. أثبت الباحثان Larsson. E **[16]** و A. Azari **[38]** في دراساتهم أن الإرسال الخالي من الضمان GF مناسب لبعض سيناريوهات الجيل الخامس 5G مثل mMTC وURLLC لكن تواجه هذه الأنظمة مشكلة في زيادة احتمال التصادم الذي يزداد بتزايد عدد المستخدمين ويؤدي إلى انخفاض الأداءحيث تم التقليل من هذه المشكلة في بحثنا عن طريق استخدام النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA لما يوفره من موارد إضافية تقلل من احتمال التصادم
3. اقترح كل من A. Raza **[31]**, X. Meng و Y. Chen **[32]**عدة مستقبلات تتوافق مع مختلف تقنيات إرسال NOMA المستخدمة بهدف تحقيق أفضل أداء ولكن يتصاعد تعقيد المستقبل بزيادة الحمل الزائد في الشبكة ما يؤدي إلى تأخير أكبر واستهلاك أكبر للطاقة وبهدف تخفيض هذا التعقيد سنعتمد في هذا البحث على تطبيق تقنية النفاذ PD-NOMA بشكل هجين مع تقنيات النفاذ OMA .

4. تم إجراء دراسة لتأثير عدد الطبقات وإيجاد القيمة الأمثلية لها في نظام يعتمد النفاذ المتعدد غير المتعامد المتعدد الطبقات الخالي من الضمان كما أوصت الباحثة Abbas **[25]** وزملاؤها.

ثم قمنا باستخدام هذه الدراسة لصياغة مسألة أمثلة إنتاجية التوصيل انطلاقا من العلاقات التي استنتجها Hui Jiang **[26]** وزملاءه حيث أضفنا قيد السعة في هذا البحث إلى جانب قيد الاستطاعة العظمى للإرسال كما قمنا بدراسة معدل خطأ البت من أجل القيم الناتجة عن مسألة الأمثلة.

مساهمات البحث

تكمن أهمية البحث من كون تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA واعدة في الجيل الخامس لأنظمة الاتصالات الخليوية وما يليه لما تقدمه من مزايا في تحسين الفعالية الطيفية وتمكين الإرسال الخالي من الضمان Grant Free [17] بالإضافة إلى إمكانية استخدامها مع تقنيات النفاذ المتعدد المتعامد كخيار إضافي "add-on". يمكن تلخيص المساهمات الأساسية لهذا البحث كالآتي:

- دراسة مرجعية لمفهوم ومبدأ تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA وتصنيفاتها المختلفة وفقاً لمستوى العمل وطريقة تصميم المرسل من أجل إرسالات الوصلة الصاعدة، حيث نقدم نظرة شاملة لبنية المرسلات والمستقبلات بالإضافة إلى دراسة مرجعية لأنظمة الإرسال الخالي من الضمان GF.
- التحقق من مزايا النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA في الوصلة الصاعدة مقارنةً مع النفاذ المتعدد المتعامد OMA وذلك من خلال مقارنة تحليلية عددية لمجموع معدل نقل المعطيات الأعظمي الممكن تحقيقه في هذه الأنظمة.
- تحديد عدد الطبقات الأعظمي الممكن تحقيقه ضمن متطلبات جودة الخدمة وقيود الاستطاعة بهدف تحسين إنتاجية التوصيل وذلك من خلال دراسة أثر عدد الطبقات على السعة واستطاعة إرسال الأجهزة.

- تصميم خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات والقنوات الترددية الجزئية لإيجاد أفضل حل لمسألة القيمة العظمى لإنتاجية التوصيل في إرسال الوصلة الصاعدة لنظام هجين PD-NOMA و OMA.
- تقييم أداء جودة الوصلة الصاعدة للنظام الهجين PD-NOMA و OMA من خلال تنفيذ محاكاة لأداء معدل الخطا للنظام عند القيم الأمثلية لعدد الطبقات. بالإضافة إلى تقديم طريقة لتحسين هذا الأداء بالاعتماد على زيادة الحد الأدنى للمسافة الإقليدية بين نقاط كوكبة الترميز المتراكب SC من خلال تغيير كوكبة التعديل المستخدم وفقاً لمستويات الاستطاعة المخصصة لكل مستخدم.

منهجية البحث وأدواته

يهدف هذا البحث إلى دراسة مفهوم ومبادئ تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA مع التركيز بشكل أساسي على تحليل أداء النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA ودراسة فعالية تطبيقه مع نظام يعتمد تقنية النفاذ المتعدد المتعامد OMA لدعم الإرسال الخالي من الضمان GF، وذلك باستخدام بيئة ماتلاب MATLAB من أجل تقييم الأداء وفق المنهجية التالية:

1. يقدم الفصل الأول دراسة مرجعية لتطور أنظمة الاتصالات الخليوية عبر أجيالها المختلفة وصولاً إلى الجيل الخامس حيث نعرض أبرز التقنيات، المتطلبات، الأشكال الموجية والسيناريوهات المتوقعة في الجيل الخامس، بالإضافة إلى عرض مفهوم أنظمة الإرسال الخالي من الضمان GF والمعتمدة على NOMA.
2. يعرض الفصل الثاني دراسة مرجعية لمفهوم ومبادئ تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA والمستقبلات المستخدمة مع هذه التقنيات بالإضافة إلى مقارنة تحليلة بين النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA ونظام OMA .

3. يتضمن الفصل الثالث نموذج نظام هجين باستخدام تقنيتي النفاذ PD-NOMA و OMA وطرائق تخصيص الموارد التي توفرها هاتين التقنيتن في إرسال الوصلة الصاعدة UL، بالإضافة إلى دراسة تأثير عدد الطبقات في هذه الطرائق وتحليل سعة النظام.
4. تحليل إنتاجية توصيل Connection Throughput الوصلة الصاعدة للنظام الهجين في الفصل الرابع ودراسة المعاملات المؤثرة فيها بالإضافة إلى صياغة مسألة أمثلة إنتاجية التوصيل والخوارزمية المتبعة لحل هذه المسألة. كما يتضمن هذا الفصل تقييم نتائج حل المسألة المطروحة.
5. يتضمن الفصل الخامس دراسة أداء معدل خطأ Bit Error Rate (BER) البت للنظام الهجين المبين في الفصل الثالث من أجل النتائج المقدمة في الفصل الرابع والعمل على تحسين هذا الأداء منخلال تغيير كوكبة التعديل المستخدم وفقا لمستويات الاستطاعة لكل مستخدم.

1. الفصل الأول

مقدمة عن الأنظمة الخليوية

Communication systems

1.1. المقدمة

تساعد الأجهزة الخليوية بإبقاء العالم متصلاً مع بعضه البعض، حيث تدعم مجموعة واسعة من التطبيقات إضافةً لتأمين الاتصالات الضوئية ونقل المعطيات مثل: وسائل التواصل الاجتماعي، الألعاب عبر الانترنت، فيديو، القياسات الطبية وخدمات معتمدة على الموقع .... الخ. يعرض هذا الفصل الخواص الأساسية للأجيال السابقة للأنظمة الخليوية التي استخدمت بشكل أساسي إجرائية الإرسال المعتمد على الضمان Grant_based transmission وبرتوكولات النفاذ العشوائي بالإضافة إلى تقنيات النفاذ المتعدد المتعامد. كما يتضمن هذا الفصل عرض للمتطلبات الأساسية وأبرز التقنيات المقترحة لأنظمة الجيل الخامس 5G مع التركيز على الإرسال الخالي من الضمان Grant_free transmission.

2.1. أجيال الأنظمة الخليوية

بدأ تطور الأنظمة الخليوية في ثمانينيات القرن الماضي بعد اكتشاف ماكسويل Games Clark Maxwell الأمواج الالكترومغناطيسية التي يمكنها الانتشار بسرعة قريبة من سرعة الضوء، ومن ثم اكتشاف هرتز Heinrich Hertz طريقة لإنتاج وكشف هذه الأمواج التي سميت فيما بعد الأمواج الراديوية، حيث ظهر الجيل الأول للأنظمة الخلوي 1G ومن ثم توالى ظهور الأجيال اللاحقة بمعدل كل عشر سنوات وصولاً إلى الجيل الخامس نتيجة الانتشار الكبير والمتزايد لتطبيقات هذه الأنظمة[3]، حيث واكبت الأجيال السابقة (من 1G إلى 4G) للأنظمة الخليوية المتطلبات المتزايدة والناشئة في كل جيل بالاعتماد على معايير خلوية تستخدم تقنيات مختلفة بهدف الإدارة الأمثلية للموارد الفيزيائية المتاحة، حيث تضمنت هذه المعايير تقنيات نفاذ متعدد مثل FDMA/TDMA/CDMA /OFDMA و الطرائق المزدوجة مثل FDD/TDD .

ويختصر الجدول التالي أهم الفروقات بين هذه الأجيال.[1],[2]

الجيل الرابع	الجيل الثالث	الجيل الثاني	الجيل الأول	Service
VOLTE	Digital	Digital	Analog	**VOIVE**
YES	YES	YES	NO	**SMS**
YES	YES	NO	NO	**MMS**
YES	YES	NO	NO	**VIDEO CALL**
100Mbps-1Gbps	384Kbps-10Mbps	14.4-384 KbPS	–	**DATA RATE**
OFDM	CDMA	TDMA	FDMA	**Multiple Accesse**
LTE	WCDMA-CDMA2000	GSM-GPRS/EDGE	NMT-AMPS	**SERVICE /STANDARD**

3.1. أساسيات الجيل الخامس 5G

دعمت الأجيال السابقة لأنظمة الاتصالات الخليوية تواصل الناس مع بعضها البعض وتبادل حجم كبير من المعلومات فيما بينهم، لكن مع تزايد الطلب بشكل كبير على هذه الأنظمة وظهور تطبيقات انترنت الأشياء Internet of things (IOT) التي تحتاج إلى توفير اتصالات واسعة النطاق للآلات والأشياء مع أو بدون التدخل البشري مثل: الصحة الذكية smart health، البيوت الذكية smart homes، المعامل الذكية smart manufacturing، والنقل الذكي smart transportation.[16] كان لا بد من العمل

على تطوير جيل جديد يواكب المتطلبات الطارئة لهذه التطبيقات فمثلاً يجب أن تدعم أنظمة الجيل الخامس معدل نقل معطيات بزيادة من10 إلى 20 مرة عن شبكات الجيل الرابع (20Gbps في الوصلة الهابطة و10Gbps في الوصلة الصاعدة)، وكثافة توصيل تصل إلى مليون جهاز ضمن مساحة $1km^2$. بالإضافة إلى تخديم المستخدمين المتنقلين بسرعات عالية تصل حتى $500km/h$ وتخفيض زمن التلبث latency لأقل من $1ms$ (في شبكات الجيل الرابع زمن الاستجابة أكبر من $5ms$).[4] تفرض هذه المتطلبات مواصفات جديدة لبنية أنظمة الجيل الخامس من حيث امتلاك بنية مرنة وقابلة للتوسعة من أجل التكيف مع تنوع متطلبات المستخدمين والخدمات، امتلاك قدرة كبيرة لتوصيل الأجهزة للتعامل مع متطلبات نفاذ عدد ضخم من أجهزة انترنت الأشياء IOT، وتقديم مختلف الحلول الممكنة لأمن الشبكة من أجل كل أنواع الأجهزة والخدمات في الانترنت النقالة وانترنت الأشياء. كذلك يجب أن تكون هذه الأنظمة قادرة على: تحقيق سعة أعلى وتغطية أفضل من المحققة في شبكات الأجيال السابقة مع تخفيض تعقيد وتكلفة نشر الشبكة خصوصاً في الشبكات العالية الكثافة، تحقيق مرونة وفعالية باستخدام مختلف الموارد الطيفية، تخفيض التعقيد الناتج عن استخدام تقنيات النفاذ الراديوي المتعدد، تحقيق أمثلة ذكية بالاعتماد على معرفة سلوك المستخدمين ومحتوى الخدمات، وتحسين فعالية الطاقة لتواكب زيادة حركة المرور وتنوع الخدمات. [1]

حدد الاتحاد الدولي للاتصالات International Telecommunication Union (ITU) ثلاث حالات استخدام أساسية متوقعة في أنظمة الجيل الخامس للاتصالات الخليوية:

1) المجال العريض النقال المحسّن enhanced mobile broadband (eMBB) الذي يتضمن التطبيقات ذات سرعات نقل عالية جداً مثل نقل فيديو عالي الدقة وتطبيقات الواقع الافتراضي.

2) اتصالات عالية الوثوقية منخفضة زمن التلبث ultra-reliable and low latency communications (URLLC) من أجل تطبيقات تمتلك متطلبات حرجة مثل التطبيقات الصناعية، العمليات الجراحية عن بعد والنقل الآمن في الأنظمة ذاتية القيادة التي تفرض قيود زمن تلبث صغير جداً ووثوقية عالية.

3) الاتصالات ذات التوصيلات الضخمة massive machine type communications (mMTC) الذي يشمل تطبيقات ذات كثافة توصل عالية جداً بمعدلات إرسال معطيات منخفضة واستهلاك محدود للطاقة مثل تطبيقات انترنت الأشياء IOT.[4]

تتطلب السيناريوهات المتوقعة في أنظمة الجيل الخامس تقنيات جديدة متطورة من أجل مواكبة متطلباتها، حيث أصبحت التقنيات المستخدمة في الأجيال السابقة غير قادرة على تحقيق المواصفات المطلوبة في بعض الحالات، ما دفع الباحثين إلى تطوير تقنيات جديدة تتيح موارد جديدة وتساهم في الأداء بما يرضي المتطلبات والقيود المفروضة ومن هذه التقنيات:

1.3.1. الاتصالات المتعددة المداخل المتعددة المخارج الكثيفة Massive MIMO

تعتمد هذه التقنية على قانون الأعداد الكبيرة باستخدام عدد ضخم من عناصر الهوائي لمعالجة الإشارة المرسلة أو المستقبلة، حيث تتوسط إشارات الضجيج والخفوت في الأجهزة والقناة عندما يتم تضميم عدد كبير من الإشارات. توفر تقنية massive MIMO ربح تضميم مكاني spatial multiplexing يؤدي إلى زيادة معدلات نقل المعطيات، بالإضافة إلى ربح الهوائي الممكن زيادته من خلال تركيز الاستطاعة في الاتجاهات المطلوبة وإبطالها في اتجاهات الإشارة غير المرغوب فيها باستخدام تقنيات تشكيل الحزمة Beamforming ما يتيح تحسين الفعالية الطيفية وزيادة منطقة التغطية المطلوبة أو تقليل استطاعة الإرسال. تواجه هذه التقنيات صعوبات وتحديات في بعض المواضيع مثل: تنفيذ العتاد الصلب وأعطاله، ترابط القناة والتعديل.[5][4]

2.3.1. اتصالات الأمواج المليمترية mm-Waves Connections

تستخدم الحزم الترددية العالمية التقليدية المعتمدة حالياً حوامل ترددية أقل من 6GHz، حيث وصلت إلى حالة عدم إمكانية مواكبة التزايد السريع لمتطلبات أنظمة الاتصالات اللاسلكية بسبب انشغال شبه كامل للطيف الراديوي في هذا المجال. لذلك يوجد اهتمام كبير باستبدال هذه المجالات بترددات الأمواج المليمترية Millimeter waves (mmwave) والتي تتيح نطاقات طيفية عريضة جداً. تمتد مجالات الأمواج المليمترية من 6GHz وحتى 100GHz متضمنة الترددات 6GHz,15GHz,28GHz, 38GHz, 60GHz, and E-band (71–76 GHz, 81–86 GHz) حيث تم استخدام مثل هذه الترددات عام 1990 مثل استخدام الترددين 20GHZ, 40GHz في أنظمة ذات عدة نقاط موزعة محلياً local multipoint distribution systems and backhaul services (LMDSs)، والتي كانت مكلفة اقتصادياً من جهة التنفيذ العملي للعتاد الصلب. تم تطوير تقنيات إنتاج CMOS للحصول على تخفيض كبير بالتكلفة والحجم، لكن مايزال استمرار تأسيس دارات استطاعة أكثر فعالية، صفيفات هوائي ذكية وأجهزة الطيف مطلوب لاستخدام ترددات الأمواج المليمترية كإحدى الحلول العالية الكفاءة لتطوير التقنيات المستقبلية لأنظمة الاتصالات اللاسلكية. حيث يمكن تحسين أداء الأنظمة الخليوية من خلال توفير مساحات طيفية عريضة، وتنفيذ صفيفات الهوائيات (أو حتى هوائي واحد) بشكل عملي أكثر في الأجهزة ذات الدارات والبطاقات الصغيرة الحجم من خلال تصغير حجم الهوائيات بشكل كافي وذلك بسبب طول الموجة الصغير (مناسب لتقنيات Massive MIMO التي تتطلب عدد ضخم من الهوائيات). بالإضافة إلى إمكانية إعادة استخدام الترددات ضمن مسافات قصيرة وذلك بسبب التخميد العالي للإشارات في الفضاء لحر ومدى الاختراق، حيث أثبتت قياسات القناة أن ضياعات انتشار الأمواج الملي مترية كبير جداً وبالتالي محدودية مجال الإرسال، وهذا يجعلها مناسبة أكثر لسيناريوهات الخلايا الصغيرة ذات متطلبات معدل نقل وكثافة مستخدمين عاليين. [4][3]

3.3.1. تقنيات تشكيل الحزمة Beamforming Technolgies

تشكيل الحزمة هو إجرائية معالجة إشارة تُستخدم مع صفيفات متعددة من الهوائيات multiple arrays of antennas في جانب المرسل و/أو في جانب المستقبل لإرسال أو كشف عدة إشارات من عدة مستخدمين مرغوبين بآن واحد من أجل زيادة سعة النظام وتحسين الأداء. يمكن تشكيل الحزمة من خلال تجميع العناصر في صفيفة منظمة بحيث تضاف الحزم الموجهة بشكل مباشر باتجاه محدد ويتم إهمال الحزم الأخرى. ماتزال هذه التقنية مدعومة من قبل مشغلات advanced LTE and LTE لتحقيق التكامل مع أنظمة الاتصالات اللاسلكية. تتجه معظم الأبحاث إلى تطبيق تقنيات تشكيل الحزمة في أنظمة Massive MIMO، والتي يمكن تنجيزها باستخدام مرشح استجابة نبضية منتهي finite impulse response (FIR) للحصول على أفضل (أمثل) تشكيل حزمة من خلال تغيير أوزان المرشح بشكل متكيف، حيث يمكن تحقيق الميزات التالية[3]:

تحسين الفعالية الطيفية Spectral Effeciency improvment: يمكن تحسين السعة بواسطة عناصر هوائي تشكيل الحزمة من خلال التحكم باستطاعة إشارات الوصلة الصاعدة والهابطة المستخدمة لمعلومات سلسلة التدريب training لتحسين جودة الإشارة.

زيادة أمن النظام: يمكن تحقيق أمن الطبقة الفيزيائية باستخدام تقنية تشكيل الحزمة من خلال تقليل احتمال استقبال الإشارة المرسلة من قبل متنصت (مستقبل غير شرعي)، حيث الإشارة المرسلة مركزة بشكل أساسي باتجاه المستقبل المقصود.

قابلية التطبيق في نطاق الأمواج المليمترية: تحتاج الأنظمة، التي تعمل على هذا المجال (ترددات عالية مثل 60GHz) وتملك طبيعة انتشار ضعيفة، إلى هوائيات صغيرة ذات توجيهية directivity عالية يمكن استخدامها (وضعها) في الأجهزة النقالة الصغيرة. لكن استخدام نظام حزمة ضيقة ثابتة

غير مناسب للتطبيقات النقالة المتحركة لذلك تعتبر تقنية تشكيل الحزمة إحدى الحلول المناسبة لمثل هذه التطبيقات.

4.3.1. الاتصالات المزدوجة الكاملة Full Duplex Communications

تسمح الطريقة المزدوجة الكاملة بإرسال واستقبال الإشارات في وقت واحد على نفس الحزمة الترددية ما يرفع سعة النظام مقارنةً مع الأنظمة النصف مزدوجة HD التقليدية التي تعتمد على تقسيم الزمن أو التردد، حيث يتم الإرسال في وقت مختلف عن الاستقبال على نفس الحزمة الترددية أو الإرسال والاستقبال في وقت واحد على حزم ترددية مختلفة. تساهم الطريقة المزدوجة الكاملة FD في تحسين الفعالية الطيفية للتقنيات الأخرى المقترحة لأنظمة الجيل الخامس التي تعمل ضمن طيف محدود حيث تسمح بالإرسال والاستقبال على نفس الحزمة الترددية وفي نفس الوقت، لكن تتأثر بالتداخل الذاتي self-interference (SI) الناتج محلياً من تسرب إشارة الخرج المحلي إلى الدخل بالإضافة إلى إشارات التداخل المنعكسة عن بعض العوائق القريبة.[6][4]

5.3.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA:

تُوفر تقنيات NOMA موارد جديدة وترفع عدد المستخدمين وسعة النظام، حيث يتشارك المستخدمون الموارد المتاحة (تردد – زمن) والمتواجدة في نفس الطبقة المكانية وذلك من خلال تضميم إشاراتهم في مجالات مختلفة (مثل مجال الاستطاعة أو مجال الترميز) بطريقة غير متعامدة. لكن تعاني هذه التقنيات من التداخل بين الإشارات المستقبلة الناتج عن عدم التعامد والذي يتم تقليله أو إلغاؤه باستخدام تقنيات مثل حذف التداخل التتابعي أو كشف عدة مستخدمين Multi User Detection(MUD) [4] ,[1], يتميز التضميم المتعامد بالتقسيم الترددي مع بادئة دورية CP-OFDM باستغلال كامل للطيف بما يحقق فعالية طيفية عالية بالإضافة إلى ممانعته لتداخل الرموز ISI الناتج عن الخفوت متعدد المسارات، لكن تكون المسافة الترددية بين الحوامل ثابتة ويسبب استخدام البادئة الدورية CP هدر في الموارد كما يكون الإشعاع خارج الحزمة عالي نسبياً. لذلك لا يتناسب استخدام الشكل الموجي CP-OFDM مع جميع تطبيقات أنظمة الجيل الخامس G5، حيث سيستخدم الشكل الموجي OFDM في هذه الأنظمة بعد إجراء بعض التحسينات عليه من خلال النوافذ والترشيح لما يُحققه من ميزات. [1] كذلك يوجد العديد من الأشكال الموجية المرشحة لاستخدامها في الجيل الخامس 5 G ومنها: [22][28]

- **الحوامل المتعددة ببنك من المرشحات (FBMC) Filter Bank Multi carrier modulation [22]:**

الذي يُشبه الشكل الموجي OFDM من حيث تقسيم الطيف إلى حزم جزئية متعامدة لكن يختلف عنه بتطبيق مرشح على كل حامل جزئي مما يؤدي إلى مرونة تحكم أكبر في الإشعاع خارج الحزمة من خلال تخفيض مستوى الحزم الجانبية وبالتالي عدم الحاجة لإضافة بادئة دورية CP أو مجال حماية. يُعتبر الشكل FBMC ذو متطلبات تزامن منخفضة ويقدم تحسين فعالية زمنية وترددية بمقدار 10% في حالة إرسال رزم قصيرة، لكن يعاني هذا الشكل الموجي من التعقيد العالي الناتج عن الطول الكبير للمرشحات المستخدمة.

• **الحوامل المتعددة المرشحة العامة Universal Filtered Multi Carrier (UFMC)[28] :**

يجمع بين ميزات OFDM و FBMC ومعالجة العيوب في هذين الشكلين، حيث يعتمد OFDM على ترشيح الحزمة الكلية أما في الشكل FBMC يتم ترشيح كل حامل جزئي. بينما تُقسم الحزمة الكلية إلى حزم جزئية في الشكل الموجي UFMC ومن ثم يتم الترشيح على كل حزمة حيث تُقسم كل حزمة إلى عدة حوامل جزئية. يستخدم الشكل الموجي UFMC مرشحات قصيرة ما يقلل التعقيد مقارنةً مع الشكل FBMCبالإضافة إلى تداخل أقل بين الجوامل الجزئية، كما يمكن لهذا الشكل تحسين الفعالية الزمنية والترددية بمقدار 10% في كل الحالات، لكن بمتطلبات تزامن أعلى من الشكل.CP-OFDM

• **التضميم بالاقتسام الترددي المعمم Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)[28]:**

الذي يعتمد على الإدارة الديناميكية للموارد الطيفية المبعثرة حيث تُرسل المعطيات على حزم ترددية متباينة العرض من خلال الاعتماد على الترشيح الدائري بدل الترشيح الخطي في المجالين الزمني والترددي. يُحقق الشكل الموجي GFDM نسبة PARP منخفضة مقارنةً مع OFDM ويُعتبر مناسب للراديو الاستعرافي بسبب خواص التحسس وتشكيل الطيف الجيدة، لكن مع زيادة تعقيد المستقبل .

يهدف الجيل الخامس 5G لتحديد المعايير والتقنيات اللازمة لمواكبة المتطلبات الناشئة من حيث تحسين حركة المرور بمقدار 1000 مرة، عدد التوصيلات بمقدار 100مرة وفعالية طيفية بحوالي 5 إلى 15 مرة ...الخ.

4.1. النفاذ المتعدد Multiple Accesse

يتيح النفاذ المتعدد لعدد من المستخدمين الوصول إلى موارد الشبكة المحدودة بإرسال إشاراتهم بشكل مستقل إلى مستقبل مشترك عن طريق قنواتهم الخاصة ضمن المجال الترددي الكلي للنظام مع قيود الاستطاعة لكل مستخدم حيث يتم التشارك في قناة الاتصال الكلية بشكل فعال. طالما أن الطيف محدود

فإن المشاركة مطلوبة لزيادة سعة الخلية من خلال استخدام المجال الترددي المتاح في نفس الزمن من قبل المستخدمين وهذا يجب أن يتم بطريقة لا تقلل جودة الخدمة للمستخدمين وتتيح إمكانية الاتصال لأي شخص في أي مكان ووقت وبأي مخطط اتصال. غالبا ما يتم التنسيق والتزامن لهذه الإرسالات من قبل المحطة القاعدية. Base Station (BS) يمكن تصنيف مخططات النفاذ المتعدد إلى قسمين:النفاذ المتعدد المتعامد Orthogonal multiple access (OMA)، والنفاذ المتعدد غير المتعامد Non-orthogonal Coded Multiple Access (NOMA). [8][10]

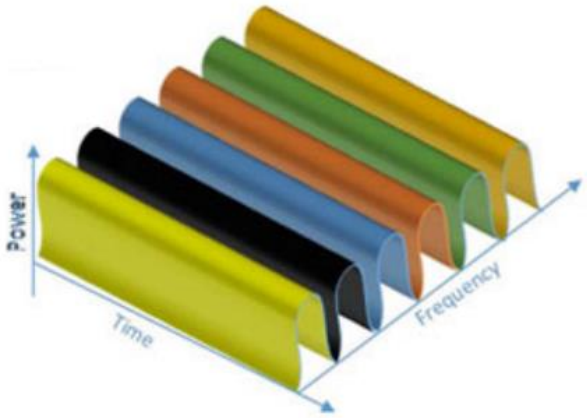
1.4.1. النفاذ المتعدد المتعامد OMA [1]

تستخدم تقنيات النفاذ المتعدد المتعامد قنوات متعامدة من أجل توفير الموارد الراديوية اللازمة لتبادل المعطيات بين الأجهزة والمحطة القاعدية، لذلك يمكن اعتبار التداخل بين إشارات الأجهزة معدوم وبالتالي يقوم المستقبل بكشف إشارة كل مستخدم بدون تداخل مع المستخدمين الآخرين مع أداء معدل خطأ مشابه لمعدل الخطأ بوجود مستخدم واحد. اعتمدت الأجيال السابقة للأنظمة الخليوية على مخططات النفاذ المتعدد المتعامد OMA والتي تشمل ما يلي:

1.1.4.1. النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي Frequency division multiple access

وهو مخطط النفاذ المتعدد (تقنية النفاذ في الجيل الأول 1G) الأكثر كلاسيكية المستخدم في أنظمة الاتصالات النقالة حيث يتم تقسيم المجال الترددي (عرض الحزمة) المتاح للنظام إلى عدة قنوات ويعطي لكل مستخدم نشط قناة من هذه القنوات كما هو مبين في الشكل (1-1). يتطلب التقسيم الترددي FDMA تباعد ترددي بين القنوات من أجل عدم حدوث تراكب overlapping بين الأطياف المتجاورة أو تقليل أثر هذا التراكم والذي يمكن أن يحدث بسبب عدم دقة المهتزات المحلية أو من التأثيرات اللاخطية لمضخمات الإستطاعة[1].

يتميز النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي بالفعالية عندما تكون حركة المرور الثابتة مطلوبة لإدارة عدد أقل من المستخدمين، كذلك فإن مسوي القناة channel equilization يصبح أبسط مما هو في تقنيات النفاذ الأخرى التي تستخدم كامل المجال الترددي. لكن يتطلب التقسيم الترددي عدد من المعدلات ومفككات التعديل في المحطة القاعدية مساوية لعدد المستخدمين المطلوب تخديمهم في آنٍ واحد وهذا يؤدي إلى تعقيد كبير وتكلفة زائدة، بالإضافة إلى مستوى الأمان المنخفض وهدر في الطيف الترددي بسبب المسافات الترددية بين القنوات مما يؤدي إلى عدم المرونة في التعامل مع المستخدمين ذوي متطلبات معدلات إرسال عالية. [7]

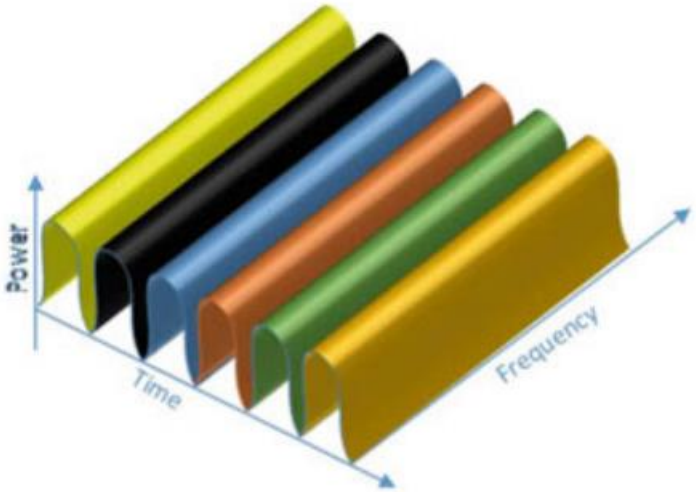


الشكل (1-1) النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي FDMA [1]

2.1.4.1. النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني Time division multiple access

تتيح هذه التقنية لكل مستخدم الإرسال على كامل المجال الترددي المتاح لفترة من الزمن حيث يتم تقسيم كل قناة ترددية إلى عدد من الفترات الزمنية Time slot ويخصص لعدد من المستخدمين عدد من هذه الفترات التي تلبّي متطلبات معدّل إرسالها كما هو مبين في الشكل (1-2). يعتمد عدد هذه الفترات لكل مستخدم على عدة عوامل مثل التأخير المسموح فيه، عرض الحزمة المتاح وتقنيّة التعديل[7]. يتميّز التقسيم الزمني بتكلفة أقل من التقسيم الترددي التقليدي، بالإضافة إلى تحقيق معدلات أعلى بتوزيع الفترات الزمنيّة بحيث يتم استخدام الموارد بشكل فعال حسب الحاجة مما يقلل استهلاك الاستطاعة من

قبل الهواتف النقالة. لكن تتأثر الجودة بتداخل المسارات المتعددة (multipath interference) الذي يؤدي إلى تداخل بين الرموز (ISI) Inter symbol Interference وبالتالي الحاجة إلى فترات حماية لتحقيق التزامن وتقليل هذا التداخل بالإضافة إلى مسوّي متكيّف[1].



الشكل (1-2) النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني TDMA [1]

3.1.4.1. النفاذ المتعدد بتقسيم الرمز Code division multiple access

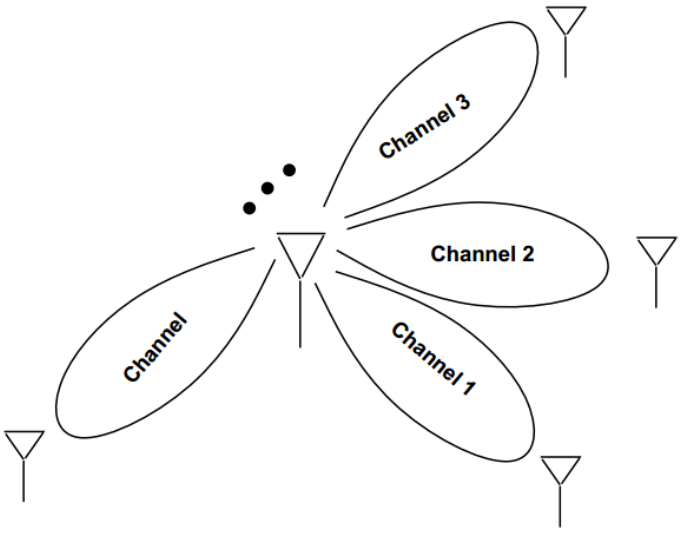
تتيح تقنية CDMA (المستخدمة في الجيل الثالث 3G) للمستخدمين النفاذ إلى الشبكة في آن واحد على نفس عرض المجال الترددي وذلك بنشر معطيات كل مستخدم بترميز وحيد بمعدل أعلى من إشارة المستخدم وهذا يؤدي إلى توسيع المجال الترددي. إن استخدام سلاسل النثر المعروفة من قبل المستقبل يسهل عملية استعادة الإشارات الأصلية ويقلل التداخل بين المستخدمين بالإضافة إلى مرونة أكبر في التعامل مع الخفوت المتعدد المسارات، وذلك بسبب الخواص التي تتمتع بها هذه السلاسل مثل ترابط ذاتي جيد وترابط بيني منخفض لتقليل تداخل بين الرموز. حيث تمتلك السلاسل المتعامدة ترابط ذاتي عالي وترابط بيني منخفض جداً لكنها حساسة للإنزياح الزمني مما يؤدي إلى زيادة أثر التداخل. أما السلاسل غير المتعامدة تحتاج إلى تزامن بين المستخدمين للحصول على أقل ترابط بيني. يتيح هذا

المخطط زيادة سعة النظام الذي يعتمد على متوسط معدل الخطأ المسموح عند عتبة نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج المقبولة في المحطة القاعدية مع القدرة على التحكم الفعال في الاستطاعة.[11]

الشكل (1–3) النفاذ المتعدد بتقسيم الرماز CDMA [1]

4.1.4.1. النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني Space division multiple access

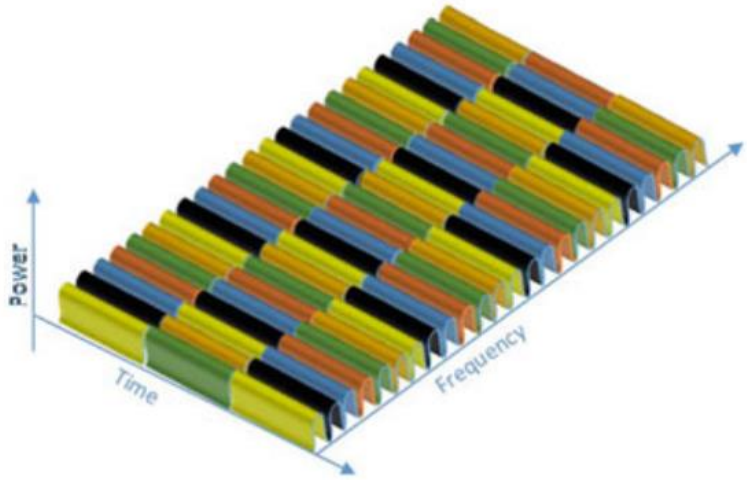
تعتبر إحدى تقنيات النفاذ المتعدد التي تحقق فعالية طيفية واستطاعة عاليتين وتحافظ على التعامد بين المستخدمين من خلال الفصل الزاوي بينهم بدون تقسيم التردد أو الزمن أو الرماز كما هو مبين في الشكل (1–4). يستخدم هذا التقسيم مع تقنيات أخرى مثلTDMA ، CDMA و FDMA مع هوائيات موجّهة بربح عالي في الاتجاه المطلوب واستجابة منخفضة أو صفريّة في الاتجاهات الأخرى مما يقلل التداخل بين المستخدمين وتمكين المحطة القاعدية من التخديم لمسافات أطول وجودة خدمة QOSأفضل، بالإضافة إلى إمكانية إعادة استخدام التردد ضمن الخلية. يعتمد عدد المستخدمين الذي يمكن تخديمه في وقت واحد على عدد عناصر مصفوفة الهوائي وقدرة المستقبل على الفصل بين المستخدمين حيث أن عدد الحزم وعرضها يعتمدان على ذلك.[12]



الشكل (1-4) النفاذ المتعدد بالتقسيم المكاني SDMA [12]

5.1.4.1. النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد Orthogonal frequency division multiple access

تم اقتراحه في الجيل الرابع 4G بسبب محدودية الموارد الطيفية وتزايد عدد المستخدمين، حيث يتم تخصيص الموارد الراديوية بشكل متعامد وهجين في المجالين الزمني والترددي كما هو مبين في الشكل (1-5)، وذلك من خلال إرسال المعطيات بشكل متوازي على عدة قنوات ذات حزمة ضيقة. يُقسم المجال الترددي إلى مجموعة حوامل جزئية متعامدة ذات فواصل ترددية صغيرة جداً مما يؤدي إلى زيادة الفعالية الطيفية وخفوت مسطح flat fading على كل قناة (لا حاجة لاستخدام مسوي معقد). إضافة إلى ذلك يتم استخدام بادئة دورية cyclic prefix CP لتقليل التداخل بين الحوامل (ICI) Inter Carrier Interference وتجنب الخفوت المتعدد المسارات[1]. يمكن لكل مستخدم أن يرسل معلوماته على عدة حوامل جزئية بشكل ثابت أو ديناميكي مما يتيح زيادة جودة الخدمة. لكن استخدام البادئة الدورية يسبب هدر في المواد الراديوية بالإضافة إلى الحساسية العالية للانزياحات الترددية. أيضاً تعاني هذه التقنية من مشكلة نسبة الذروة للاستطاعة المتوسطة PAPR في إرسالات الوصلة الصاعدة والناتجة عن لا خطية مضخمات الاستطاعة[55].



الشكل (1–5) النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد OFDMA [1]

6.1.4.1. النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي بحامل واحد Single carrier Frequency division multiple access

نموذج معدل عن تقنية OFDMA لتقليل أثر النسبة PAPR، حيث تُرسل الرموز المعدلة على الحوامل الجزئية المتعامدة بالتتابع وليس بالتوازي كما هو الحال في مخطط OFDM وذلك بإضافة مرحلة تحويل فوريه المتقطع DFT قبل دخولها إلى مرحلة تحويل فورييه المتقطع العكسي IDFT. في حالة طول DFT أصغر من طول IDFT يتم إرسال رموز صفرية على الحوامل المتبقية (zero padding) وستتمتع الإشارة المرسلة بخواص إشارة حامل واحد، أما في حالة التساوي فإن مرحلة IDFTتلغي مرحلة DFT [13].

7.1.4.1. تقنيات هجينة

تستخدم العديد من الأنظمة تقنيات هجينة من مخططات مختلفة لتمكين المستخدمين من النفاذ إلى الشبكة ومنها[7]:

- استخدام النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي المتعامد OFDMA مع القفز tone hopping لتحسين تنوع التردد.

- استخدام النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي FDMAمع الطيف المنثور بالتتالي المباشر Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)، حيث يُقسم المجال الترددي للنظام إلى حزم جزئية ويتم استخدام كل حزمة من قبل مستخدمين مختلفين مع نثر إشاراتهم على هذه الحزمة لتقليل التداخل بين الرموز ISI وتحقيق مرونة أكبر في تلبية متطلبات المستخدمين.
- استخدام النفاذ المتعدد بالتقسيم الزمني TDMA مع القفز الترددي FH لتقليل أثر التداخل القوي من الخلايا الأخرى بواسطة ترميز تصحيح الخطأ.

حققت تقنيات النفاذ المتعدد المتعامد OMA مستوى أداء مقبول نسبياً ضمن مختلف التطبيقات والسيناريوهات التي أُستخدمت فيها، لكن تعاني هذه التقنيات من محدودية الموارد المتعامدة الذي يؤدي إلى انخفاض فعالية استخدام هذه التقنيات لمواكبة المتطلبات الجديدة المتوقعة في سيناريوهات الجيل الخامس، خصوصاً مع ظهور تحديات جديدة في الحاجة إلى تخديم عدد كبير من المستخدمين ورفع الفعالية الطيفية ضمن موارد طيفية محدودة.

2.4.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد Non-orthogonal Coded Access

تُعتبر تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامدة NOMA من الحلول الواعدة في شبكات الجيل الخامس 5G وذلك بسبب قدرتها على مواكبة متطلبات، حيث بدأ مشروع شراكة الجيل الثالث 3rd Generation Partnership Project (3GPP) في الإصدار الثالث عشر بدراسة إرسال الوصلة الهابطة DownLink المتراكب لعدة مستخدمين من أجل التطور طويل الأمد(Long-Term Evolution (LTE بهدف التحقق من الإرسال غير المتعامد لعدة مستخدمين وتصميم مستقبلات متقدمةتوائم هذه الإرسالات[44][20]. في الإصدار الرابع عشر لتصميم أنظمة الراديو الجديد NR اقترح مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP خمسة عشر مخطط للنفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA لاستخدامها في إرسال

الوصلة الصاعدة UL بهدف دعم عدد ضخم من التوصيلات ودعم إجرائيات الإرسال الخالي من الضمان GF مع زمن تلبث منخفض latency ووثوقية عالية.[34][8]

تتمثل الفكرة الأساسية للنفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA باستخدام الترميز التراكبي superposition coding (SC) للإشارات المرسلة في مجالات مختلفة (مثل الاستطاعة والرماز)، حيث تُرسل المحطة إشارة واحدة بشكل مشترك على الموارد الفيزيائية في إرسال الوصلة الهابطة DL، والتي تمثل حاصل تراكب إشارات المستخدمين المراد إرسال معطيات لهم[9]. بينما تتراكم الإشارات المرسلة على الموارد الفيزيائية نفسها عند المحطة في إرسال الوصلة الصاعدة UL لتشكل إشارة واحدة مستقبلة يتم التعامل معها وفصل إشارات المستخدمين بالاعتماد على التصميم المشترك لأنظمة الإرسال والاستقبال. صُنفت تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA تبعاً لمجال الترميز التراكبي SC إلى قسمين[22]:

1) **النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة** PowerDomain_NOMA: الذي يستغل تباين شدة الإشارات المستقبلة الناتج عن اختلاف ربح قنوات الانتشار بين المستخدمين أو ضبط استطاعات الإرسال لإحداث هذا التباين في حالة القنوات المتماثلة.
2) **النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الرماز** CodeDomain_NOMA: الذي يستغل سلاسل نشر أو استخدام دفاتر ترميز مخلخلة أو التشابك/البعثرة Interleaver/Scrambled للمعطيات المراد إرسالها في المرسلات من أجل تمييز إشارات المستخدمين وفك ترميزها.

يختلف النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA عن المتعامد OMA نظرياً بغياب التعامد في طريقة إدارة الموارد، حيث تُعتبر كل تقنية تعتمد على تخصيص الموارد للمستخدمين بشكل غير متعامد من تقنيات NOMA. كذلك تم تصنيف بعض التقنيات ضمن النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA تبعاً

لمفهوم الحمل الزائد Over Loading الذي يُشير إلى أن عدد مستخدمي النظام أكبر من عدد الموارد المتاحة في النظام، حيث تُعتبر التقنيات التي تُحقق حمل زائد أكبر من 100% من تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA، بينما تندرج التقنيات التي يكون فيها عدد المستخدمين أقل من عدد الموارد ضمن تقنيات النفاذ المتعدد متعامد OMA. على سبيل المثال، عندما يكون عدد هوائيات الإرسال أكبر من عدد المستخدمين في أنظمة الاتصالات المتعددة الدخل والخرج لعدة مستخدمين MU_MIMO، تُصنف هذه الأنظمة على أنها إحدى طرائق النفاذ غير المتعامد NOMA. كذلك يُعتبر النفاذ المتعدد بتقسيم الرماز CDMA إحدى تقنيات NOMA عندما يكون عدد الرقاقات chips (عدد الرمازات) أكبر من عدد مستخدمي النظام وذلك من وجهة نظر الحمل الزائد[1].

تتوافق تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA مع التقنيات المتقدمة المقترحة في أنظمة اتصالات الجيل الخامس مثل: تقنية Massive MIMO وتقنيات تشكيل الحزمة، كما أنه يمكن استخدام تقنيات NOMA في الأنظمة التي تعتمد على النفاذ المتعدد المتعامد OMA من أجل تحسين مختلف معايير الأداء وتحقيق مرونة أكبر في إعادة استخدام الموارد ضمن هذه الأنظمة[19]. سنقدم في الفصل الثاني دراسة تفصيلية لتقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA.

5.1. أنظمة النفاذ العشوائي

نشأت بروتوكولات النفاذ العشوائي Random Access (RA) في عام 1970 بسبب الحاجة إلى تكوين اتصال (طرفي–حاسوب) و (حاسوب – حاسوب) لتأمين تبادل المعطيات فيما بينها على شكل رشقات عشوائية الحجم ومجال الإرسال ضمن قيد التأخير المنخفض نسبياً الذي يطلبه المستخدم. فيما بعد تزايدت حركة مرور المعطيات مع تزايد حجم المعلومات المتبادلة وعدد المستخدمين (الطرفيات)، وأصبح تخصيص القنوات الثابتة للمستخدمين غير فعال لما يسببه من هدر في استخدام الموارد وانخفاض

سعة القناة الممكن تحقيقها. لذلك تم العمل على توفير قناة واحدة عالية السرعة يتنازع عدد كبير من المستخدمين من أجل النفاذ إلى هذه القناة، حيث تم تطوير بروتوكولات النفاذ العشوائي لمعالجة سيناريو النفاذ المتعدد مع توفير مستوى جيد من الأداء[1].

1.5.1. النفاذ العشوائي المعتمد على الضمان (ضمان النفاذ)

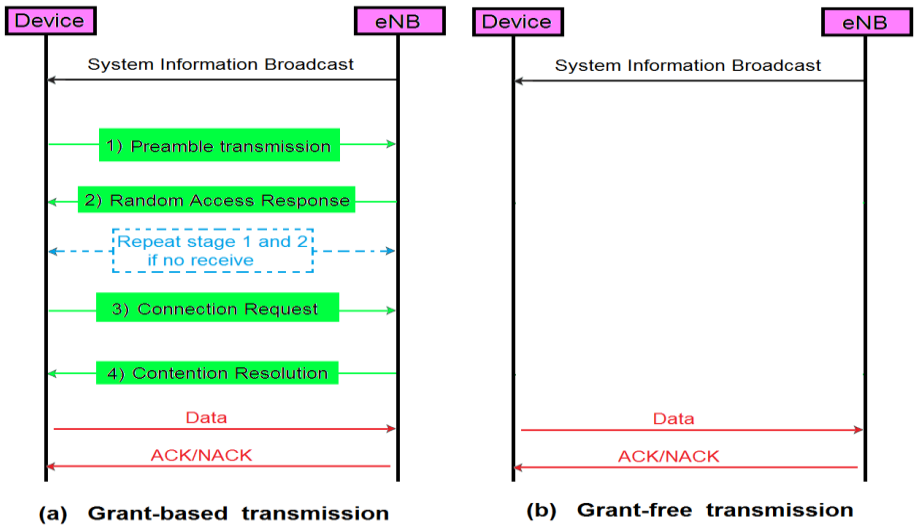
تعتمد أنظمة الاتصالات اللاسلكية الحالية (مثل LTE) على الإرسال المعتمد على الضمان Grant_based transmission حيث تحتاج إلى استخدام إجرائية النفاذ العشوائي المبينة في الشكل(1−6−a) لتمكين المستخدمين من النفاذ إلى الشبكة, حيث يتنافس المستخدمون على كتل الموارد المتاحة في الطبقة الفيزيائية لإرسال معطياتهم إلى المحطة القاعدية eNB (eNodeB) [31]. حتى يبدأ المستخدم بإرسال معطياته يجب أن يقوم في البداية بضمان حجز قناة الإرسال من خلال تنفيذ إجرائية النفاذ العشوائي RA التي تتألف من الخطوات الأربع التالية[18][16]:

1) **إرسال المهيء Preamble transmission**: يُرسل الجهاز في هذه المرحلة مقدمة preamble إلى المحطة eNB عبر قناة النفاذ العشوائي الفيزيائية، حيث يتم اختيار المقدمة بشكل عشوائي من بين 64 مقدمة محددة بشكل مسبق ومعروفة لدى المستخدمين والمحطة. لكن عندما يختار أكثر من جهاز نفس المقدمة يحدث التصادم وبالتالي لا تستطيع المحطة الكشف (التمييز بين الأجهزة) في هذه المرحلة.
2) **إستجابة الوصول العشوائي Random Access Response (RAR)**: تُرسل المحطة إجابة لكل طلب نفاذ مُرسل من المستخدمين بدون حدوث أي تصادم في المرحلة الأولى، حيث تحتوي هذه الإجابة على المعلومات الزمنية المطلوبة من قبل المستخدم للحفاظ على التزامن بالإضافة إلى ضمان الوصلة الصاعدة والمعرف المؤقت الخاص بالمستخدم من أجل جدولة الإرسالات اللاحقة.

كل جهاز لا يستقبل هذه الاستجابة ضمن فترة زمنية محددة يجب عليه إعادة الإرسال بدءً من المرحلة الأولى بعد فترة زمنية محدودة.

3) **طلب التوصيل Connection Request**: بالاعتماد على معلومات الوصلة الصاعدة المستلمة في المرحلة السابقة (الثانية)، يُرسل المستخدم رسالة التحكم بالموارد الراديوية Radio Resource Control (RRC) المتضمنة المعرف المؤقت للشبكة الراديوية Cell-Radio Network Temporary identifier (C-RNTT) ، والذي تم الحصول عليه من المرحلة السابقة بالإضافة إلى طلبات إعادة الاتصال. كذلك يتم في هذه المرحلة الكشف عن أحداث التصادم الغير مكتشفة في المرحلة الأولى.

4) **حل التنازع Contention Resolution**: تُرسل المحطة رسالة إقرار ACK إلى المستخدمين الذين اجتازوا المرحلة السابقة (الثالثة) بنجاح، حيث تتضمن هذه الرسالة معرف جديد يتم استبدال المعرف المؤقت القديم به لاستخدامه في الارسالات اللاحقة. يُعيد كل مستخدم لا يستقبل رسالة الإقرار ACK من المحطة إجرائية النفاذ العشوائي RA بالكامل بعد فترة زمنية عشوائية.

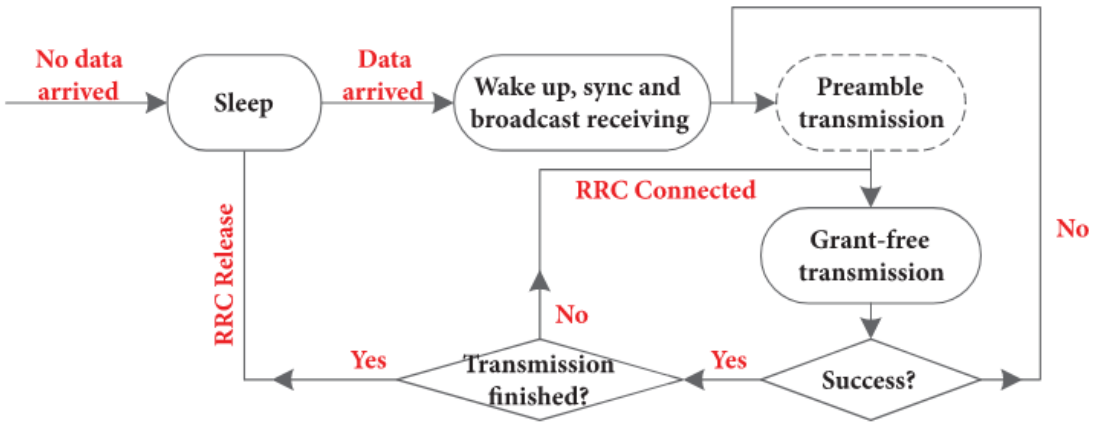


الشكل (1-6) إجرائية النفاذ العشوائي (a) RA المعتمدة على الضمان (b) الخالية من الضمان [18]

تعتمد إجرائية النفاذ العشوائي المبينة في الشكل(1-6-a)، على ضمان الوصلة الصاعدة وتبادل رسائل بين المستخدم والمحطة eNB لا تحتوي على أي معطيات مما يؤدي إلى تأخير أكبر في النفاذ إلى الشبكة أي تتضمن الإرسالات المعتمدة على الضمان إشارات زائدة signaling overhead تؤدي إلى زيادة زمن التلبث latency.أو يجب تحديد عدد الأجهزة النشيطة الممكن تخديمها بزمن تلبث محدد[16].

2.5.1. النفاذ العشوائي الخالي من الضمان

يواجه سيناريو Massive Machine Type Communications (mMTC) من أجل تطبيقات انترنت الأشياء IOT تحديات في تمكين ودعم إرسالات معطيات عدد ضخم من المستخدمين بطريقة أكثر فعالية من النفاذ المعتمد على الضمان وخصوصاً في التطبيقات التي تعتمد على إرسال رزم قصيرة (صغيرة الحجم) وتتسم بمحدودية موارد الطاقة[38]، حيث تتطلب أنظمة الإرسال المعتمد على الضمان فترات زمنية لحجز الموارد اللازمة قبل إرسال المعطيات مما يؤدي إلى استهلاك للطاقة والزمن. لذلك تم اقتراح أنظمة الإرسال الخالية من الضمان المبينة في الشكل(1-6-b) التي لا تحتاج إلى تشوير زائد signaling overhead وبالتالي دعم عدد أكبر من المستخدمين بزمن تلبث أقل[34]. في هذه الأنظمة، تُرسل المعطيات بدون انتظار قبول أو ضمان من المحطة (eNB) بطريقة " arrive and go"، كما هو مبين في الشكل (1-7)، حيث يبدأ الجهاز الإرسال الخالي من الضمان عند ورود معطيات إليه وذلك بعد تحقيق التزامن والحصول على بعض المعلومات الضرورية عن الوصلة الصاعدة من إرسالات الوصلة الهابطة. كما يمكن إرسال مقدمات Preambles في البداية لمزامنة الوصلة الصاعدة واكتشاف التصادمات وتقليل تعقيد الكشف في المحطة (eNB) من خلال تضمينها بعض المعلومات مثل توقيع النثر, مواقع المواد الراديوية وأزمنة إعادة الإرسال[15] .



الشكل (1-7) إجرائية الإرسال الخالي من الضمان في الوصلة الصاعدة [15]

يلغي الإرسال الخالي من الضمان طلب الجدولة الديناميكية ويقلل من عدد الإشارات الزائدة المطلوبة في إرسال الوصلة الصاعدة، كما يُسمح بالتنافس لزيادة استخدام موارد النظام أي أنه يمكن للمستخدمين الإرسال في نفس الوقت والتردد بدون تنسيق مع المحطة القاعدية. بالإضافة إلى توفير الطاقة حيث يستطيع الجهاز الإرسال عند وصول رزم صغيرة أو يبقى في حالة عدم نشاط عندما لا يحتاج إلى الإرسال[38]. هذه الميزات تجعل أنظمة الإرسال الخالي من الضمان مناسبة للسيناريوهات المقترحة في شبكات الجيل الخامس مثل سيناريو mMTC وسيناريوURLLC[17] . لكن تعاني هذه الأنظمة من زيادة احتمالية التصادم، الذي يحدث عندما يقوم عدد من المستخدمين بالإرسال على نفس الموارد (أي اختيار أكثر من مستخدم لنفس المورد)، وبالتالي تزايد تكرار عمليات الإرسال ما يؤدي إلى رفع زمن التلبث واستهلاك أكبر للطاقة خصوصاً بوجود عدد محدود من الموارد في سيناريو mMTC.

3.5.1. النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان GF_NOMA

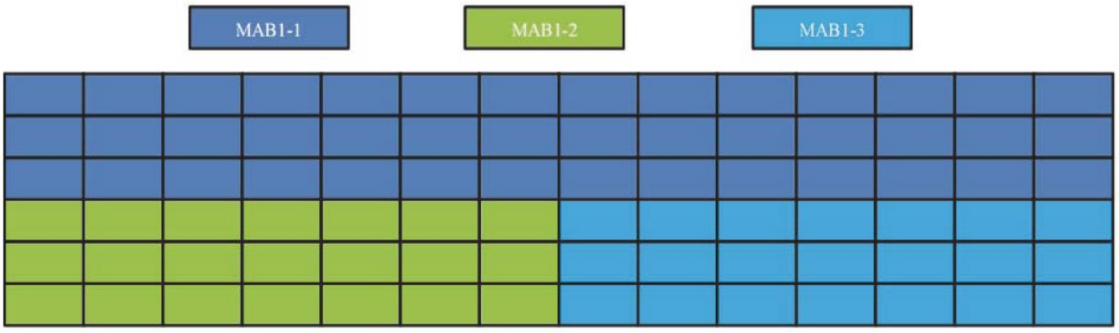
ناقش مشروع شراكة الجيل الثالث 3GPP في الإصدار الرابع عشر تصميم الإرسال الخالي من الضمان GF بالاعتماد على النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA في إرسال الوصلة الصاعدة UL، حيث تُضيف تقنيات NOMA موارد جديدة (مثل مستويات الاستطاعة المستقبلة، سلاسل النثر ودفاتر

الترميز) إلى الموارد الفيزيائية مثل التردد والزمن. تتيح الموارد الجديدة المتاحة باستخدام آليات NOMA توفير تنوع أكبر من خلال استخدامها كتواقيع فريدة للمستخدمين في أنظمة النفاذ المتعدد غير المتعامد الإرسال الخالي من الضمان GF-NOMA مما يساعد في تخفيض احتمالية التصادم، كمثال: يمكن لأكثر من مستخدم أن يرسلوا معطياتهم بشكل تراكبي على الحزمة الترددية ذاتها وبنفس اللحظة الزمنية بحيث يتم فصل إشاراتهم في المستقبل بشكل تتابعي من خلال تباين مستويات استطاعة الإشارات المستقبلة حيث أن كل مستوى من هذه المستويات يتم تمثيلة برمز فريد (توقيع). [12] لذلك يجب تصميم طرائق تخصيص الموارد تبعا لخصائص تقنيات NOMA المذكورة سابقاً بهدف إيجاد أفضل توزيع للموارد المحدودة والمتوفرة (مثل الزمن– التردد–الاستطاعة.....) ولتحقيق أفضل أداء (مثل: سعة القناة، عدالة بين المستخدمين، إنتاجية، معدل احتمال للخطأ، استهلاك الطاقة، زمن الاستجابة، أو حتى أكبر عدد ممكن من المستخدمين) ووفقاً لمتطلبات جودة الخدمة QoS ضمن مجموعة من القيود الموجودة في الشبكات اللاسلكية[18].

تتألف الموارد في نظام GF_NOMA من الموارد الراديوية وتواقيع النفاذ المتعدد حيث يتم تخصيص هذه الموارد بنوعين من الطرائق [15]:

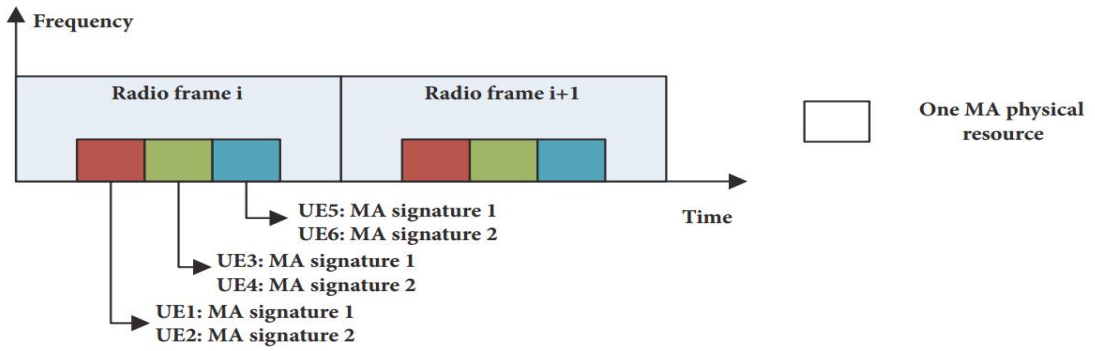
- طريقة الاختيار العشوائية للموارد: يختار المستخدم الموارد الراديوية وتواقيع النفاذ المتاحة بشكل عشوائي ثم يرسل معطياته، وهذا يسبب غموض في المحطة القاعدية بالنسبة لنشاط المستخدمين ويزيد تعقيد الكشف في المستقبل. للتغلب على هذه المشكلة يتم تقسيم الموارد الراديوية إلى كتل نفاذ متعدد متعامدة orthogonal multiple access blocks (MABs) in في المجالين الترددي والزمني كما هو مبين في الشكل (1–8)، حيث تشغل مختلف الكتل MABs موارد راديوية مختلفة ومن الممكن أن تختلف هذه الكتل في إعدادات الإرسال مثل: حجم كتل الإرسال، أنماط الإرسال

ومخططات الترميز والتعديل. يمكن إرسال هيئة هذه الطريقة في بث المحطة كمعلومات عن النظام، حيث يختار كل مستخدم نشيط كتلة موارد MAB ومن ثم توقيع نفاذ متعدد خلال كل مرحلة إرسال للمعطيات. بينما يستخدم المستقبل كاشف عدة مستخدمين بشكل متوازي على كل كتلة MAB حيث يمكن تخفيض التعقيد الحسابي للكشف الأعمى من خلال تخصيص كل كتلة MAB بعدد محدود من تواقيع النفاذ.



الشكل (1–8) مثال توضيحي لبنية كتل النفاذ المتعدد المتعامدة [15]

- طريقة التخصيص المحدد مسبقاً للموارد: في هذه الطريقة يتشارك أكثر من مستخدم الموارد الراديوية باستخدام تواقيع نفاذ متعدد مختلفة والتي تُستخدم لتحديد المستخدم النشط وتقليل التصادم. يوضح الشكل (1–9) مثال عن هذه الطريقة لجدولة ستة مستخدمين على ثلاث موارد راديوية، حيث يُخصص كل مستخدمين على المورد الترددي بتوقيعين مختلفين. 53



الشكل (1–9) تمثيل موارد النفاذ المتعامد المحددة مسبقاً في الإرسال الخالي من الضمان [15]

تستخدم أنظمة النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان GF_NOMA في إرسالات الوصلة الصاعدة UL إجرائية طلب إعادة هجين أتوماتيكي hybrid automatic repeat request HARQ من أجل إعادة إرسال المعطيات لأكثر من مرة في حالة عدم الوصول الناجح للإرسال الأولي وذلك من خلال دمج معلومات الإرسال الجديد مع الإرسالات السابقة. لكن بغياب ضمان الوصلة وعشوائية زمن وصول الإرسالات في هذه الأنظمة يجب على المحطة تحديد الإرسال الأول والإرسالات المكررة من أجل عملية HARQ والتي يمكن أن تُحدد عن طريق تقسيم كتل النفاذ المتعدد MABs إلى مجموعات متعددة تبعاً للعدد الأعظمي المسموح لعدد تكرار الإرسال حيث يختار المستخدمون كتل مختلفة بعدد تكرارات إرسال مختلفة أيضاً. كذلك يمكن جدولة الإرسالات المتكررة عن طريق إشارات التحكم أو الإشارات المرجعية المرسلة في الوصلة الهابطة DL والتي من الممكن استخدامها أيضاً من أجل الحصول على معلومات حالة القناة CSI من أجل تحديد معاملات الوصلة والتي يمكن أن تشمل مخطط التعديل والترميز، عدد التكرارات، حجم الموارد الراديوية للنفاذ المتعدد واستطاعة الإرسال اللاحقة[1].

6.1. الخلاصة

تُعتبر تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA من التقنيات الواعدة لتلبية متطلبات الأنظمة الخليوية المتزايدة والمتسارعة والتي شكلت الدافع الأساسي لظهور الجيل الخامس 5G، حيث الحاجة لتحسين مختلف معايير الأداء في هذه الأنظمة وتمكين الإرسال الخالي من الضمان GF. يتيح الإرسال الخالي من الضمان GF إمكانية تقليل زمن التلبث latency في إرسال الوصلة الصاعدة UL من خلال تقليل الإشارات المتبادلة بين المستخدم والمحطة القاعدية BS المستخدمة لضمان الوصلة والنفاذ إلى موارد النظام، لكن يزداد احتمال حدوث التصادم في هذا الإرسال والذي يمكن تخفيضه باستخدام تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA التي سندرس مبدأ عملها وبنيتها بالتفصيل في الفصل الثاني.

الفصل الثاني

النفاذ المتعدد غير المتعامد

Non-orthogonal Multiple Access

(NOMA)

1.2. مقدمة

تدعم تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA أنظمة الإرسال الخالي من الضمان GF المستخدمة في الوصلة الصاعدة UL بهدف تقليل احتمال التصادم في هذه الأنظمة. يعرض هذا الفصل البنية الأساسية لمخططات إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA المستخدمة في الوصلة الصاعدة UL وأبرز خواصها ومميزاتها، بالإضافة إلى بعض الخوارزميات المقترحة في المستقبلات الموائمة لهذه المخططات. سنركز في هذا الفصل على مبدأ ومفهوم النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA وأهم المميزات التي يقدمها مقارنةً مع النفاذ المتعدد المتعامد OMA.

2.2. البنية العامة والموحدة لنظام الإرسال والاستقبال في تقنية NOMA [29][30]

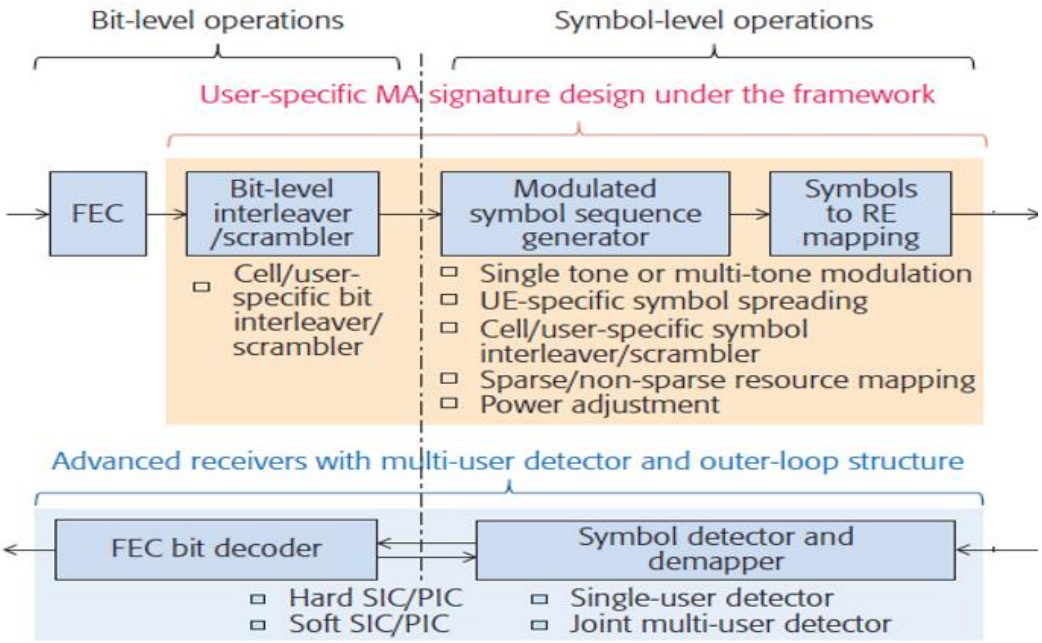
صُنفت مخططات إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA تبعاً لمجال الترميز التراكبي SC كما أشرنا في الفصل الأول، لكن يمكن تصنيف هذه المخططات تبعاً لمعايير مختلفة فمثلاً التصنيف المعتمد على مستوى بت/الرمز bit/symbol، حيث تعمل المخططات على مستوى البت في مجال ترميز القناة وبعثرة/تشابك البتات، بينما تقوم المخططات على مستوى الرمز بنشر الرموز وتوزيعها على الموارد[15]. كذلك يمكن تصنيف مخططات إرسال NOMA في الوصلة الصاعدة تبعاً لطريقة استخدام الموارد وطريقة تشكيل التواقيع إلى أربع أصناف، حيث تعتمد مخططات NOMA إما على الترميز Coding_based أو البعثرة Scrambling_based أو النثر Spreading_based أو التشابك Interleaving_based من أجل دعم عدد كبير من المستخدمين لتشارك الموارد الفيزيائية المحدودة. بشكل عام، تختلف مخططات NOMA في الوصلة الصاعدة عن بعضها البعض في طريقة تصميمها وعملها ولكن جميعها يمكن أن تدعم عدد كبير من المستخدمين عن طريق تشارك الموارد الفيزيائية بطريقة غير متعامدة ولكن على حساب زيادة أثر التداخل بين إشارات المستخدمين والذي ينعكس سلبا

على معدل النقل و معدل الخطأ بسبب هذا التداخل. يوضح الشكل (2–1) البنية العامة لنظام الإرسال والاستقبال لمخططات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA، حيث يجب تصميم المرسل والمستقبل بشكل مشترك من أجل تخفيض التعقيد الحسابي وتسهيل عمل كشف عدة مستخدمين MUD في تقليل أو حذف التداخل IC بين إشارات المستخدمين. يمكن تمثيل مخطط إرسال تقنيات NOMA في الوصلة الصاعدة بثلاث كتل رئيسية بالإضافة إلى مرمز القناة مع تصحيح خطأ الأمامي (FEC) Forward error correction والواجهة الراديوية مثل OFDM[34]:

a) **التشابك/البعثرة على مستوى البت Bit- level interleaver /scrambler:** تستخدم أنظمة Long Term Evolution (LTE) الحالية التشابك/البعثرة على مستوى الخلايا أو المستخدمين, حيث يمكن استخدام هذه المرحلة من أجل تشكيل تواقيع NOMA على مستوى البت بهدف تحقيق عشوائية أعلى للتداخل بين الخلايا أو بين المستخدمين.

b) **مولد سلسلة الرموز المعدلة Modulated symbol sequence generator** : في هذه المرحلة يتم تحويل سلسلة البتات المرمزة إلى سلاسل من الرموز لإرسالها على الموارد الراديوية في الهواء. يمكن أن تحتوي هذه المرحلة على التعديل, النثر، البعثرة أو التشابك على مستوى الرمز والتي تتم في مرسلات المستخدمين لتشكيل تواقيع NOMA من أجل تسهيل عملية كشف عدة مستخدمين في المستقبل بالإضافة الى زيادة عشوائية التداخل بين المستخدمين.

c) **مقابلة الرموز Symbols to Re Mapping:** في هذه المرحلة يتم توزيع الرموز على الموارد الراديوية المتاحة بشكل غير مخلخل non-sparse بحيث يُرسل كل رمز على كل الموارد أو بطريقة مخلخلة sparse حيث تُرسل الرموز على أجزاء من الموارد الراديوية.



الشكل (2–1) البنية العامة والموحدة لنظام الإرسال والاستقبال في تقنياتNOMA [34]

يعتمد تصميم المستقبل على طريقة الإرسال المستخدمة حيث من الممكن أن يتضمن المستقبل الأجزاء التالية [34]:

a) **كاشف الرمز Symbol detector and demapper:** تهدف هذه المرحلة إلى تمييز إشارات المستخدمين الموزعة على الموارد وكشفها بشكل منفصل Single user(SU) أو بشكل مشترك multi-user(MU) أو كلاهما، حيث أنه في كاشفSU يتم كشف إشارة مستخدم واحد ومعالجة إشارات باقي المستخدمين كضجيج. بينما في كاشف MU يتم فك ترميز معطيات كل مستخدم باستخدام معلومات من إشارة باقي المستخدمين.

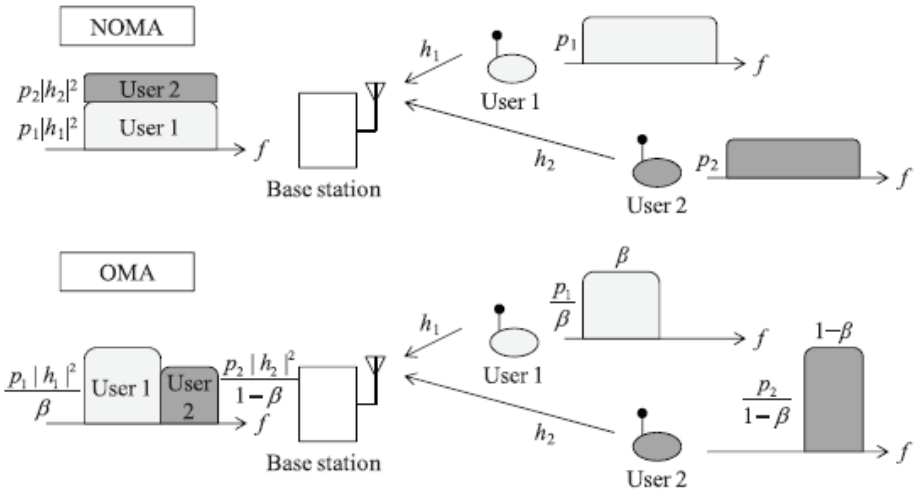
b) **مفكك الترميز Bit decoder:** في هذه المرحلة يتم فك ترميز القناة بالطريقة المناسبة والمقابلة لترميز القناة في المرسل حيث يمكن أن يرتبط مفكك الترميز مع الكاشف بحلقة خارجية للسماح بتكرار عملية الكشف من أجل حذف التداخل IC الذي يمكن أن يتم بشكل تتابعي Successive interference cancellation (SIC) أو متوازي Parrallel interference cancellation (PIC) في

مرحلة الكشف أو مفكك الترميز أو بشكل مستقل. يكون حذف التداخل راسخ hard IC عندما لا يُرسل مفكك الترميز أي معلومة عن المستخدم أو المستخدمين الذين تم فك إشاراتهم بنجاح إلى الكاشف، ويكون ناعم soft IC عندما تُرسل بعض المعلومات إلى الكاشف عن المستخدم أو المستخدمين.

3.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA

1.3.2. المبدأ الأساسي لتقنية PD_NOMA

يعمل النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA بالاعتماد على مبدأ الترميز التراكبي SC لإشارات المستخدمين في مجال الاستطاعة على نفس الموارد الراديوية وذلك بتخصيص استطاعات مختلفة لعدة مستخدمين كما هو مبين في الشكل(2-2)، حيث يتشارك أكثر من مستخدم الطيف الترددي المخصص لإرسال الوصلة الصاعدة UL بحيث يختلف مستوى الاستطاعة المستقبلة عند المحطة تبعاً لربح قناة كل مستخدم. أما في نظام OMA يتم تمييز المستخدمين عن طريق تخصيص كل مستخدم بجزء من الطيف الترددي المخصص للنظام[24].



الشكل (2-2) مقارنة استخدام الطيف بين نظام OMA ونظام PD-NOMA في الوصلة الصاعدة [24]

يعمل النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA على مستوى البت بالاعتماد على البعثرة، حيث تكون قيمة عناصر سلاسل البعثرة كلها تساوي الواحد[29]. تهدف تقنية PD_NOMA إلى تخفيف تأثير القريب – البعيد حيث تكون شدة الإشارة المستقبلة للمستخدم البعيد أقل من شدة الإشارة المستقبلة للمستخدم القريب بسبب ربح القناة المنخفض للمستخدم البعيد مقارنةً مع ربح قناة المستخدم القريب. وذلك من خلال تخصيص المستخدم البعيد باستطاعة أكبر ما يؤدي إلى تحسين أداء الوصلة الصاعدة UL لهذا المستخدم. تُستخدم خوارزمية حذف التداخل التتابعي SIC في المستقبل من أجل فصل وتمييز إشارات المستخدمين، كذلك يمكن للمستقبل استخدام تقنيات الكشف الخطية (مثل MMSE) من أجل تقدير الرموز المرسلة في كل مرحلة حذف تداخل [19][21].

2.3.2. مقارنة تحليلية عددية بين PD_NOMA و OMA في إرسال الوصلة الصاعدة

تم إجراء هذه المحاكاة العددية باستخدام برنامج ماتلاب والانطلاق من العلاقات في المرجعين [21][23] حيث يبين الشكل (2−3) نظام إرسال الوصلة الصاعدة UL ضمن خلية واحدة من أجل L مستخدم يتشاركون الإرسال على نطاق ترددي بعرض $1Hz$ بالاعتماد على النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMAواستخدام مستقبل حذف التداخل التتابعي SIC، حيث يُخصص كل مستخدم بمستوى استطاعة مختلف عن الآخر (أي أن عدد مستويات الاستطاعة هو L) . بفرض أن الوصلتين الهابطة والصاعدة متماثلتين (أي أنه يمكن تقدير معاملات القناة من إرسال الوصلة الهابطة واعتبارها نفسها للوصلة الصاعدة) وأن المحطة القاعدية ترسل معاملات الاستطاعة للمستخدمين في إرسال الوصلة الهابطة، يمكن كتابة الإشارة المستقبلة r في المحطة القاعدية BS كمايلي[23] :

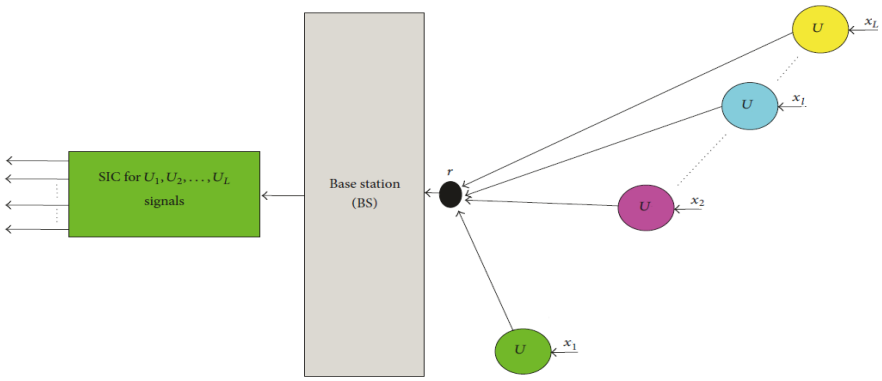
$$r = \sum_{l=1}^{L} h_l \sqrt{P_l}\, x_l + n \qquad (1-2)$$

h_l معامل قناة المستخدم رقم l بحيث يكون $|h_1|^2 \geq \cdots \geq |h_l|^2 \geq \cdots \geq |h_L|^2$ ،

P_l استطاعة إرسال المستخدم رقم l بحيث يكون $P_1 \leq \cdots \leq P_l \leq \cdots \leq P_L$، و n ضجيج أبيض غاوصي جمعي AWGN بمتوسط صفري وتشتت σ^2، L عدد مستويات الاستطاعة. بالاعتماد على النموذج المبين في العلاقة (2−1) تُعطى نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج SINR لكل مستخدم بالعبارة التالية[21]:

$$SINR_l = \frac{SNR_l}{\sum_{k=l+1}^{L} SNR_k + 1} = \frac{P_l |h_l|^2 / \sigma^2}{\sum_{k=l+1}^{L} P_k |h_k|^2 / \sigma^2 + 1} \qquad (2-2)$$

حيث $\mathrm{SNR_l} = \mathrm{P_l}|\mathrm{h_l}|^2/\sigma^2$ نسبة الإشارة المستقبلة للضجيج للمستخدم رقم l، و $\mathrm{SNR_k} = \mathrm{P_k}|\mathrm{h_k}|^2/\sigma^2$ نسبة الإشارة المستقبلة للضجيج للمستخدم رقم k والذي يكون ربح قناته أقل من ربح قناة المستخدم رقمl لذلك يُخصص باستطاعة أكبر من المستخدم رقمl .



الشكل (2−3) شبكة الوصلة الصاعدة PD_NOMA [21]

من أجل التبسيط والمقارنة نفرض وصلة صاعدة بمستخدمين User1, User2، أي $L = 2$ حيث يتم إجراء عملية حذف التداخل التتابعي SIC على مرحلتين في المستقبل. في المرحلة الأولى يتم كشف إشارة المستخدم الأول الأقرب وذلك من خلال اعتبار إشارة المستخدم الثاني الأبعد كضجيج وتُكتب نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج $SINR_1$ للمستخدم الأول كالآتي:

$$SINR_1 = \frac{SNR_1}{SNR_2 + 1} \qquad (3-2)$$

حيث SNR_1 نسبة الإشارة للضجيج للمستخدم الأول المبينة في العلاقة (2−2). أما في المرحلة الثانية التي تتم بعد الكشف الصحيح في المرحلة الأولى وطرح الإشارة المكشوفة من الإشارة الكلية المستقبلة r، يتم كشف إشارة المستخدم الثاني حيث لا يبقى تداخل من المستخدم الأول وتُصبح نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج $SINR_2$ للمستخدم الثاني مساوية لنسبة الإشارة للضجيج على فرض حذف التداخل بشكل كامل للمستخدم الأول أي:

$$SINR_2 = SNR_2 \qquad (4-2)$$

حيث SNR_2 نسبة الإشارة للضجيج للمستخدم الثاني المبينة في العلاقة (2−2). في هذه الحالة يمكن كتابة معدل نقل المعطيات للمستخدم الأول والثاني بالترتيب كما يلي:

$$R_1^{NOMA} = log_2(1 + SINR_1) \qquad (5-2)$$

$$R_2^{NOMA} = log_2(1 + SINR_2) \qquad (6-2)$$

حيث SINR_1 نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج للمستخدم الأول المبينة في العلاقة (2−3)، وSINR_2 نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج للمستخدم الثاني المبينة في العلاقة (2−4). يُعطى معدل نقل المعطيات الكلي في هذا النظام بالاعتماد على العلاقتين (2−5) و(2−6) كالآتي:

$$R_{sum}^{NOMA} = R_1^{NOMA} + R_2^{NOMA} \qquad (7-2)$$

من أجل المقارنة نفرض نظام OMA يعتمد على تقنية التقسيم الترددي FDMA حيث يتم تخصيص المستخدم الأول بجزء α من المجال الترددية والمستخدم الثاني بالجزء المتبقي $1 - \alpha$.

يُعطى معدل نقل المعطيات للمستخدم الأول والثاني بالترتيب كما يلي[21]:

$$R_1^{OMA} = \alpha\, log_2(1 + SNR_1/\alpha) \qquad (8-2)$$

$$R_2^{OMA} = (1-\alpha) log_2(1 + SNR_2/(1-\alpha)) \qquad (9-2)$$

حيث SNR_1 نسبة الإشارة للضجيج للمستخدم الأول المبينة في العلاقة (2-2)، SNR_2 نسبة الإشارة للضجيج للمستخدم الثاني المبينة في العلاقة (2-2). بالتالي يُكتب معدل نقل المعطيات الكلي في نظام OMA كالآتي:

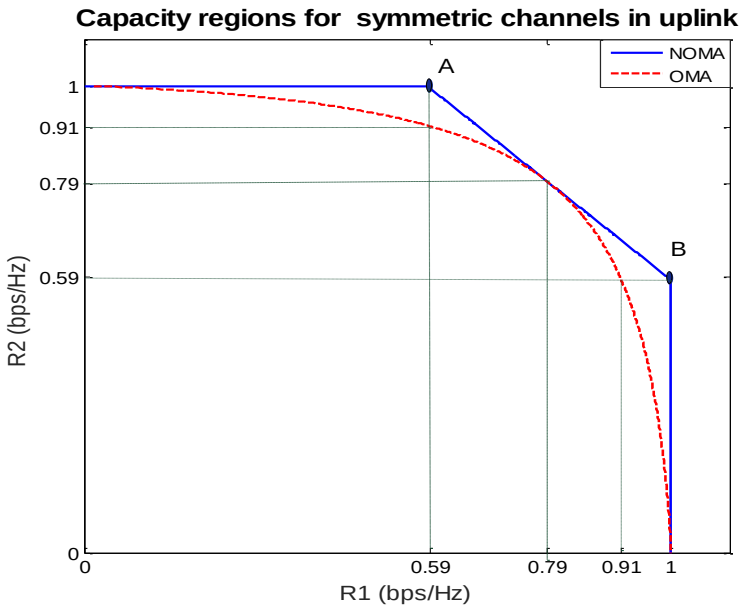
$$R_{sum}^{OMA} = R_1^{OMA} + R_2^{OMA} \qquad (7-2)$$

يبين الشكل(2-4) مناطق السعة لنظامي NOMA وOMA في حالة قنوات متماثلة للمستخدمين من أجل $SNR_1 = SNR_2 = 0dB$، بينما يمثل الشكل(2-5) مناطق السعة في حالة قنوات غير متماثلة من أجل $SNR_1 = 0dB, SNR_2 = 20dB$. في كلا الشكلين يتم تحقيق المعدلات عند النقطتين A وB في نظام NOMA تبعاً لترتيب عملية الكشف حيث تتحقق النقطة A عندما تكون $SINR_1 > SINR_2$ أي يبدأ المستقبل بكشف إشارة المستخدم الأول، أما في الحالة المعاكسة $SINR_1 < SINR_2$ يبدأ المستقبل بكشف إشارة المستخدم الثاني وعندها تتحقق النقطة B. تُحقق نقاط الخط الواصل بين النقطتين A وB معدل نقل معطيات كلي أعظمي مبين في العلاقة (2-7) وذلك من خلال التحكم بمعاملات الاستطاعة المخصصة لكل مستخدم. يُعطى معدل النقل لكل مستخدم عند النقطتين A وB كالآتي[21]:

$$A \overset{NOMA}{\Longleftrightarrow} \begin{cases} R_1^{NOMA} = log_2(1 + \frac{SNR_1}{SNR_2+1}) \\ R_2^{NOMA} = log_2(1 + SNR_2) \end{cases} \qquad (8-2)$$

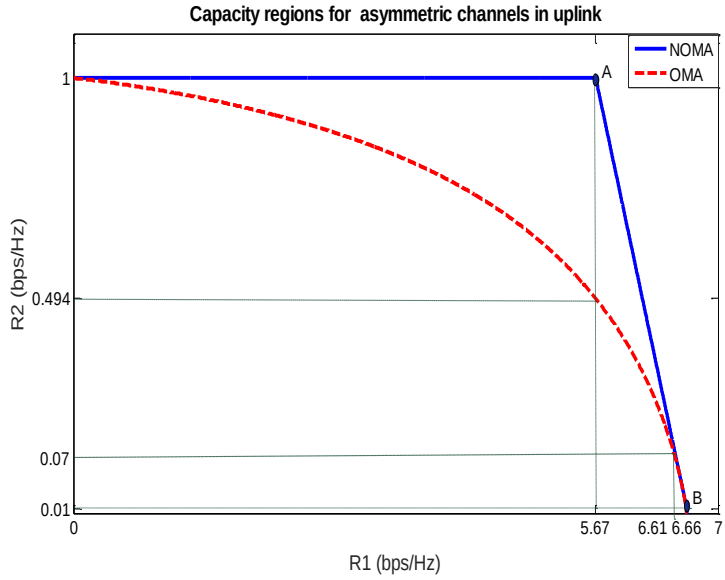
$$B \overset{NOMA}{\Longleftrightarrow} \begin{cases} R_1^{NOMA} = log_2(1 + SNR_1) \\ R_2^{NOMA} = log_2(1 + \frac{SNR_2}{SNR_1+1}) \end{cases} \quad (9-2)$$

تبين النتائج العددية في الشكلين (2−4) و(2−5) أن تحقيق معدل نقل المعطيات الكلي الأعظمي في نظام OMA يتم عند نقطة واحدة ويكون معدل النقل للمستخدم الأول مساوي للمستخدم الثاني في حالة قنوات متماثلة، بينما في حالة قنوات غير متماثلة يمكن لنظام OMA تحقيق معدل نقل المعطيات الكلي الأعظمي من خلال تخصيص الجزء الأكبر من المجال الترددي للمستخدم ذو ربح القناة الجيدة والذي يؤدي إلى عدم عدالة بين المستخدمين حيث يكون $R_1^{OMA} = 6.6bps/Hz$ و $R_2^{OMA} = 0.07bps/Hz$. من أجل تحسين معدل نقل المعطيات للمستخدم الثاني وتحقيق عدالة أكبر في نظام OMA يجب تخصيص المستخدم الثاني بحزمة ترددية أكبر وبالتالي انخفاض معدل نقل المعطيات للمستخدم الأول وعدم تحقيق معدل نقل المعطيات الكلي الأعظمي انخفاض فمثلاً عندما يكون $R_2^{OMA} = 0.8bps/Hz$ يُصبح $R_1^{OMA} = 3.7bps/Hz$ ويكون معدل نقل المعطيات الكلي $R_{sum}^{OMA} = 4.5bps/Hz < 6.67bps/Hz$، أما من أجل الحصول على معدل نقل معطيات أعظمي للمستخدم الثاني أي $R_2^{OMA} = 1bps/Hz$ يجب تخصيصه بكامل المجال الترددي أي يُصبح مستخدم واحد للنظام حيث $R_1^{OMA} \approx 0bps/Hz$. أما في نظام PD_NOMA فيمكن تحقيق معدل نقل معطيات كلي أكبر بعدالة أكبر منها في OMA وعند أكثر من نقطة خصوصاً في حالة قنوات مختلفة حيث من الممكن الحصول على $R_2^{NOMA} = 1bps/Hz$ ويكون عندها $R_1^{NOMA} = 5.67bps/Hz$ ومعدل نقل المعطيات الكلي أعظمي $R_{sum}^{NOMA} = 6.67bps/Hz$ في هذه الحالة.



الشكل (2−4) مقارنة مناطق السعة بين PD_NOMA و OMA في إرسال الوصلة الصاعدة لقنوات متماثلة

من أجل $SNR_1 = SNR_2 = 0dB$.

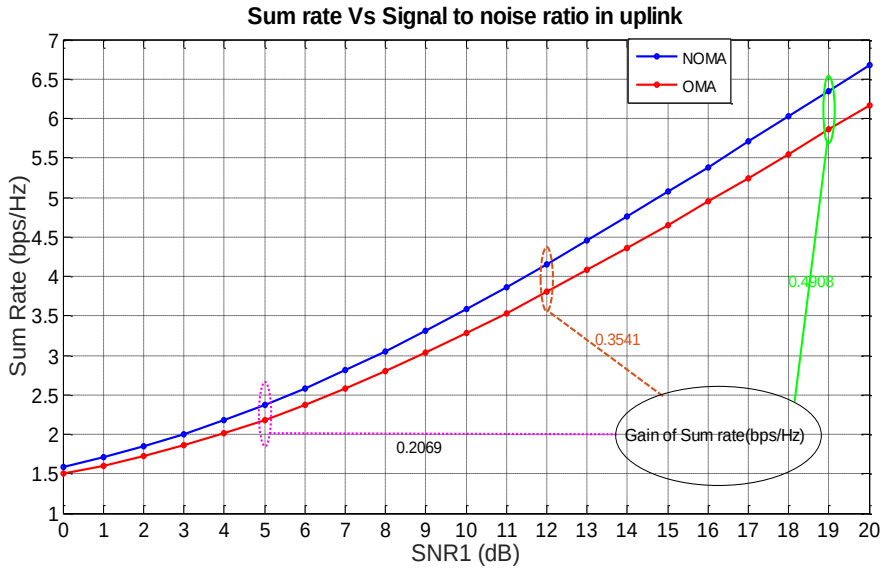


الشكل (2−5) مقارنة مناطق السعة بين PD_NOMA و OMAفي إرسال الوصلة الصاعدة لقنوات غير متماثلة

من أجل $SNR_1 = 0dB, SNR_2 = 20dB$.

يمكن للنفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA تحسين معدل نقل المعطيات الكلي مع توفير عدالة أكبر مقارنةً مع OMA كما هو مبين في الشكل (2−6)، حيث تم حساب هذا

المعدل عند النقطة A تبعاً لقيم مختلفة لنسبة الإشارة للضجيج SNR_1 من أجل $SNR_2 = 0dB$. يزداد مقدار هذا التحسين كلما كان التباين بين القنوات كبير حيث يمكن أن يصل إلى $0.5bps/Hz$ عندما تكون $SNR_1 = 20dB$ أي رفع الفعالية الطيفية بمقدار 8%.



الشكل (2-6) معدل نقل المعطيات الكلي بدلالة نسبة الإشارة للضجيج SNR_1 من أجل $SNR_2 = 0dB$ في الوصلة الصاعدة.

تؤكد المقارنة السابقة بين النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA والنفاذ المتعدد المتعامد OMA على تفوق أداء الأول من حيث تحسين الفعالية الطيفية وتحقيق عدالة أكبر بين المستخدمين في إرسال الوصلة الصاعدة خصوصاً عند تباين ظروف الانتشار بين المستخدمين والمحطة القاعدية[53].

4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الرماز Code Domain_NOMA

تعتمد باقي تقنيات NOMA على الترميز التراكبي SC في مجال الترميز حيث تسمح هذه التقنيات لأكثر من مستخدم بتشارك الموارد الفيزيائية باستخدام طرائق مختلفة.

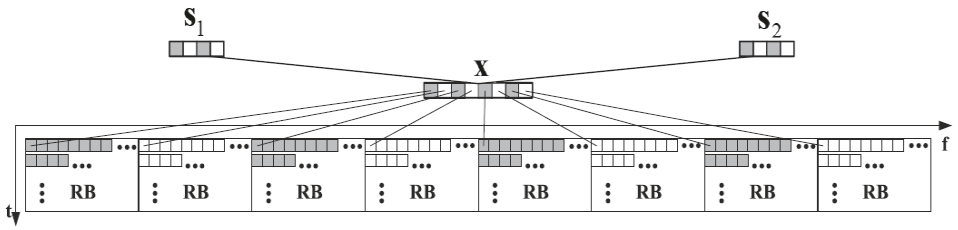
1.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام الترميز Coding_based NOMA

تعمل مخططات **NOMA** ضمن هذا التصنيف (LDS_SVE, SCMA, PDMA) على مستوى الرمز بالاعتماد على تخصيص المستخدمين بجداول رمازات مخلخلة sparse codebook ومتراكمة مع بعضها البعض في مجالات مختلفة (المجال الزمني، الترددي, المكاني ... الخ)، حيث يتضمن كل جدول مجموعة كلمات codewords جزء من أو كل عناصرها غير صفرية. يُقابل كل تسلسل لمعطيات المستخدم بكلمة مختلفة عن التسلسلات الأخرى بشكل مشابه للتعديلات الرقمية حيث تُمثل الكلمات كوكبة التعديل. بشكل عام تُحقق هذه المخططات ربح تشكيل وتنوع كبيرين مما يقلل احتمال التصادم وذلك من خلال توفير كوكبة متعددة الأبعاد استخدام والتحكم بعدد العناصر الصفرية.[30][29]

1.1.4.2. نشر منخفض الكثافة مع تمديد شعاع التوقيع Low density spreading with signature vector extension

تُعتبر هذه التقنية مزيج من LDS وSVE حيث تُنشر الرموز المرسلة على جزء صغير من الموارد الفيزيائية باستخدام LDS مع إمكانية أن يتشارك أكثر من مستخدم هذا الجزء من الموارد كما في مخطط LDS_OFDM [42] أو مخطط LDS_CDMA. [41] بينما تقوم تقنية SVE بتمديد شعاع النثر المستخدم في LDS من أجل تحسين أداء الكشف في المستقبل. يبين الشكل (2-7) مثال عن تقنية LDS-SVE حيث يتم تحويل وربط عنصرين من أشعة النثر إلى شعاع نشر أكبر من خلال تحويل الرموز المعدلة التسلسلية إلى تفرعية ضمن شعاعين (S_2)و(S_1)، ومن ثم تكديس الجزئين الحقيقي والتخيلي للشعاعين في شعاع حقيقي S_R. يُنشر الشعاع S_R على الموارد المخصصة ليعطي الخرج النهائي بشعاع حقيقي $X_{R=}U\ S_R$ حيث U مصفوفة تحويل يتم من خلالها نشر الرموز المعدلة الأصلية على أكثر من عنصر من الموارد. يتيح تمديد الشعاع تنوع أكبر في النظام ما يؤدي إلى دعم حمل زائد أكبر، لكن تواجه صعوبة في تصميم مصفوفة التحويل التي يجب تصميمها بشكل أمثلي

لتحسين أداء الكشف مقارنةً مع OFDMA وLDS-CDMA. يمكن أن يستخدم في المستقبل خوارزمية حذف التداخل التتابعي SIC أو خوارزمية تمرير الرسالة MPA أو مع بعضهما SIC-MPA لكشف إشارات المستخدمين [48].

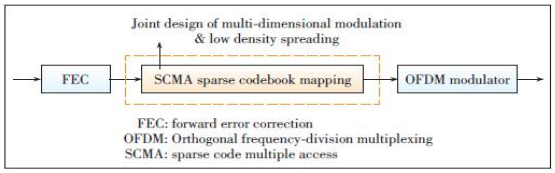


$$\left.\begin{aligned}\mathbf{s}_R &= \left[\text{real}(\mathbf{s}_1) \quad \text{real}(\mathbf{s}_2) \quad \text{imag}(\mathbf{s}_1) \quad \text{imag}(\mathbf{s}_2)\right]^T \\ \mathbf{x}_R &= \left[\text{real}(\mathbf{x}) \quad \text{imag}(\mathbf{x})\right]^T\end{aligned}\right\} \quad \mathbf{x}_R = \mathbf{U}\mathbf{s}_R$$

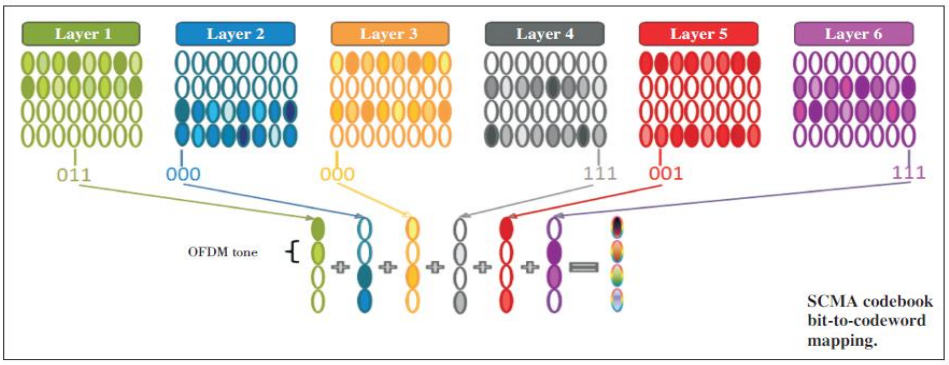
الشكل (2-7) النثر منخفض الكثافة مع تمديد شعاع التوقيع LDS-SVE [15]

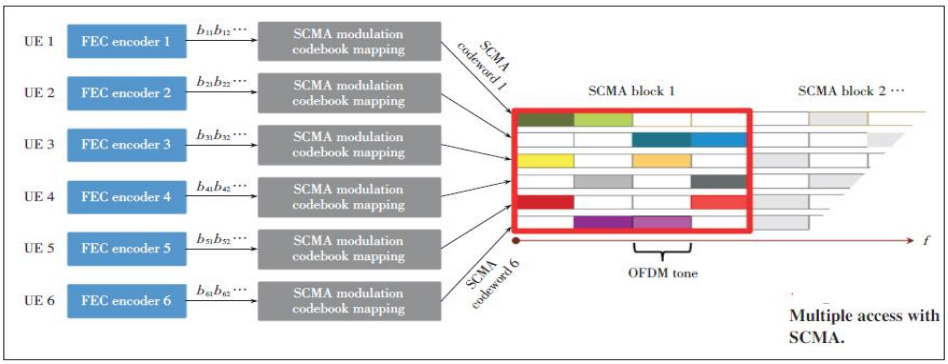
2.1.4.2. النفاذ المتعدد بالرمازات المخلخلة Sparse code multiple access

تُعتبر تقنية SCMA نموذج محسن من تقنية LDS-OFDM [41] من خلال مقابلة سلسلة البتات بكلمات ترميز مختلفة مأخوذة من دفاتر ترميز مخلخلة بعناصر صفرية، حيث تختلف مواقع العناصر الصفرية من دفتر ترميز لآخر ولكن عددها في كل دفتر متساوي. يوضح الشكل(2-8) مثالاً لتقنية SCMA حيث يمكن أن يتشارك كل 6 مستخدمين 4 حوامل ترددية جزئية متعامدة من الحوامل المخصصة في نظام OFDM بالاعتماد على الترميز التراكبي لإشاراتهم باستخدام 6 دفاتر ترميز مختلفة يحتوي كل منها على 8 كلمات ترميز بطول 4 وعناصر صفرية بعدد 2[14]. تُتيح تقنية SCMA إمكانية تقليل رتبة التعديل وتحقيق تنوع كبير من خلال كوكبة متعددة الأبعاد، كذلك يتفوق أداء معدل الخطأ باستخدام SCMA على أداء تقنيات LDS, MUSA, PDMA في قناة خفوت رايلي Rayleigh. تستخدم تقنية SCMA مستقبل خوارزمية تمرير الرسالة MPA مع/بدون SIC التي تحقق أداء أفض من خلال التصميم شبه الأمثلي لدفاتر الترميز [39].



SCMA codebook mapping.



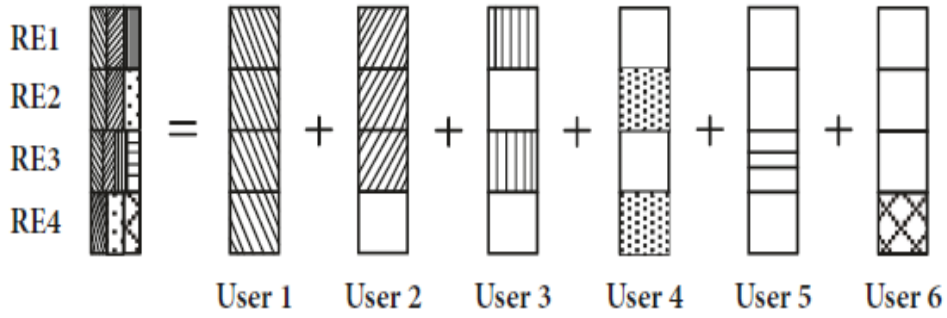


الشكل (2-8) النفاذ المتعدد بالرمازات المخلخلة SCMA [14]

3.2.4.2. النفاذ المتعدد بتقسيم النمط Pattern division multiple access

ترتكز تقنية PDMA على مبدأ تقنية SAMA والتي يمكن تحقيقها في عدة مجالات أو بمزيج من هذه المجالات، حيث يستخدم مخطط PDMA أنماط غير متعامدة يتم تصميمها للحصول على تنوع أعظمي وتراكم أصغري بين إشارات المستخدمين. يستخدم مستقبل PDMA خوارزمية تمرير الرسالة MPA مع/بدون SIC أيضاً ويختلف عن مخطط SCMA بطريقة تصميم الدفاتر حيث يمكن أن تحتوي عناصر صفرية بعدد مختلف عن باقي الدفاتر ومن الممكن أن لا يكون أي عنصر صفري في الدفتر. يختلف عدد العناصر غير الصفرية بين دفتر وآخر تبعاً لحالة القناة لكل مستخدم فمثلاً يمكن تخصيص المستخدم ذو ربح القناة الأضعف بدفتر ترميز بعناصر غير صفرية أكبر من باقي دفاتر

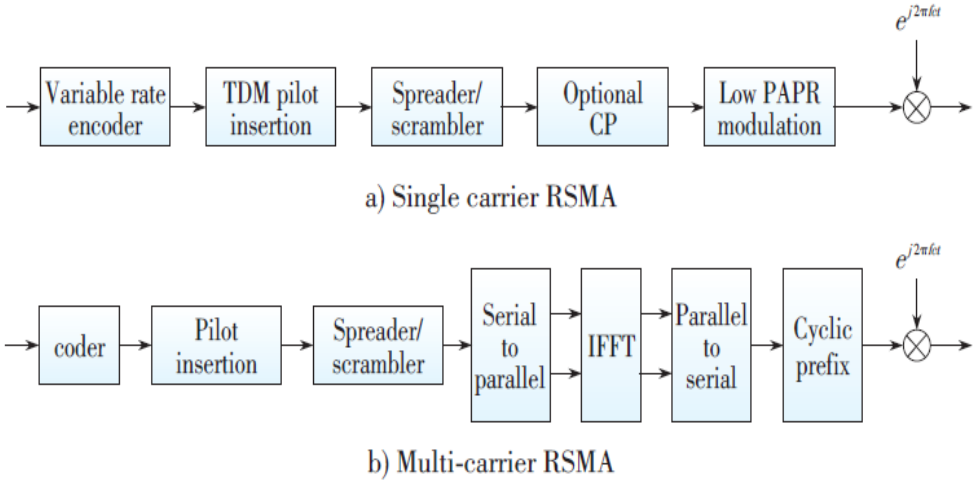
الترميز كما هو مبين في الشكل (2–9).[14] تُحقق هذه التقنية تنوع أكبر من SCMA لكن بأداء معدل خطأ أقل منه[23].



الشكل (2–9) النفاذ المتعدد بتقسيم النمط PDMA [14]

2.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام البعثرة Scrambling_based NOMA

تعمل مخططات هذا التصنيف (RSMA, LSSA) على مستوى الرمز أو البت من خلال استخدام سلاسل بعثرة طويلة أو قصيرة، حيث يقوم مرسل النفاذ المتعدد بنشر الموارد RSMA ببعثرة الرموز المعدلة على الموارد من خلال سلاسل طويلة ذات ترابط بيني مقبول، بينما يتم بعثرة البتات باستخدام سلاسل قصيرة في مرسل النفاذ التشاركي المعتمد على معدل رماز منخفض LSSA [15]. تدعم هذه المخططات الإرسالات غير المتزامنة الخالية من الضمان GF. يُستخدم مخطط SC-RSMA المبين في الشكل (2–10) في إرسال الوصلة الصاعدة UL من أجل توفير استهلاك طاقة البطارية وتخفيض النسبة PAPR مقارنة مع مخطط SCMA. بينما في الوصلة الهابطة يُستخدم مخطط MU-RSMA من أجل تخفيض زمن التلبث latency وتبسيط تعقيد المستقبل في قناة خفوت انتقائية التردد. في المستقبل يُستخدم حذف التداخل التتابعي SIC بالاعتماد على كاشف MMSE. [45][14]



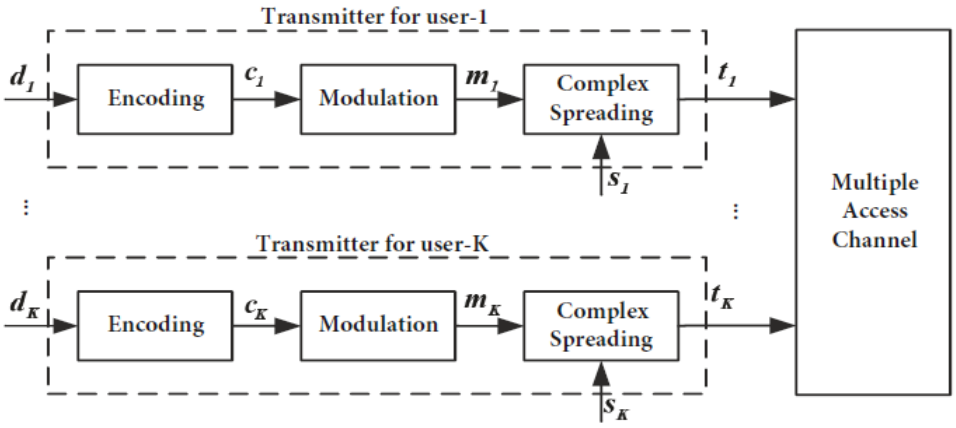
الشكل (2−10) النفاذ المتعدد بنشر الموارد RSMA [14]

3.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام النثر Spreading_based NOMA

تعمل هذه المخططات (MUSA, NOCA, GOCA, NCMA) على مستوى الرمز من خلال نشر الرموز المرسلة بسلاسل قصيرة أو طويلة والتي تملك خواص ترابط بيني منخفض، حيث يستخدم المستقبل حذف التداخل التتابعي SIC أو المتوازي PIC بالاعتماد على كاشف MMSE [29][30]

1.3.4.2. النفاذ التشاركي لعدة مستخدمين Multiuser sharing access

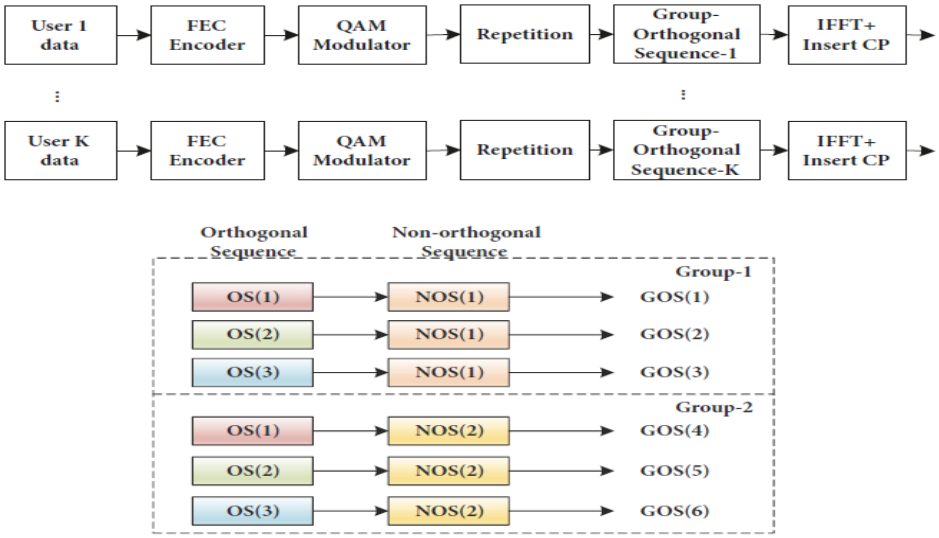
تدعم تقنية MUSA حمل زائد عالي من خلال نشر الرموز المعدلة بسلاسل نشر عقدية قصيرة كثيفة كما هو مبين في الشكل (2−11). تتألف كل سلسلة من مجموعة عناصر عقدية ينتمي جزئيها الحقيقي والتخيلي إلى مجموعة محددة مثل $\{-1,0,+1\}$، حيث تسمح هذه الطريقة ببناء عدد كبير من السلاسل يتم انتقاء مجموعة منها بترابط بيني منخفض. يُعتبر مخطط MUSA مناسب لتطبيقات انترنت الأشياء IOT التي تتطلب معامل حمل زائد عالي بالإضافة إلى سهولة توليد سلاسل النثر التي يجب تصميمها بشكل أمثلي لتحقيق أداء معدل خطأ مناسب [33][46]



الشكل (2-11) النفاذ التشاركي لعدة مستخدمين MUSA [46]

2.3.4.2. نفاذ مجموعة مرمزة تعامدياً Group orthogonal coded access

تعتمد تقنية GOCA على نشر الرموز المعدلة على الموارد الراديوية باستخدام سلاسل نشر طويلة حيث يتم إعادة استخدام مجموعة سلاسل متعامدة بالاعتماد على سلاسل نشر غير متعامدة بترابط بيني منخفض كما هو مبين ي الشكل (2-12). تُفصل المجموعات عن بعضها من خلال السلاسل غير المتعامدة بينما يتم كشف المستخدمين ضمن المجموعة بالاعتماد على السلاسل المتعامدة التي تقلل التداخل بين المستخدمين في كل مجموعة. [15]



الشكل (2-12) نفاذ مجموعة مرمزة تعامدياً GOCA [15]

3.3.4.2. النفاذ المتعدد المرمز بشكل غير متعامد nonorthogonal coded multiple access

تستخدم تقنية NCMA سلاسل نشر كثيفة وقصيرة غير متعامدة يتم الحصول عليها من حل مسألة Grassmannian line packing التي تعطي سلاسل نشر مثالية غير متعامدة وذلك من خلال تعظيم الحد الأدنى للمسافة بين السلاسل.[47]

4.4.2. النفاذ المتعدد غير المتعامد باستخدام التشابك Interleaving_based NOMA

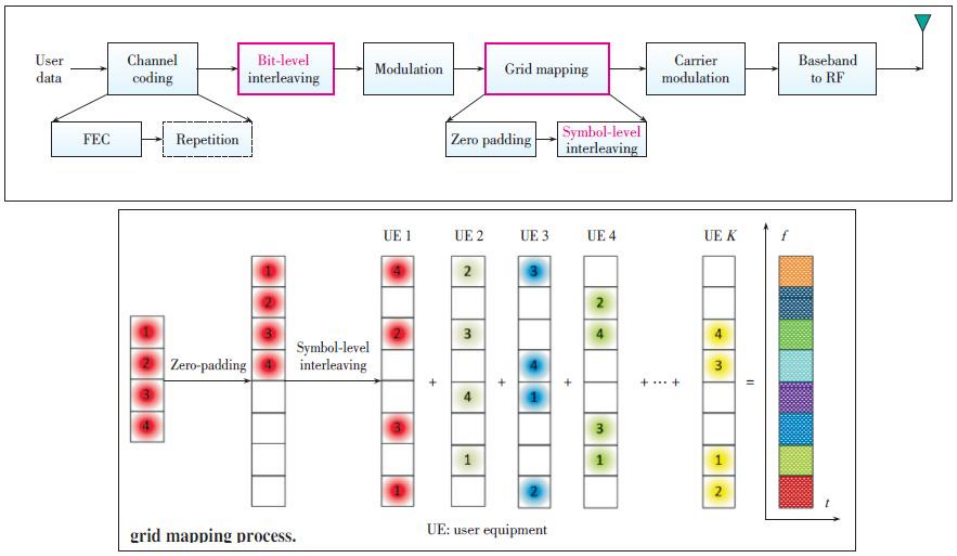
تعتمد مخططات هذا التصنيف على استخدام التشابك على مستوى الرمز أو البت. [34]

1.4.4.2. النفاذ المتعدد بالتشابك المقسم interleave-division multiple access

تعمل IDMA على مستوى البت من خلال استخدام مشابك حيث يتم توليد أنماط التشابك بشكل عشوائي ومستقل لكل مستخدم. تُقلل هذه التقنية أثر الخفوت والتداخل بين الحوامل ICI وتحسن الأداء مقارنةً مع CDMA. [49] يتفوق أداء معدل الخطأ في مخطط IDMA على مخطط SCMA وبتعقيد أقل في المستقبل. [40] لكن يحتاج إلى ذاكرة بحجم كبير[40].

2.4.4.2. النفاذ المتعدد بالتشابك الشبكي Interleave-grid multiple access

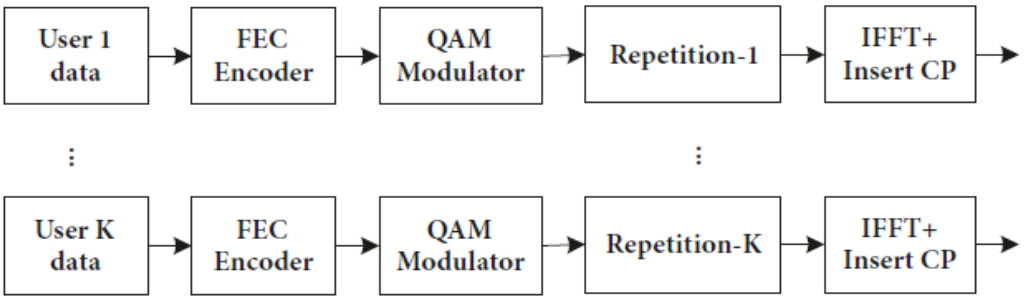
تختلف تقنية IGMA عن مخطط IDMA بوجود مرحلة أنماط المقابلة الشبكية grid mapping patterns كما هو مبين في الشكل (2−13)، والتي تتمثل بالمشابكة بين الرموز بالاعتماد على الحشو الصفري zero-padding [50]



الشكل (2-13) النفاذ المتعدد بالتشابك الشبكي IGMA [50]

3.4.4.2. النفاذ المتعدد بالتقسيم التكراري Repetition division multiple access

تعمل هذه التقنية على مستوى الرموز من خلال تكرار إرسال الرموز المعدلة بشكل مختلف بين المستخدمين كما هو مبين في الشكل (2-14)، حيث يملك كل مستخدم نمط انزياح دوري لهذا التكرار خاص فيه. [29] [15]



الشكل (2-14) النفاذ المتعدد بالتقسيم التكراري RDMA [15]

4.4.4.2. النثر بمعدل ترميز منخفض low coding rate spreading

تعمل تقنية LCRS على مستوى البت من خلال مشابكة البتات ونشرها على كامل منطقة الإرسال غير المتعامدة مع التكرار.[51][29]

يُلخص الجدول (2–1) مخططات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA المقترحة في إرسال الوصلة الصاعدة UL والشركات التي تعمل على هذه المخططات بالإضافة إلى مجال عمل كل مخطط وطريقة تشكيل التواقيع.

الجدول(2–1): مخططات NOMA لإرسال الوصلة الصاعدة والمستقبلات الموافقة لها.

NOMA Schemes	Company	Signature	Receivers
LDS-SVE	Fujitsu	Symbol-Level Short Low Density	MPA/EPA
SCMA	Hwawei	Symbol-Level Short Low Density	MPA/EPA-SIC
PDMA	CATT	Symbol-Level Short Low Density	MPA,MPA-SIC
PD-NOMA	DoCom	Bit-Level Power domain superposition	MMSE-SIC
RSMA	Qualcomm	Symbol-Level Long Scrambling Sequences	MMSE-SIC
LSSA	ETRI	Bit-Level Short Scrambling Sequences	MMSE-SIC
MUSA	ZTE	Symbol-Level short dense Spreading Sequences	MMSE-SIC
NOCA	Nokia	Symbol-Level short dense Spreading Sequences	MMSE-SIC/PIC
NCMA	LG	Symbol-Level short dense Spreading Sequences	MMSE-PIC
GOCA	Mediatek	Symbol-Level Long Spreading Sequences	MMSE-SIC
IDMA	Nokia	Bit-Level Interleaving	ESE-PIC
IGMA	Samsung	Bit-Level Interleaving	ESE-PIC
RDMA	Mediatek	Symbol-Level Interleaving	MMSE-SIC
LCRS	Intel	Bit-Level Interleaving	MMSE-PIC

5.2. مستقبلات NOMA

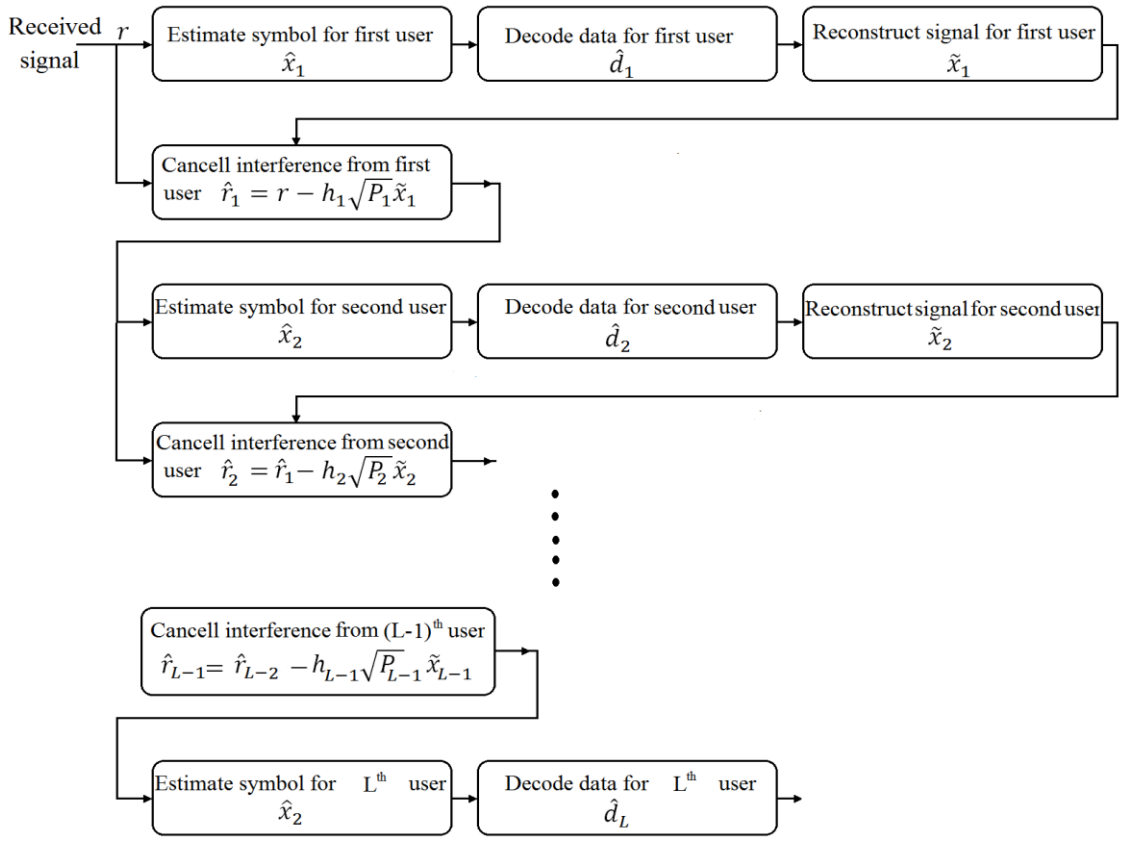
يعتمد تصميم مستقبل النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA على مخطط تقنية النفاذ المستخدم في المرسل كما هو مبين في الجدول (2–1)، حيث يتم اختيار خوارزمية الاستقبال تبعاً لطريقة تصميم التواقيع وتوزيعها على الموارد الفيزيائية بهدف تقليل أثر التداخل بين الإشارات من أجل تحسين أداء الكشف وفك الترميز. بشكل عام يحتاج المستقبل إلى تقنية حذف تداخل IC و/أو كاشف عدة مستخدمين MUD، حيث من الممكن استخدام خوارزميات الكشف MUD بدون استخدام تقنيات حذف التداخل IC أو استخدام خوارزمية كشف مع تقنية حذف التداخل.

1.5.2. حذف التداخل IC Interferece Cancellation

يمكن أن يكون حذف التداخل راسخ(hard) أو ناعم(soft) بشكل تتابعي SIC أو متوازي PIC، حيث يُستخدم بشكل أساسي مع مخططات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA التي تعتمد على النثر أو البعثرة مثل PD-NOMA, MUSA بالإضافة إلى استخدامه مع مخططات أخرى. يتميز حذف التداخل المتوازي PIC بتأخير أقل مقارنةً مع حذف التداخل التتابعي SIC لكن بتعقيد أعلى منه حيث يقوم مستقبل PIC بفك ترميز إشارات كل المستخدمين بآن واحد في كل مرحلة ومن ثم يمكن تمرير نتائج هذه المرحلة إلى المرحلة التالية soft IC أو عدم تمريرها hard IC [31][32]. بينما يقوم مستقبل SIC بفك ترميز الإشارات واحدة تلو الأخرى وذلك من خلال معالجة كل الإشارات الغير مكشوفة كتداخل عند فك ترميز الإشارة المطلوبة، حيث يتم في كل مرحلة فك إشارة المستخدم (أو إشارات المستخدمين) التي تملك أعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج SINR ومن ثم إعادة بناء الإشارة وحذفها من الإشارة المتبقية ليتم إعادة تطبيق هذه العملية عليها كما هو مبين في الشكل (2–15) من أجل النظام المبين في الشكل (2–3) والإشارة المستقبلة المعطاة بالعلاقة (2–1). يبدأ المستقبل بكشف إشارة

المستخدم الأول وتقدير الرمز المرسل $\hat{x}_1$ وذلك لأن $SINR_1 \geq SINR_l$ حيث $l = 2, \dots, L$، ومن ثم فك ترميز المعطيات $\hat{d}_1$ وإعادة بناء الإشارة $\tilde{x}_1$ من هذه المعطيات ليتم حذف التداخل الناتج عن المستخدم الأول وتشكيل الإشارة الجديدة للمرحلة اللاحقة: $\hat{r}_1 = r - h_1\sqrt{P_1}\tilde{x}_1$ التي تُستخدم لكشف وفك ترميز إشارة المستخدم الثاني بنفس الطريقة كما هو مبين في الشكل (2-15)، حيث تُحقق نسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_2 \geq SINR_l$ من أجل $l = 3, \dots, L$.

تم بناء النظام المبين في العلاقة (2-1) بحيث يكون $SINR_i \geq SINR_l$ من أجل $i < l \leq L$، حيث L عدد مستويات الاستطاعة، $SINR_i$ و $SINR_l$ نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج للمستخدم رقم i و l بالترتيب P_l استطاعة إرسال المستخدم رقم l، و h_l معامل قناة المستخدم رقم l.



الشكل (2-15) مستقبل حذف التداخل التتابعي SIC

يتميز مستقبل SIC بسهولة تطبيقه مقارنةً مع باقي المستقبلات، ويعتمد أداء الكشف بشكل أساسي على قيم نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج SINR التي تعتمد على التباين في ربح قنوات المستخدمين أو

التحكم باختلاف مستويات الاستطاعة المستقبلة من خلال ضبط معاملات الاستطاعة. [37] لكن من الممكن تحسين أداء حذف التداخل التتابعي SIC التقليدي في إرسالات الوصلة الصاعدة UL الغير متزامنة من خلال استخدام البادئة الدورية CP لتقليل تأثيرات عدم التزامن. [54]

2.5.2. كاشف عدة مستخدمين MUD

تتطلب آليات حذف التداخل IC خوارزميات كشف وتقدير للرموز المرسلة في كل مرحلة حذف تداخل تتابعي SIC أو في تقدير الرموز في حذف التداخل المتوازي PIC، حيث يمكن استخدام الكواشف المبينة في الجدول (2−1) مثل MMSE, MPA, EPA مع / بدون آليات حذف التداخل IC [32].

1.2.5.2. الحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ minimum mean square error

يُستخدم كاشف MMSE في الأنظمة الخطية من الشكل المصفوفي $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}$ لتقدير الرموز المرسلة بحيث $\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{W}_{MMSE}\boldsymbol{y}$ وذلك من خلال إيجاد مصفوفة التحويل الأمثلية $\boldsymbol{W}_{MMSE}$ التي تحقق متوسط مربع خطأ أصغري $\boldsymbol{W}_{MMSE} = \min_{\boldsymbol{W}} E[\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{W}\boldsymbol{y}\|^2]$ حيث يُعطى الحل كما يلي[35]:

$$\boldsymbol{W}_{MMSE} = (\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{H} + \sigma^2\mathbf{I})^{-1}\boldsymbol{H}^H \qquad (10-2)$$

حيث $\boldsymbol{H}$ مصفوفة ربح القناة، $\mathbf{I}$ المصفوفة الواحدية، و σ^2 تشتت الضجيج $\boldsymbol{n}$ بمتوسط صفري (AWGN). من أجل تطبيق كاشف MMSE في مستقبل SIC المبين في الشكل (2−15) لنموذج النظام المبين بالعلاقة (2−1)، يتم إعادة صياغة العلاقة (2−1) بالشكل التالي:

$$r = \boldsymbol{h}\boldsymbol{x} + n \qquad (11-2)$$

حيث r الإشارة المستقبلة، $\boldsymbol{h} = \left[h_1\sqrt{P_1}, \dots, h_L\sqrt{P_L}\right]$ و $\boldsymbol{x} = [x_1, \dots, x_L]^{\mathrm{T}}$. بالتالي يتم تطبيق كاشف MMSE في كل مرحلة حذف تداخل SIC المبينة في الشكل (2−15) على اعتبار أن

$SINR_i \geq SINR_l$ من أجل $i < l \leq L$، حيث تُحسب مصفوفة التحويل $\boldsymbol{w}_{MMSE}$ (بأبعاد $L \times 1$) في المرحلة الأولى بالاعتماد على العلاقة (2−10)، ويكون الرمز المقدر للمستخدم الأول:

$$\hat{x}_1 = \boldsymbol{w}_{MMSE}(1)\, r \qquad (12-2)$$

حيث $\boldsymbol{w}_{MMSE}(1)$ العنصر الأول من الشعاع $\boldsymbol{w}_{MMSE}$، و r الإشارة المستقبلة المبينة في العلاقة (2−11). أما تقدير الرمز للمستخدم الثاني $\hat{x}_2$ يتم بتطبيق كاشف MMSE على الإشارة $\hat{r}_1$ الناتجة من حذف تداخل إشارة المستخدم الأول والتي يمكن نمذجتها بالصيغة: $\hat{r}_1 = \boldsymbol{h}_{(1)}\boldsymbol{x}_{(1)} + n$، حيث $\boldsymbol{h}_{(1)} = \left[h_2\sqrt{P_2}, \dots, h_L\sqrt{P_L}\right]$ ، و $\boldsymbol{x}_{(1)} = [x_2, \dots, x_L]^{\mathrm{T}}$. وهكذا يتم تقدير رموز باقي المستخدمين من خلال خوارزمية MMSE في كل مرحلة حذف تداخل IC حيث يمكن نمذجة الإشارة الناتجة $\hat{r}_l$ في كل مرحلة بالصيغة التالية:

$$\hat{r}_l = \boldsymbol{h}_{(l)}\boldsymbol{x}_{(l)} + n \qquad l = 1, \dots, L-1 \qquad (13-2)$$

حيث $\boldsymbol{h}_{(l)} = \left[h_{l+1}\sqrt{P_{l+1}}, \dots, h_L\sqrt{P_L}\right]$، و$\boldsymbol{x}_{(l)} = [x_{l+1}, \dots, x_L]^{\mathrm{T}}$. و L عدد مستويات الاستطاعة.

تتضمن إجرائية MMSE حساب مصفوفة التحويل $\boldsymbol{w}_{(l),MMSE}$، تقدير الرمز $\hat{x}_l$ بالترتيب وفق العلاقات التالية:

$$\boldsymbol{w}_{(l),MMSE} = \left(\boldsymbol{h}_{(l)}{}^{H}\boldsymbol{h}_{(l)} + \sigma^2\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{h}_{(l)}{}^{H} \qquad (14-2)$$

$$\hat{x}_{l+1} = \boldsymbol{w}_{(l),MMSE}(1)\, \hat{r}_l \qquad (15-2)$$

حيث $\hat{r}_l$ الإشارة الناتجة عن حذف تداخل إشارات المستخدمين $1, \dots, l$ ، $\boldsymbol{x}_{(l)} = [x_{l+1}, \dots, x_L]^{\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{h}_{(l)} = \left[h_{l+1}\sqrt{P_{l+1}}, \dots, h_L\sqrt{P_L}\right]$ ، $\boldsymbol{I}$ المصفوفة الواحدية، وσ^2 تشتت الضجيج.

عملياً، يحتاج مستقبل MMSE-SIC إلى معرفة المستخدم الذي يملك أعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج SINR في كل مرحلة حذف تداخل IC. من أجل النموذج المبين في العلاقة (2−11) حيث نفرض أن معاملات القناة معروفة (أي المصفوفة $\boldsymbol{h}$ معلومة في المحطة) وبما أن $E[|x|^2] = 1$ فإنه يمكن حساب نسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_l$ الموافقة للمستخدم رقم l كما يلي:[33]

$$SINR_l = \frac{|\boldsymbol{w}_{MMSE}(l)\ \boldsymbol{h}(l)|^2}{\sum_{i\neq l}|\boldsymbol{w}_{MMSE}(l)\ \boldsymbol{h}(i)|+\sigma^2\|\boldsymbol{w}_{MMSE}(l)\|^2} \qquad (16-2)$$

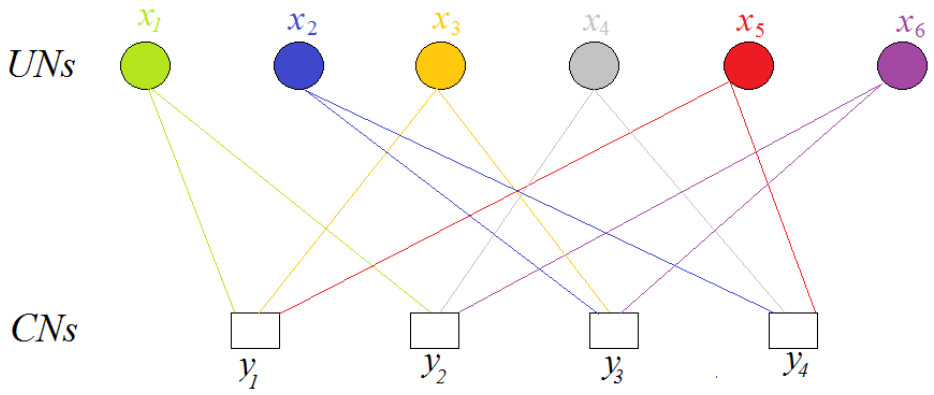
حيث $\boldsymbol{w}_{MMSE}(l)$ العنصر رقم l من الشعاع $\boldsymbol{w}_{MMSE}$ والذي يُحسب من العلاقة (2−10): $\boldsymbol{w}_{MMSE} = (\boldsymbol{h}^H\boldsymbol{h} + \sigma^2\mathbf{I})^{-1}\boldsymbol{h}^H$، $\boldsymbol{h}(l) = h_l\sqrt{P_l}$ العنصر رقم l من السطر $\boldsymbol{h}$ ، و σ^2 تشتت الضجيج. تُستخدم العلاقة (2−16) لحساب نسبة الإشارة للتداخل والضجيج لكل مستخدم خلال كل مرحلة حذف تداخل الموافقة للنموذج المبين في العلاقة (2−13)، حيث يكون عدد المستخدمين في هذه المرحلة يساوي $L - l$ مستخدم.

2.2.5.2. خوارزمية تمرير الرسائل messag passing algorithm

تُستخدم خوارزمية messag passing algorithm (**MPA**) مع تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA المعتمد على الترميز مثل (SCMA,PDMA) من أجل تخفيض تعقيد مستقبل Maximum a posteriori probability (MAP) الذي يتميز بأداء أمثلي حيث تحقق خوارزمية MPA أداء أقل من الأداء الممكن تحقيقه باستخدام خوارزمية MAP.

تُعتبر خوارزمية MPA من الخوارزميات التكرارية المعتمدة على حساب احتمالات مرور الرسائل المتبادلة بين عقد المستخدمين User Nodes (UNs) وعقد القنوات (الموارد الفيزيائية) Channel Nodes (CNs) التي تمثل رموز المستخدمين والإشارات المستقبلة بالترتيب في مخطط الوصلات كما

هو مبين في الشكل (2−16) والذي يمثل مخطط الوصلات للمثال المبين في الشكل(2−8)، حيث يتشارك ستة مستخدمين إرسال رموزهم $x_1, \dots, x_6$ على أربع موارد $y_1, \dots, y_4$) الإشارات المستقبلة على الموارد) باستخدام تقنية SCMA. في مخطط الوصلات المبين في الشكل (2−16)، يتم رسم وصلة بين عقدة مستخدم رقم j وعقدة قناة رقم i للتعبير عن أن الإشارة المستقبلة y_i $(i = 1,2,3,4)$ تتضمن رموز المستخدم x_j $(j = 1,2,3,4,5,6)$[36].



الشكل (2−16) مخطط الوصلات لنظام SCMA [36]

تُحقق خوارزمية MPA أداء أفضل من تقنيات SIC وMMSE_SIC لكن على حساب زيادة التعقيد الذي يتزايد بشكل أسي مع زيادة الحمل الزائد للنظام (زيادة عدد المستخدمين للنظام) ما يؤدي إلى تأخير أكبر. لذلك تستخدم بعض التقنيات مستقبل MPA-SIC حيث يتم تحديد عدد المستخدمين في كل مرحلة حذف تداخل IC. أو من الممكن استخدام مستقبل يستخدم خوارزمية توقع الانتشار Expectation Propagation Algorithm (EPA) الذي يملك تعقيد متزايد بشكل خطي مع تزايد الحمل الزائد لكن بأداء أقل من مستقبل MPA. حيث تُعتبر خوارزمية EPA نسخة معدلة من مستقبل Elementary Signal Estimation (ESE) الذي يعتمد على نمذجة التداخل والضجيج بتوزيع غاوصي[32] [31].

بشكل عام، يعتمد تصميم مستقبل النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA على إجراء مقايضة بين التعقيد والأداء المطلوبين وفقاً لمخطط الإرسال المستخدم خصوصاً في سيناريو mMTC وتطبيقات انترنت الأشياء IOT التي تتضمن عدد كبير من التوصيلات (حمل زائد عالي) بقيود استطاعة محدودة.

6.2. الخلاصة

في هذا الفصل تم تقديم دراسة نظرية مرجعية موسعة لأهم مفاهيم و تقنيات إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA في الوصلة الصاعدة UL والمعتمدة على الترميز التراكبي SC في مجالات مختلفة لإشارات المستخدمين عند المحطة القاعدية BS، حيث يستخدم مستقبل المحطة تقنيات حذف التداخل IC أو كشف عدة مستخدمين MUD وفقاً لطريقة تصميم المرسل من أجل فصل الإشارات وفك ترميزها بشكل صحيح، لكن تبين هذه الدراسة أن استخدام هذه المستقبلات يزيد التعقيد في أنظمة NOMA مقارنةً مع أنظمة OMA. يستغل النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA تباين شدة الإشارات المستقبلة عند المحطة BS من أجل تمييز إشارة كل مستخدم بالاعتماد على مستقبل MMSE-SIC. كما أظهرت المقارنة العددية التحليلية تحقيق تقنية PD-NOMA عدالة أكبر من نظام OMA في إرسال وصلة صاعدة UL لمستخدمين اثنين (حيث أنها الحالة التي انطلقت منها معظم المقالات والأبحاث) بينما سوف يتم التوسع في هذا البحث ليتم دراسة عدة مستخدمين متوزعين على عدد من الطبقات يتم تحديدها مسبقا وذلك من خلال السماح بتشارك الموارد الراديوية المخصصة للنظام وتعويض ربح القناة الضعيف للمستخدم البعيد بتخصيص هذا المستخدم باستطاعة أكبر من المستخدم القريب.

الفصل الثالث

القسم العملي _نموذج النظام

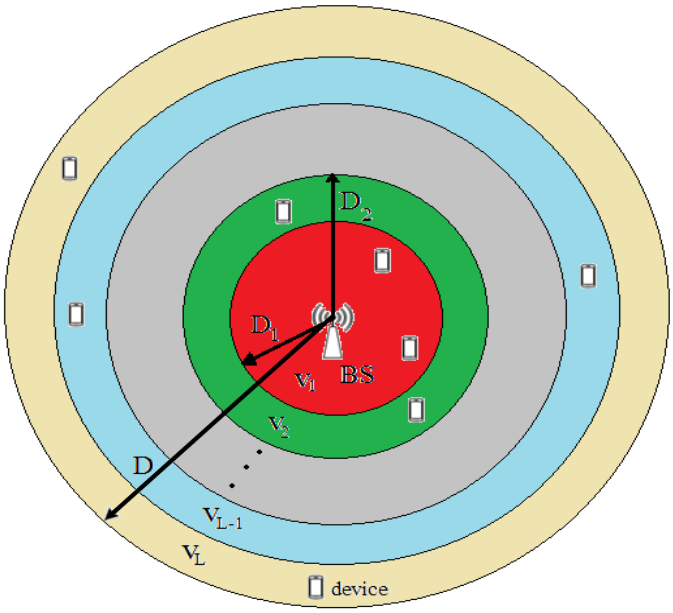
system model

1.3. مقدمة

يتضمن هذا الفصل نمذجة لنظام اتصالات هجين بين نفاذ متعدد متعامد OMA وغير متعامد في مجال الاستطاع PD_NOMA من أجل سيناريو وصلة صاعدة بين عدة مستخدمين ومحطة قاعدية، حيث ندرس طرائق تخصيص الموارد المتاحة (الترددية والطبقات) في النظام وتأثير عدد مستويات الاستطاعة المستقبلة (عدد الطبقات) على السعة، بالإضافة إلى تأثير عدد القنوات الجزئية ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج على أداء النظام.

2.3. نمذجة النظام

نعتبر الشبكة الخليوية المبينة في الشكل(3−1), والمؤلفة من محطة قاعدية واحدة base station (BS) تقوم بتخديم N جهاز متوزعين بشكل منتظم ضمن دائرة بنصف قطر D. تتشارك هذه الأجهزة حزمة ترددية total bandwidth بعرض B_T من أجل إرسال الوصلة الصاعدة والتي يتم تقسيمها إلى كتل موارد ترددية بعرض B، وبالتالي عدد كتل الموارد الترددية (subchannels) هو $M = \frac{B_T}{B}$ ضمن كل شريحة زمنية t (time slot)، حيث يمكن أن تكون هذه الموارد متعامدة مثل OFDMA, FDMA. في أنظمة النفاذ المتعدد المتعامد الخالية من المنح، يرتبط عدد الأجهزة الممكن أن تنجح بالنفاذ بعدد القنوات الجزئية الترددية المتاحة M، حيث أن اختيار القناة الجزئية نفسها من جهازين أو أكثر ضمن الشريحة الزمنية نفسها يؤدي إلى حدوث التصادم، وبالتالي فشل نفاذ هذه الأجهزة وانخفاض الإنتاجية throughput[26].



الشكل (3–1) مخطط توضيحي لنظام النفاذ المتعدد غير المتعامد المتعدد الطبقات في مجال الاستطاعة المقترح

يتم تطبيق تقنية النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA، وذلك بفرض وجودعدد L من مستويات الاستطاعة المستقبلة والمحددة مسبقاً، حيث يمثل كل مستوى من هذه المستويات طبقة أي أن عدد الطبقات هو نفسه عدد مستويات الاستطاعة المستقبلة L. نرمز إلى مستويات الاستطاعة بالرمز v_ℓ حيث $v_1 > v_2 > \cdots > v_L > 0$ من أجل $\ell = 1,2,\dots,L$.

بفرض أن استطاعة الضجيج مقيّسة على كل قناة جزئية أي استطاعة الضجيج $P_{nois} = N_0 B =$ 1، حيث N_0 الكثافة الطيفية لاستطاعة الضجيج وأن لكل طبقة مستخدم واحد، فإن مستوى الاستطاعة المستقبلة v_ℓ يمكن أن يكتب بالصيغة التالية[27]:

$$v_\ell = \Gamma\left(\sum_{i=\ell+1}^{L} v_i + 1\right) \qquad (1-3)$$

حيث Γ نسبة الإشارة للتداخل والضجيج المرغوبة، والتي تمثل نسبة الإشارة للتداخل والضجيج SINR من أجل $\ell = 1,2,\dots,L-1$، ونسبة الإشارة للضجيج SNR من أجل $\ell = L$.

بالاعتماد على العلاقة (3−1) فإن مستوى الاستطاعة المستقبلة v_L للطبقة الأخيرة $\ell = L$ هو نسبة الإشارة للضجيج SNR من أجل $\ell = L$ أي $v_L = \Gamma$. أما مستوى الاستطاعة المستقبلة v_{L-1} من أجل $\ell = L - 1$ يكتب كمايلي: $v_{L-1} = \Gamma(v_L + 1) = \Gamma(\Gamma + 1)$ وبتكرار هذه العملية من أجل $\ell = L - 2$ حتى $\ell = 1$، يمكن إعادة صياغة العلاقة (3−1) لتصبح كالآتي[27]:

$$v_\ell = \Gamma(\Gamma + 1)^{\mathrm{L}-\ell} \qquad (2\text{−}3)$$

في هذا البحث نفرض أن كل جهاز لديه المعلومات الكاملة عن حالة القناة CSI، والتي يمكن تقديرها بالاعتماد على الإشارة المرسلة من المحطة القاعدية في بداية كل شريحة زمنية لتحقيق التزامن، واستخدامها كإشارة طليعة pilot. كما أن كل مستخدم يرسل إشارة طليعة قبل إرسال معطياته منتقاة من مجموعة بعدد L سلسلة محددة سابقاً من قبل المحطة القاعدية ومعروفة لكل المستخدمين، حيث تمثل كل سلسلة من هذه المجموعة الطبقة التي تم اختيارها من أجل تقدير عدد المستخدمين لكل طبقة في المحطة القاعدية وذلك من خلال قياس استطاعة كل سلسلة (طبقة) وتقسيمها على مستوى الاستطاعة للطبقة. يجب اختيار هذه السلاسل بخواص ترابط ذاتي وبيني جيدة، ويمكن إهمال معدل الخطأ الناتج عن عملية تقدير هذه السلاسل في المحطة أي أن عدد مستخدمي كل طبقة معروف بدقة في المحطة[14]. بفرض أن معامل خفوت النطاق العريض large−scale fading للمستخدم n للقناة الجزئية m والذي يبعد مسافة $(0 < d_n \leq \mathrm{D})$ عن المحطة القاعدية يعطى بالعلاقة التالية[27]:

$$\mathbb{E}[\alpha_{m,n}] = \mathbb{E}\left[\left|h_{m,n}\right|^2\right] = A_0\,(d_n)^{-\beta} \qquad (3\text{−}3)$$

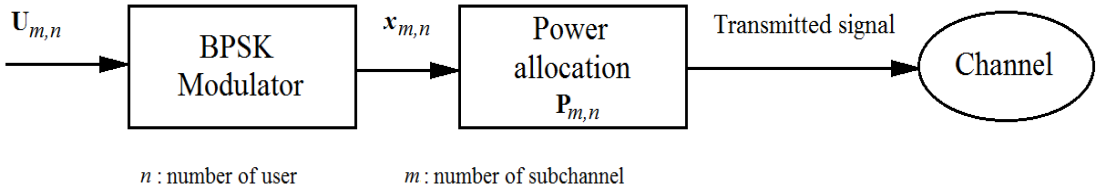
$\alpha_{m,n} = \left|h_{m,n}\right|^2$ ربح القناة الترددية m بين المستخدم n والمحطة القاعدية، A_0 ثابت يتعلق بربح الهوائي، و β معامل فقد المسار path loss exponent.

في هذا البحث نفرض $\beta = 3.8, A_0 = 1$ [19].

يبين الشكل (3−2) مخطط إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان في مجال الاستطاعة للوصلة الصاعدة وذلك ضمن مجال المجال القاعدية baseband، حيث نفرض أن التعديل المستخدم هو تعديل بإزاحة ثنائية للطور Binary Phase Shift Keying الذي يمثل (1) بالرمز (1−) و (0) بالرمز (1)، وأن كل المستخدمين تُرسل معطياتها الثنائية $\boldsymbol{U}_{m,n} = [u_{m,n}(1), \dots, u_{m,n}(N_B)]$ بمعدل N_B بت ضمن الشريحة الزمنية t[25]، حيث يُحدد كل مستخدم القناة الترددية الجزئية $m = 1,2, \dots, M$ واستطاعة الإرسال $P_{m,n}$ بالاعتماد على إحدى الطرق المذكورة لاحقاً. تعطى الإشارة المستقبلة على كل قناة ترددية m في الموقع k ضمن كل شريحة زمنية بالعلاقة التالية:

$$y_m(k) = \sum_{n\in\mathcal{N}_m} \sqrt{P_{m,n}} x_{m,n}(k) h_{m,n}(k) + w_m(k)\ k = 1, \dots, N_B, m = 1, \dots, M \quad (4-3)$$

حيث $\mathcal{N}_m$ مجموعة المستخدمين على القناة m ، $P_{m,n}$ استطاعة الإرسال للمستخدم n على القناة m، $x_{m,n}(k)$ الرمز المعدل المرسل على القناة m من المستخدم رقم n في الموقع k، حيث $x_{m,n}(k) = 1 - 2u_{m,n}(k)$ و $\mathbb{E}\left[\left|x_{m,n}(k)\right|^2\right] = 1, \forall m, n, k$ وذلك من أجل التعديل BPSK، $h_{m,n}(k)$ معامل القناة الترددية m بين المستخدم n والمحطة القاعدية في الموقع k. $w_m(k)$ عينة ضجيج عقدية من توزع غاوصي Gaussian بمتوسط صفري وتشتت σ^2 .



الشكل (3−2) مخطط إرسال النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان في مجال الاستطاعة

بما أن العمل في المجال القاعدي وأن معلومات حالة القناة معروفة بشكل كامل، فإنه من الممكن صياغة العلاقة (3−4) كالتالي:

$$y_m(k) = \sum_{n\in\mathcal{N}_m} \sqrt{P_{m,n}} x_{m,n}(k) + w_m(k),\ k = 1,2,\dots,N_B,\ m = 1,2,\dots,M \quad (5-3)$$

يستخدم المستقبل تقنية حذف التداخل التتابعي SIC المبينة في الشكل (2−15) بالاعتماد على كاشف الحد الأدنى لمتوسط الخطأ التربيعي MMSE المبينة في الفصل الثاني (الفقرة 2−5−2) من أجل كشف إشارات المستخدمين وتقدير معطياتهم.

3.3. تخصيص الموارد الترددية والطبقات

تتيح تطبيق تقنية PD-NOMA مضاعفة الموارد المتاحة M بمقدار L مرة، حيث تمثل M الموارد الترددية و L عدد الطبقات ليصبح عدد الموارد الكلية الترددية والطبقات المتاحة $(\mathrm{L} \times M)$. يمكن تخصيص أكثر من مورد لكل جهاز لكن في هذا البحث يتم تخصيص كل مستخدم بطبقة واحدة على قناة جزئية واحدة من أجل إرسال معطيات رزم قصيرة إلى المحطة القاعدية. يختار كل مستخدم القناة الترددية والطبقة بالاعتماد على معلومات حالة القناة والموقع (الطريقة الأولى)، التي يتم مقارنتها مع طريقة الاختيار العشوائي (الطريقة الثانية).

1.3.3. الطريقة الأولى: الاختيار اعتماداً على القناة dependent selection channel

تعتمد هذه الطريقة على تحديد الموقع ومعلومات حالة القناة CSI (المعلومين من قبل كل جهاز كما ذكرنا سابقاً)، حيث يختار كل جهاز رقم n ذو المسافة d_n عن المحطة الطبقة رقم ℓ إذا كان ينتمي إلى المجموعة $\mathcal{N}_\ell = \{n|\ D_{\ell-1} < d_n \le D_\ell\}$، حيث $D = 1,\ D_0 = 0\ , D_\ell = D\sqrt{\frac{l}{L}}$ كما

هو مبين في الشكل(3−1). في حين يختار هذا الجهاز القناة الترددية الجزئية $(m = 1, \dots., M)$ ذات الربح الأعظمي $max_m \alpha_{m,n}$ من أجل تقليل استطاعة الإرسال، التي يتم تحديدها كالتالي[26]:

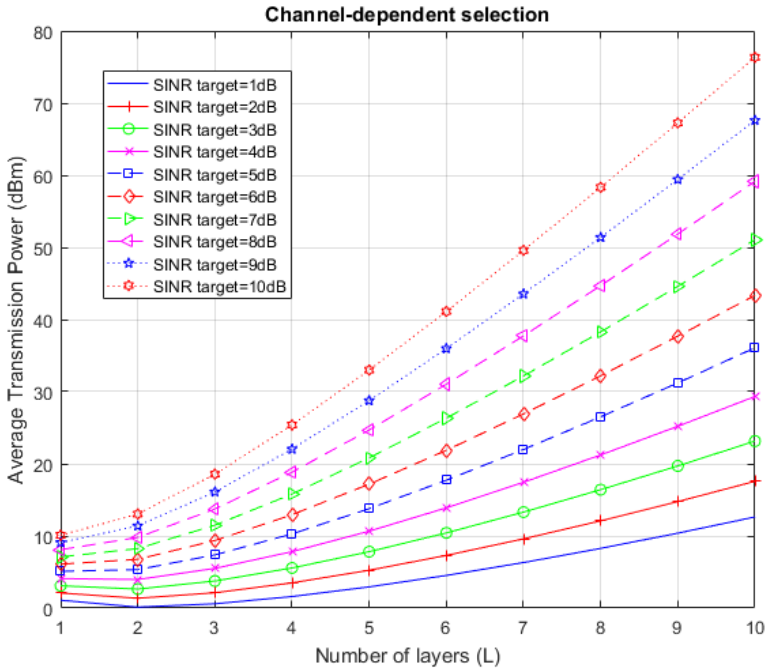
$$P_n = \frac{\nu_\ell}{max_m \alpha_{m,n}},\ n \in \mathcal{N}_\ell\,, \qquad (6-3)$$

في هذه الحالة يمكن تحديد متوسط استطاعة الإرسالP_{ave_1} بالحد الأعلى P_{max_1} وذلك من أجل $M \geq 2$ كمايلي[27]:

$$\mathbb{E}[P_n] = P_{ave_1} \leq \frac{min\left\{2\ell n 2, \frac{M}{M-1}\right\}}{L} \sum_{\ell=1}^{L} \frac{\Gamma(1+\Gamma)^{L-\ell}}{A_0\left(D\sqrt{\frac{\ell}{L}}\right)^{-\beta}} = P_{max_1} \qquad (7-3)$$

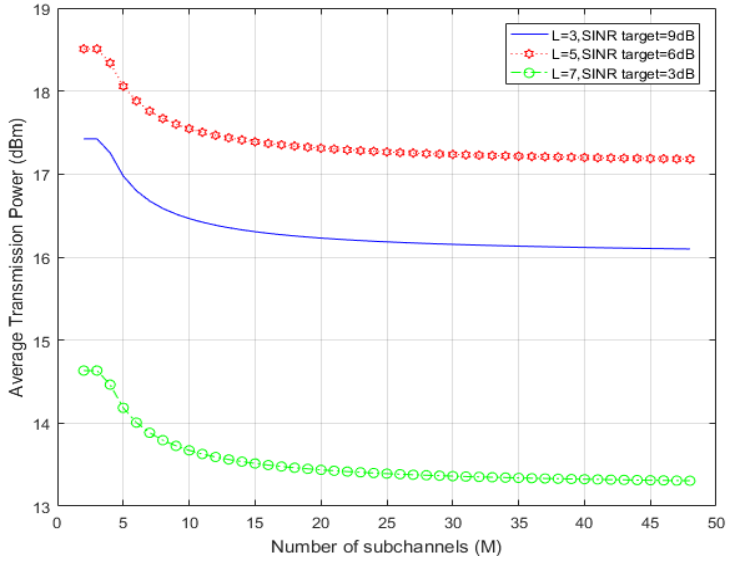
تعتبر العلاقة (3−7) فعالة في حالة $M \geq 2$ وذلك لأن $\mathbb{E}\left[\frac{1}{\alpha_{m,n}}\right] < \infty$، أما في حالة $\mathbb{E}\left[\frac{1}{\alpha_{m,n}}\right] \to \infty$ الموافقة لقناة جزئية واحدة $M = 1$، فإنه من الممكن أن ينتج استطاعة إرسال عالية جداً عن العلاقة (3−6)، والتي من الممكن تجنبها باستخدام التحكم باستطاعة مقلوب ربح القناة truncated channel inversion power control. [19]

يزداد الحد الأعلى لمتوسط الاستطاعة المرسلة P_{max_1} بزيادة عدد الطبقات المستخدم كما هو مبين في الشكل(3−3)، وذلك من أجل كل قيمة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج المطلوبة Γ كما يزداد هذا الحد بزيادة Γ من أجل كل قيمة لعدد الطبقات.



الشكل (3-3) الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على معلومات القناة تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ و M=48.

يتناقص الحد الأعلى لمتوسط الاستطاعة المرسلة P_{max_1} بزيادة عدد القنوات الجزئية M المستخدم كما هو مبين في الشكل(3-4)، وذلك من أجل كل قيم محددة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج المطلوبة Γ وعدد الطبقات.



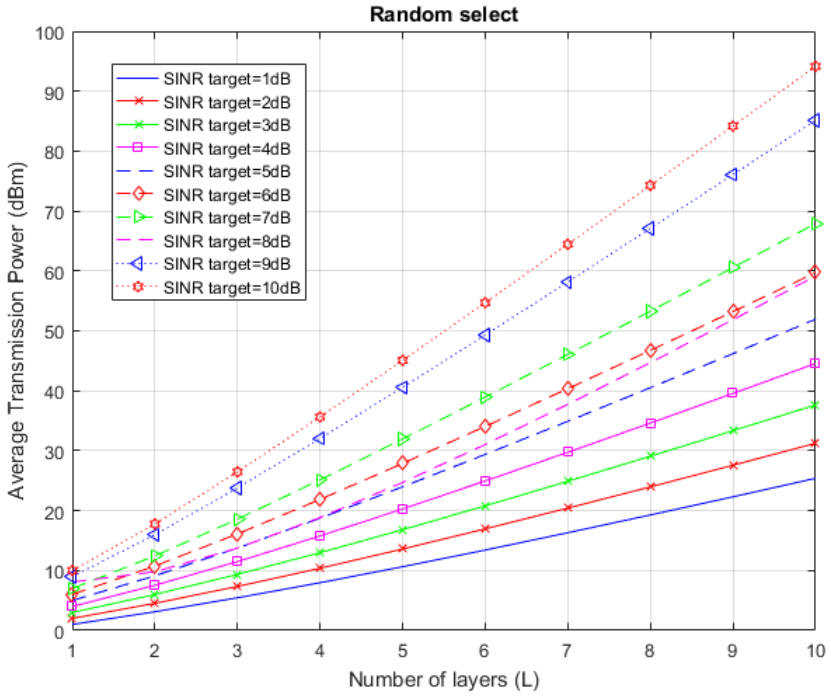
الشكل (3-4) الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على معلومات القناة تبعاً لعدد القنوات الجزئية M من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ وعدد الطبقات L

2.3.3. الطريقة الثانية: الاختيار العشوائي random selection (RS)

في هذه الطريقة، يختار كل مستخدم القناة الترددية والطبقة المستهدفة بشكل عشوائي ويكون الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال P_{max_2} مساوياً لمتوسط استطاعة الإرسال P_{ave_2}[27]:

$$\mathbb{E}[P_n] = P_{ave_2} = \frac{1}{L}\sum_{\ell=1}^{L} v_\ell E\left[\frac{1}{\alpha_{m,n}}\right] \propto \frac{1}{L}\sum_{\ell=1}^{L} v_\ell = P_{max_2} \qquad (8-3)$$

حيث v_ℓ مستوى الإستطاعة المستقبلة للطبقة ℓ والمعطى بالعلاقة (3-2). يبين الشكل (3-5) متوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد العشوائية تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ، حيث يتناسب هذا المتوسط طرداً مع نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ وعدد الطبقات L.

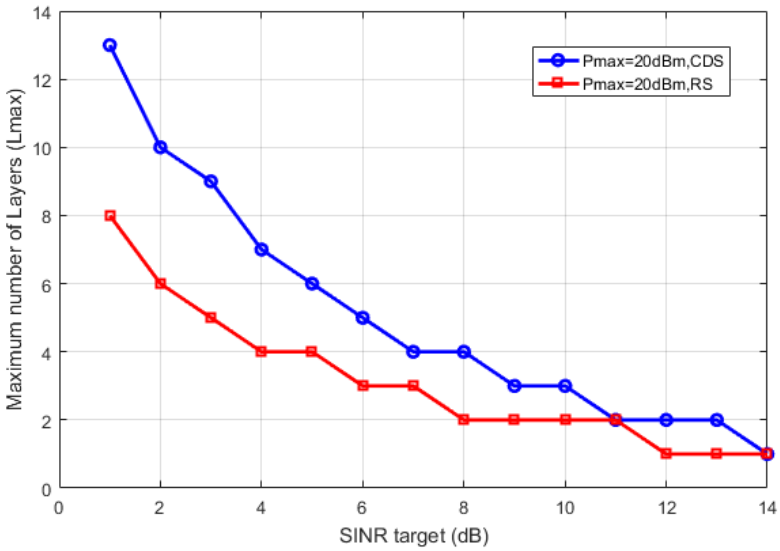


الشكل (3-5) متوسط استطاعة الإرسال في طريقة تخصيص الموارد العشوائية تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ

3.3.3. مقارنة بين طريقتي تخصيص الموارد

يعتمد الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المبين في العلاقة (3−7) من أجل الطريقة الأولى، على عدد الطبقات المستخدمة L، عدد القنوات الجزئية M، ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ. بينما لا يعتمد متوسط استطاعة الإرسال المبين في العلاقة (3−8) من أجل الطريقة الثانية على عدد القنوات الجزئية M . لكن تحتاج الطريقة الثانية (الاختيار العشوائي) لأن يكون الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال أكبر منها في الطريقة الأولى المعتمدة على القناة، حيث نجد من الشكلين(3−3) و (3−5) أنه من أجل $\Gamma = 5dB$ و $L = 6$ يكون الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال $P_{max_1} = 17.7dBm$ في الطريقة الأولى بينما في الثانية يكون $P_{max_2} = 29.4dBm$، وبالتالي توفر الطريقة الأولى استهلاك للطاقة أقل في أجهزة المستخدمين مقارنةً مع الطريقة الثانية.

يتناقص عدد الطبقات المستخدم في كلا طريقتي تخصيص الموارد كلما ازدادت نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ المطلوبة كما هو مبين في الشكل(3−6)، وذلك عند قيمة عظمى متاحة لمتوسط استطاعة الإرسال $P_{max} = 20dBm$ و$M = 48$ ، لكن في طريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة (الطريقة الأولى) يمكن تحقيق $L_{max_1} = 6$ من أجل قيمة $\Gamma = 5dB$ وحد أعلى لمتوسط الاستطاعة المرسلة $P_{max} = 20dBm$، أما في طريقة تخصيص الموارد بشكل عشوائي (الطريقة الثانية) يصل عدد الطبقات إلى $L_{max_2} = 4$ من أجل $P_{max} = 20dBm$.



الشكل (3–6) عدد الطبقات الأعظمي تبعاً لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ من أجل M=48 و P_max=18 ,20dBm

يرتبط الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{max} بقيمة الاستطاعة العظمى المتاحة للإرسال P_{max} حيث يكون:

$$\Gamma_{max} = P_{max} \qquad \text{وذلك من أجل } L = 1. \tag{9-3}$$

بشكل عام، تسمح الطريقة الأولى بزيادة عدد الطبقات بمقدار طبقة واحدة على الأقل وصولاً إلى زيادة بمقدار أربع طبقات عن الطريقة الثانية تبعاً لقيمة Γ المطلوبة كما هو مبين في الشكل(3–5). وبالتالي تتيح الطريقة الأولى زيادة عدد موارد النظام.

4.3. تحليل السعة

تعتمد السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم على عرض المجال المتاح B_a ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR$ (أو نسبة الإشارة للضجيج) وذلك تبعاً لشانون [7]:

$$capacity = B_a \log_2(1 + SINR) \tag{10-3}$$

حيث $B_a = \frac{B_T}{M}$ في النظام الهجين المقترح، أي أن السعة (معدل نقل المعلومات) ترتبط بعدد القنوات الترددية الجزئية.

من أجل تحليل تغيرات السعة تبعاً لعدد الطبقاتL نفرض أن عدد مستخدمي كل قناة ترددية جزئية m مساوي لعدد الطبقات L، وبالتالي تكتب الإشارة المستقبلة في العلاقة (3−5) كالآتي:

$$y_m(k) = \sum_{\ell=1}^{L} \sqrt{P_\ell} x_{m,\ell}(k) + w_m(k),\ k = 1,2,\dots,N_B,\ m = 1,2,\dots,M \qquad (11-3)$$

حيث $P_{m,n} = P_\ell = v_\ell$ استطاعة الإرسال المحددة في العلاقة (3−6) تبعاً للطريقة الأولى لتخصيص الموارد أو بشكل عشوائي تبعاً للطريقة الثانية، حيث v_ℓ معطى في العلاقة (3−2) وتحقق $\mathbb{E}\left[\left|x_{m,n}(k)\right|^2\right] = 1, \forall m,n,k$ ،$v_1 > v_2 > \cdots > v_L > 0, \ell = 1,\dots,L$. اعتماداً على أن المستقبل يستخدم حذف التداخل التتابعي SIC فإن نسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_{m,\ell}$ للمستخدم ℓ على القناة الجزئيةm تكتب بالصيغة التالية [27]:

$$SINR_{m,\ell} = \frac{v_\ell}{1+\sum_{i=\ell+1}^{L} v_i} \qquad (12-3)$$

يتم حساب المقدار $\sum_{i=\ell+1}^{L} v_i$ بالاعتماد على العلاقة (2) كالتالي:

$$\sum_{i=\ell+1}^{L} v_i = \Gamma(\Gamma+1)^{\mathrm{L}} \sum_{i=\ell+1}^{L} (\Gamma+1)^{-i}$$

$$= \Gamma(\Gamma+1)^{\mathrm{L}} \left[\sum_{i=0}^{L} (\Gamma+1)^{-i} - \sum_{j=0}^{\ell} (\Gamma+1)^{-j}\right]$$

$$= \Gamma(\Gamma+1)^{\mathrm{L}} \left[\frac{1-\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)^{L+1}}{1-\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)} - \frac{1-\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)^{\ell+1}}{1-\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)}\right]$$

$$= (\Gamma + 1)^{\mathrm{L}+1}\left[-\left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)^{L+1} + \left(\frac{1}{\Gamma+1}\right)^{\ell+1}\right]$$

$$= (\Gamma + 1)^{\mathrm{L}-\ell} - 1 \qquad (13\text{–}3)$$

بتعويض العلاقة (13–3) في العلاقة (12–3) نحصل على:

$$SINR_{m,\ell} = \Gamma \qquad (14\text{–}3)$$

حيث Γ نسبة الإشارة للتداخل والضجيج المطلوبة. وبالتالي يصبح معدل نقل المعطيات (أي السعة الممكن تحقيقها) لكل مستخدم للطبقة ℓ والقناة الجزئية m في النظام الهجين المقترح كالتالي:

$$R_{m,\ell} = \frac{B_T}{M}\log_2(1+\Gamma) \qquad (15\text{–}3)$$

حيث B_T عرض الحزمة الترددي الكلية للنظام، $\ell = 1,2,\dots,L,\ m = 1,2,\dots,M$.

من أجل تحليل مجموع معدل نقل المعطيات (أي السعة الكلية) في النظام، نفرض أن عدد المستخدمين الكلي يساوي عدد الموارد المتاحة (الطبقة والقناة الترددية) أي $N = LM$ وأن كل مستخدم يختار الطبقة والقناة الجزئية بشكل فريد بدون حدوث تصادم، وبالتالي يعطى مجموع معدل نقل المعطيات بالصيغة التالية:

$$R_{sum} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{\ell=1}^{L} R_{m,\ell} = LB_T\log_2(1+\Gamma) \qquad (16\text{–}3)$$

حيث $R_{m,\ell}$ معدل نقل المعطيات لمستخدم الطبقة ℓ والقناة الجزئية m والمعطى بالعلاقة (3–15).

يرتبط معدل نقل المعطيات لكل مستخدم في النظام الهجين المقترح بعدد القنوات الترددية الجزئية M ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المرغوبة Γ ولا يتعلق بعدد الطبقات L كما تبين العلاقة (3–15).

بينما يرتبط مجموع معدل نقل المعطيات بعدد الطبقات L ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المرغوبة Γ ولا يعتمد على عدد القنوات الترددية الجزئية M كما تبين العلاقة (3−16).

من أجل المقارنة نفرض نظام OMA المعتمد على النفاذ المتعدد بالتقسيم الترددي FDMA حيث يتم تقسيم المجال الترددي الكلي B_T إلى M_o قناة ترددية جزئية بعرض حزمة $B_o = \frac{B_T}{M_o}$، كما يتم تخصيص كل مستخدم بقناة جزئية $m_o = 1,2,\dots,M_o$ بشكل فريد. نفرض أن كل مستخدم يرسل بالاستطاعة العظمى المتاحة P_{max}، وبالتالي يمكن كتابة معدل إرسال المعطيات لكل مستخدم للقناة الترددية m_o في نظام OMA بالعلاقة: [20] [14]

$$R_{m_o}{}^{OMA} = \frac{B_T}{M_o}\log_2\left(1+\frac{Pmax}{P_{o,noise}}\right), \quad m_o = 1,2,\dots,M_o \qquad (17-3)$$

حيث M_o عدد القنوات الترددية الجزئية لنظام OMA، $P_{o,noise}$ استطاعة الضجيج على المجال الترددي الجزئي B_o في نظامOMA . بفرض قناة مثالية بضجيج أبيض غاوصي جمعي AWGN فقط وبما أن الضجيج مقيس على عرض المجال الترددي الجزئي B في النظام الهجين فإن استطاعة الضجيج تكون $P_{o,noise} = N_0 B_o = N_0 \frac{B_T}{M_o} = N_0 B \frac{M}{M_o} = P_{nois}\frac{M}{M_o} = \frac{M}{M_o}$. وبالتالي يصبح معدل إرسال المعطيات لكل مستخدم المعطى بالعلاقة (3−17) في نظام OMA كالتالي:

$$R_{m_o}{}^{OMA} = \frac{B_T}{M_o}\log_2\left(1+P_{max}\frac{M_o}{M}\right), \quad m_o = 1,2,\dots,M_o \qquad (18-3)$$

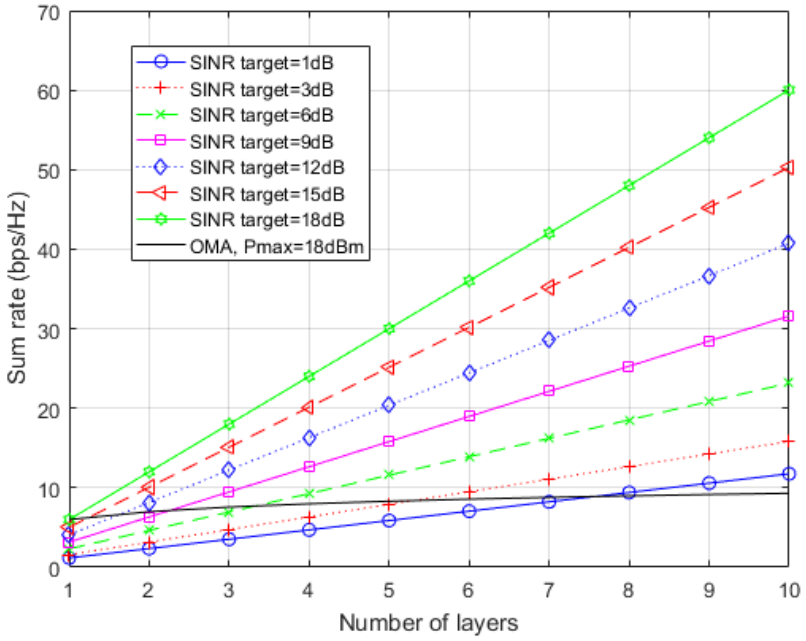
وبالتالي يكون المعدل الكلي للوصلة الصاعدة من أجل نظام OMA كمايلي:

$$R_{sum}^{OMA} = \sum_{m_o=1}^{M_o} R_{m_o}{}^{OMA} = B_T log_2(1+P_{max}\frac{M_o}{M}) \qquad (19-3)$$

من أجل تحليل تأثير مختلف المعاملات (عدد الطبقات، عدد القنوات الترددية الجزئية، ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المرغوبة Γ على أداء السعة للنظام الهجين المبينة في العلاقات(3−15) (3−16)، ومقارنتها مع السعة المبينة في العلاقات (3−18) و(3−19) لنظام OMA المعتمد على تقنية FDMA، يتم الحصول على النتائج العددية في بيئة MATLAB من أجل قيم المعاملات التالية: $B_T = 1Hz$, $P_{max} = 18dBm$.

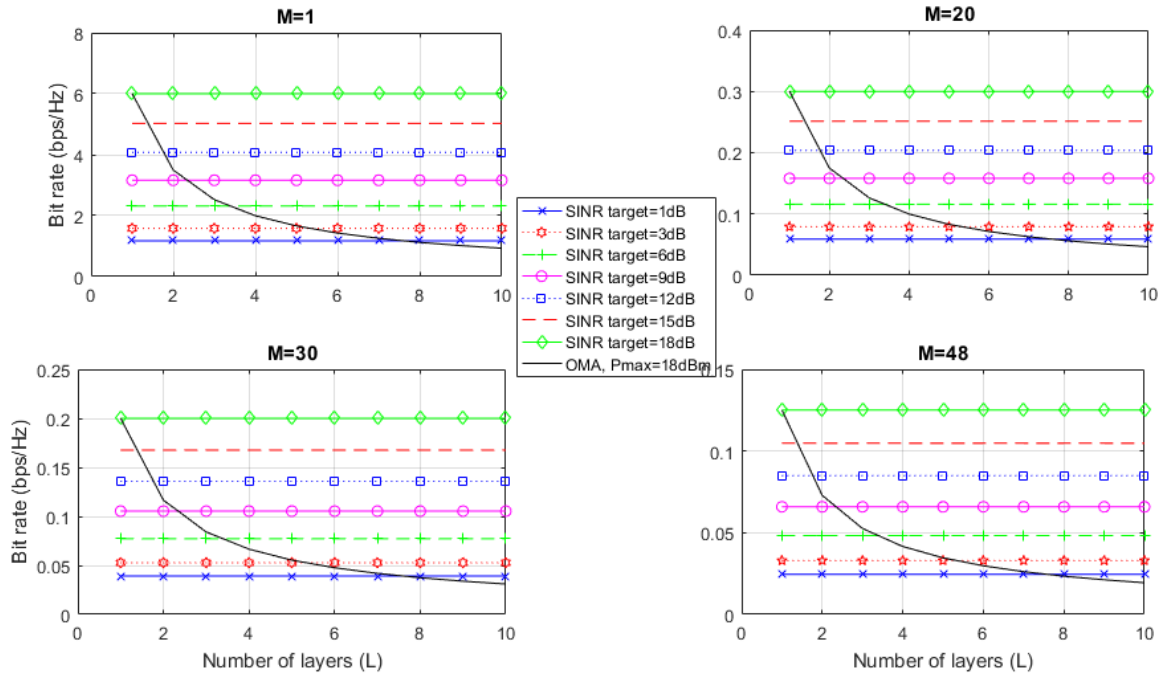
نفرض أن كلا النظامين (الهجين وOMA) يهدفان إلى تخديم نفس العدد من المستخدمين N من خلال تخصيص كل مستخدم بمورد واحد حيث يكون عدد الموارد في كل نظام مساوي لعدد المستخدمين، أي أن $N = ML$ في النظام المقترح و $M_o = N = ML$ في نظام OMA. أي أن النظام الهجين يعمل على زيادة عدد الطبقات L ونظام OMA على زيادة عدد القنوات الجزئية M_o (تقليل عرض المجال المخصص لكل مستخدم). يزداد مجموع السعة (مجموع معدل نقل المعطيات) في النظام الهجين بزيادة عدد الطبقات المستخدمة وقيمة Γ كما هو مبين في الشكل(3−7)، حيث يمكن تحقيق زيادة بنسبة 50% في مجموع السعة من خلال استخدام 6 طبقات بدلاً من 4 من أجل $\Gamma = 6dB$، أما في نظام OMA يمكن تحقيق 7.3% فقط وذلك من أجل $P_{max} = 18dBm$،

حيث يُصبح المعدل الكلي R_{sum}^{OMA} المبين في العلاقة (3−19) من أجل $M_o = N = ML$ كالآتي: $R_{sum}^{OMA} = B_T log_2(1 + P_{max}L)$. أي أن R_{sum}^{OMA} مرتبط بعدد الطبقات فقط في هذه الحالة حيث $M_o/M = L$.



الشكل (3–7) مجموع معدل نقل المعطيات تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ ، حيث $P_{max} = 18dBm$، و $M_o/M = L$.

يعتمد تحسين السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين على قيمة نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ بشكل أساسي والمحدودة باستطاعة الإرسال العظمى المتاحة تبعاً للعلاقة (3–9) كما هو مبين في الشكل (3–8)، حيث يمكن المحافظة على معدل نقل المعطيات لكل مستخدم، وبالإمكان زيادته باختيار قيمة Γ المناسبة. بينما تنخفض السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في نظام OMA كلما ازداد عدد المستخدمين. يمكن للنظام الهجين تحسين السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم بمقدار 39.45% مقارنةً مع نظام OMA وذلك من أجل $\Gamma = 6dB, L = 5$ عند $M =$ 1,20,30,48 أي مهما كان عدد المستخدمين المطلوب.



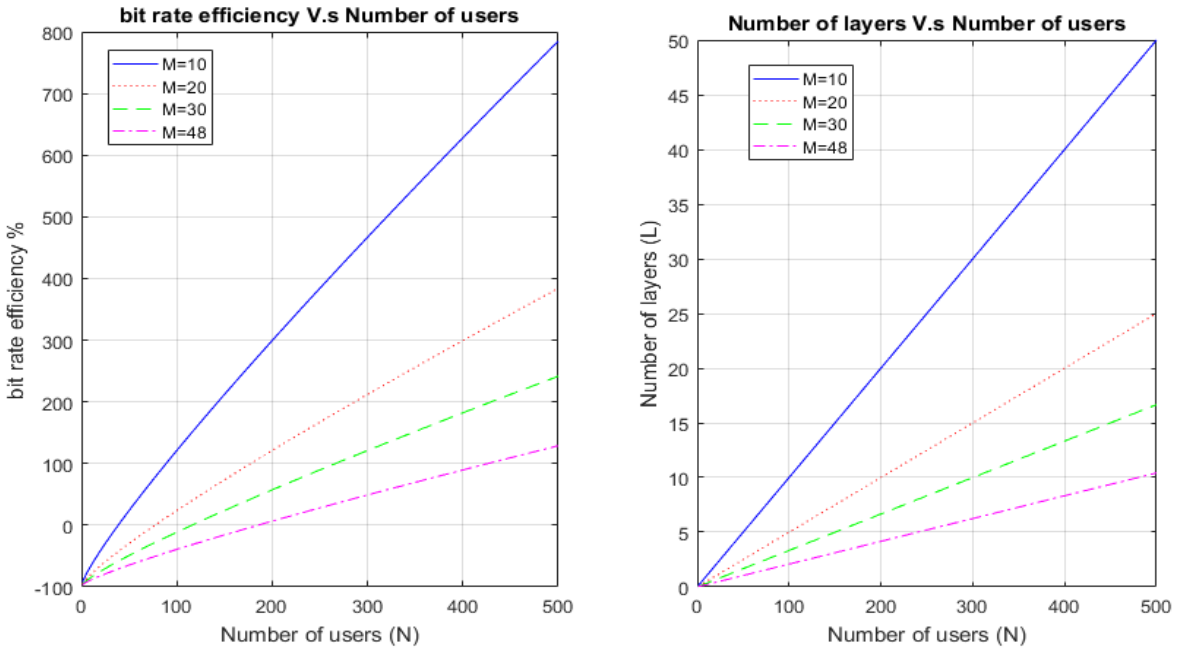
الشكل (3–8) معدل نقل المعطيات لكل مستخدم تبعاً لعدد الطبقات من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ وعدد القنوات الجزئية M حيث $P_{max} = 18dBm$، و $M_o = ML$.

يمثل الشكل(3–9–1) فعالية السعة BR_e الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع نظام OMA، والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$BR_e = 100 * (R_{m,\ell} - {R_{m_o}}^{OMA})/{R_{m_o}}^{OMA} \qquad (20–3)$$

حيث $R_{m,\ell}$ السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين والمعطاة بالعلاقة (3–15)، و ${R_{m_o}}^{OMA}$ السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في نظام OMA والمعطاة بالعلاقة (3–18). يتفوق أداء السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في نظام OMA مقارنةً مع الأداء في النظام الهجين عندما يكون عدد المستخدمين المطلوب أقل من $N = 185$ من أجل عدد القنوات الجزئية $M = 48$، $\Gamma = 5dB$، $P_{max} = 18dBm$ و $M_o = N$ ، كما هو مبين في الشكل (3–9–1). حيث يحتاج النظام الهجين إلى عدد طبقات يصل إلى 4 طبقات لتخديم عدد مستخدمين أقل من $N = 185$ كما هو مبين في الشكل (3–9–2). بينما يحقق النظام الهجين ربح في السعة عندما يكون عدد المستخدمين

أكثر من $N = 185$ من أجل نفس المعاملات، لكن هذا يتطلب تحديد عدد طبقات أكبر يصل إلى 11 طبقة.



الشكل (3-9) 1) فعالية السعة BR_e لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع نظام OMA تبعاً لعدد المستخدمين المطلوب تخديمهم. 2) عدد الطبقات المطلوب تبعاً لعدد المستخدمين في النظام المقترح. حيث Γ=5dB، عدد القنوات الجزئية $M = 10, 20, 30, 48$، $P_{max} = 18dBm$، و $M_o = N$.

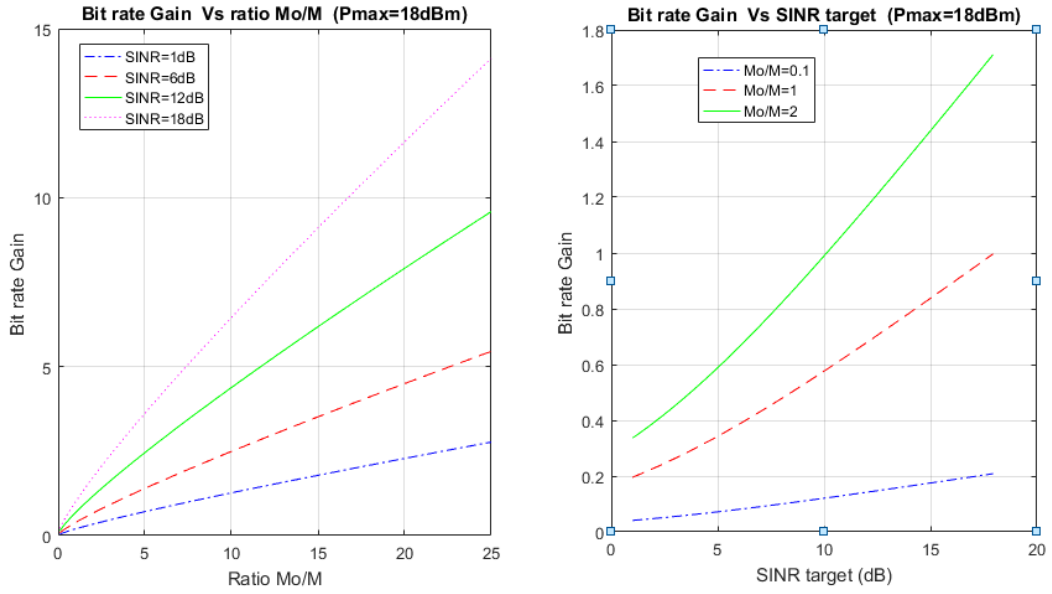
يحقق النظام الهجين زيادة في فعالية السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم مقارنةً مع نظام OMA في حالة عدم وجود أي تصادم (احتمال حدوث التصادم معدوم) ضمن سيناريو mMTC التي تفرض وجود عدد كبير من المستخدمين، وذلك من خلال زيادة عدد الطبقات المستخدمة. لكن يؤدي زيادة عدد الطبقات إلى زيادة الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال الحددة في العلاقتين (3-7) و (3-8) وذلك من أجل قيمة محددة لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ، وبالتالي استهلاك أكبر للطاقة.

إن زيادة عدد الطبقات يؤدي إلى زيادة عدد الموارد في النظام وتخفيض نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ من أجل حد أعلى محدد لمتوسط استطاعة الإرسال P_{max} . وبالتالي تنخفض السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام، لذلك يجب إجراء مقايضة لاختيار قيمة كل من عدد الطبقات و Γ المناسبين

لتحقيق السعة وعدد المستخدمين المرغوبين. من أجل متوسط استطاعة إرسال عظمى محددة، P_{max} يعطى مقدار ربح السعة BR_g الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع نظام OMA بالاعتماد على العلاقتين (3−15) و(3−18) بالعبارة التالية:

$$BR_g = R_{m,\ell}/R_{m_o}{}^{OMA} = \frac{M_o}{M}\frac{\ell og_2(1+\Gamma)}{\ell og_2\left(1+P_{max}\frac{M_o}{M}\right)} \qquad (21-3)$$

يتناسب الربح، المعطى في العلاقة (3−21)، طرداً مع قيمة Γ و النسبة $\frac{M_o}{M}$ كما هو مبين في الشكل(3−10)، حيث ربح السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم تبعاً لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ و النسبة $\frac{M_o}{M}$ من أجل $P_{max} = 18dBm$. من الشكل (3−10) نلاحظ أنه لا يمكن تحقيق أي ربح في السعة الممكن تحقيقها في النظام الهجين عندما تكون النسبة $\frac{M_o}{M} < 1$ من أجل أي قيمة لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $\Gamma \leq \Gamma_{max}$، حيث Γ_{max} نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأعظمية المعطاة بالعلاقة (3−9).



الشكل (3−10) ربح السعة BR_g الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين مقارنةً مع نظام (1 OMA تبعاً للنسبة M_o/M من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ ، 2 (تبعاً لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ من أجل قيم مختلفة للنسبة $\frac{M_o}{M}$. حيث $P_{max} = 18dBm$.

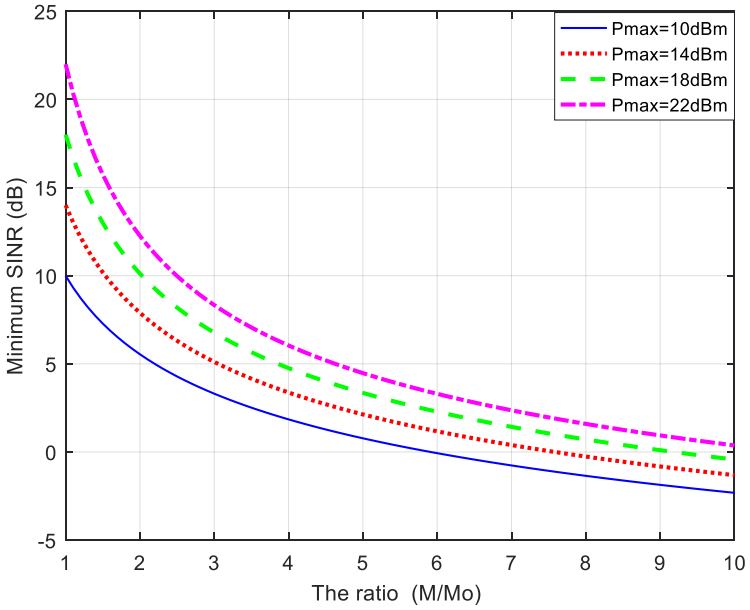
تبين النتائج العددية في الشكل (3−10) أنه يجب اختيار عدد القنوات الجزئية M في النظام الهجين بحيث يكون $\frac{M_o}{M} \geq 1$ من أجل تحقيق سعة لكل مستخدم لا تقل عن تلك المحققة في نظام OMA. بالتالي يمكن تحديد الحد الأعلى لعدد القنوات الجزئية M في النظام المقترح كمايلي:

$$BR_g \geq 1 \ if \ M \leq M_{max} = M_o \ , \ \forall \Gamma \leq \Gamma_{max} = P_{max} \qquad (22-3)$$

حيث BR_g ربح السعة المعطى بالعلاقة (3−21). بنفس الطريقة، يمكن الحصول على الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_{min}$ عند قيمة محددة للاستطاعة P_{max} وقيم للنسبة $\frac{M_o}{M} \geq 1$ من أجل الحصول على $BR_g \geq 1$ كمايلي:

$$BR_g \geq 1 \ if \ \Gamma \geq (1 + P_{max}\frac{M_o}{M})^{M/M_o} - 1 = SINR_{min} \leq \Gamma_{max} \ , \ \forall \frac{M_o}{M} \geq 1 \qquad (23-3)$$

يبين الشكل(3−11) الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_{min}$ المعطى بالعلاقة (3−23) تبعاً للنسبة $\frac{M_o}{M} \geq 1$ من أجل قيم مختلفة للاستطاعة P_{max}، حيث نلاحظ أن هذا الحد يصبح أصغر أو يساوي $0dB$ عند بعض القيم للنسبة $\frac{M_o}{M}$ فمثلاً يكون $SINR_{min} \leq 0dB$ من أجل $\frac{M_o}{M} \geq 9.1$ عند $P_{max} = 18dBm$. وبالتالي يصبح من الصعب فصل الإشارات في المستقبل وانخفاض كبير في جودة الوصلة في مثل هذه الحالات.



الشكل (3–11) الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_{min}$ المعطى بالعلاقة (3–23) تبعاً للنسبة $\frac{M_o}{M} \geq 1$ من أجل قيم مختلفة للاستطاعة P_{max}

من أجل تجنب حالات أن يكون $SINR_{min} \leq 0dB$ عند قيم محددة لعدد القنوات الجزئية M، وبما أن معدل نقل المعطيات المعطى في العلاقة (3–15) متزايد تبعاً لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ نفرض وجود حد أدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} ويكون ضمن المجال $0dB < \Gamma_{min} \leq \Gamma_{max}$، وبالتالي يصبح الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $SINR_{min}$ المعطى بالعلاقة (3–23) كالآتي:

$$SINR_{min} = \max\{\Gamma_{min}, (1 + P_{max}\frac{M_o}{M})^{M/M_o} - 1\} \leq \Gamma_{max}, \mathrm{M} \leq M_o \qquad (24\text{–}3)$$

حيث Γ_{max} نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأعظمية المعطاة في العلاقة(3–9)، و Γ_{min} الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج والذي يتم اختياره بشكل عشوائي وتحقق $\Gamma_{min} \leq \Gamma_{max}$ حيث سنرى تأثير اختيار هذه القيمة لاحقاً.

5-3 الخلاصة

قدمنا في هذا الفصل نموذج لسيناريو وصلة صاعدة بين عدة مستخدمين ومحطة قاعدية، من خلال تطبيق النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD_NOMA مع نظام نفاذ متعدد متعامد OMA، حيث تضيف تقنية PD_NOMA موارد جديدة للنظام هي الطبقات إضافةً إلى الموارد الترددية التي يتيحها نظام OMA، والتي تؤدي إلى تحسين سعة النظام والسعة لكل مستخدم مقارنةً مع نظام OMA، بالإضافة إلى توفير استهلاك الطاقة من خلال الاختيار المناسب للمعاملات التالية: عدد الطبقات، عدد القنوات الجزئية ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج.

الفصل الرابع

إنتاجية التوصيل

Connection Throughput

1.4. مقدمة

نقدم من خلال هذا الفصل تحليل لأثر عدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية على أداء إنتاجية التوصيل للنظام المقترح في الفصل الثالث، حيث تُعرّف إنتاجية التوصيل Connection Throughput للنظام بأنها متوسط عدد الأجهزة التي يمكنها الإرسال بشكل صحيح على الموارد المتاحة (الطبقات و/أو القنوات الجزئية)، حيث يحدث الفشل في الإرسال عند حدوث تصادم أي عندما يختار أكثر من مستخدم الموارد ذاتها(القناة الجزئية والطبقة في النظام المقترح، القناة الجزئية في نظام OMA)، أو عندما يحدث تصادم على إحدى الطبقات ذات مستوى الاستطاعة الأعلى من أجل مستقبل SIC في النظام المقترح والذي يؤدي إلى عدم القدرة على فصل وكشف إشارات مستخدمي هذه الطبقة والطبقات ذات مستوى الاستطاعة الأقل. كما يتضمن هذا الفصل صياغة لمسألة أعظم إنتاجية توصيل يمكن تحقيقها في النظام ضمن قيود الاستطاعة والسعة لكل مستخدم، ومن ثم إيجاد الحل الأمثلي لهذه المسألة باستخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية.

2.4. تحليل إنتاجية التوصيل

1.2.4. إنتاجية التوصيل في النظام الهجين المقترح

يفرض النظام المقترح في الفصل السابق، وجود N مستخدم نشط يتنازعون على ML مورد، حيث يمثل L عدد الطبقات وتملك كل طبقة ℓ عدد من القنوات الترددية الجزئية M . من أجل التبسيط الرياضي، نفرض أن عدد المستخدمين النشطين لكل طبقة متساوي أي $N_\ell = \frac{N}{L}$، حيث توزع منتظم للمستخدمين حول المحطة القاعدية مركز الدائرة ذات نصف القطر D . يحدث تصادم الطبقة على كل قناة ترددية جزئية m عندما يختار أكثر من مستخدم نفس الطبقة ℓ (بالاعتماد على إحدى طريقتي تخصيص الموارد المذكورة في الفقرة 3-3)، وبالتالي عدم القدرة على فك ترميز إشارات المستخدمين.

إن حدث تصادم الطبقة غير مستقل وذلك لأن حدوث هذا التصادم على الطبقة ℓ يؤدي إلى عدم القدرة على فك ترميز إشارات الطبقات ذات مستوى الاستطاعة الأقل أي الطبقات $\ell+1,\dots,L$ حتى عند عدم حدوث أي تصادم على هذه الطبقات حيث $v_1 > v_2 > \cdots > v_L > 0$، بينما لا يتأثر فك ترميز إشارات مستخدمي الطبقات $1,\dots,\ell-1$ بحدوث التصادم على الطبقة ℓ . يعتمد احتمال التوصيل الناجح والفريد لمستخدم نشط إلى موارد النظام على احتمال اختيار الطبقة على القناة الترددية الجزئية بشكل وحيد وعدم حدوث تصادم على الطبقات ذات مستويات الاستطاعة الأعلى. يمكن كتابة احتمال التوصيل الصحيح للطبقة ℓ بالعلاقة التالية[26]:

$$P_\ell^{con} = (1-\tfrac{1}{M})^{\ell\frac{N}{L}-1}(1-\tfrac{\frac{N}{L}}{M-1})^{\ell-1},\ \ell=1,\dots,L \qquad (1-4)$$

حيث L عدد الطبقات، $\frac{N}{L}$ عدد مستخدمي الطبقة ℓ، و M عدد القنوات الترددية الجزئية.

أما احتمال التوصيل الصحيح في النظام المقترح فيعطى بالصيغة التالية:

$$P_{NOMA}^{con} = \frac{1}{L}\sum_{\ell=1}^{L} P_\ell^{con} \qquad (2-4)$$

حيث P_ℓ^{con} احتمال التوصيل الصحيح للطبقة ℓ والمعطى بالعلاقة $(4-1)$.

يمكن تحديد إنتاجية التوصيل لكل طبقة ℓ كالآتي:

$$T_\ell^{con} = N_\ell P_\ell^{con} = \tfrac{N}{L}(1-\tfrac{1}{M})^{\ell\frac{N}{L}-1}(1-\tfrac{\frac{N}{L}}{M-1})^{\ell-1},\ \ell=1,\dots,L \qquad (3-4)$$

حيث P_ℓ^{con} احتمال التوصيل الصحيح للطبقة ℓ المعطى بالعلاقة $(4-1)$. وبالتالي تكتب إنتاجية التوصيل للنظام المقترح بالصيغة التالية[26]:

$$T = \sum_{\ell=1}^{L} T_\ell^{con} = \frac{N}{L}\sum_{\ell=1}^{L}(1-\tfrac{1}{M})^{\ell\frac{N}{L}-1}(1-\tfrac{\frac{N}{L}}{M-1})^{\ell-1} \qquad (4-4)$$

2.2.4. إنتاجية التوصيل في نظام OMA

من أجل المقارنة، نفرض نظام OMA بالاعتماد على تقسيم المجال الترددي إلى M_o قناة ترددية جزئية فقط، أي يتنازع المستخدمون على هذه القنوات الترددية ويحدث التصادم عندما يختار أكثر من مستخدم نفس القناة الترددية الجزئية. يختار كل مستخدم القناة الترددية بشكل مستقل وغير مرتبط مع باقي المستخدمين، كذلك يمكن اعتبار احتمال التوصيل الصحيح في نظام OMA حالة خاصة من العلاقة (4−1)، حيث $L = 1$ و $M_o = M$،بالتالي يمكن كتابة احتمال التوصيل الصحيح في نظام OMA من كالآتي:

$$P_{OMA}^{con} = \frac{1}{L}\sum_{\ell=1}^{L} P_{\ell}^{con}\,|_{L=1,M_o=M} = (1-\tfrac{1}{M_o})^{N-1} \qquad (5-4)$$

أما إنتاجية التوصيل لنظام OMA فهي أيضاً حالة خاصة من النظام الهجين من أجل $L = 1$، يمكن كتابتها كالآتي:

$$T^{OMA} = T|_{L=1,M_o=M} = N(1-\tfrac{1}{M_o})^{N-1} \qquad (6-4)$$

حيث T إنتاجية التوصيل في النظام الهجين والمعطاة بالعلاقة (4−4).

يتيح استخدام نظام هجين إمكانية التحكم بانتاجية التوصيل من خلال درجتي حرية: عدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية M، بينما يتيح نظام OMA درجة حرية واحدة هي عدد القنوات الجزئيةM_o، مع ذلك لا تتجاوز القيمة العظمى للإنتاجية في كلا النظامين عدد الموارد المتاح ضمن كل نظام، أي:

$$\max_{1\le N\in Z} T \le ML = N_{RB}, \quad for\ hybrid\ NOMA\ \&\ OMA \qquad (7-4)$$

$$\max_{1\le N\in Z} T^{OMA} \le M_o = N_{RB}^{OMA}, \qquad for\ OMA\ only \qquad (8-4)$$

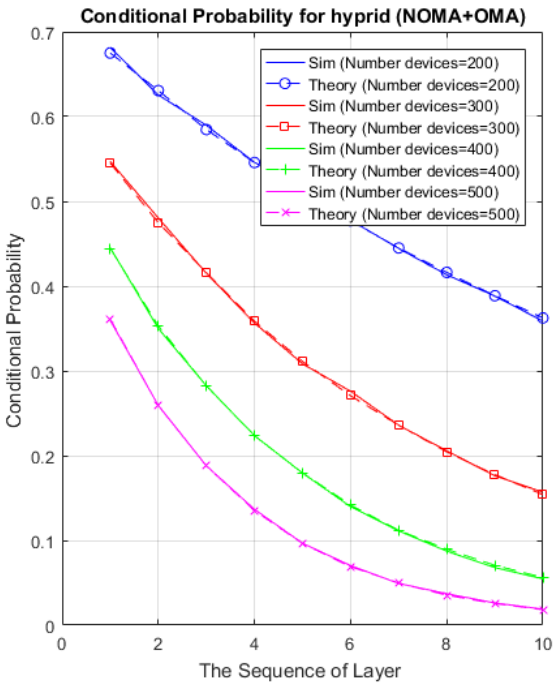
حيث N عدد المستخدمين، T إنتاجية التوصيل في النظام الهجين والمعطاة بالعلاقة (4-4)، T^{OMA} إنتاجية التوصيل في نظام OMA والمعطاة بالعلاقة (4-6)، $N_{RB} = ML$ عدد الموارد المتاحة ضمن النظام الهجين، و $M_o = N_{RB}^{OMA}$ عدد الموارد المتاحة ضمن نظام OMA. يمكن حساب القيمة الصغرى المطلوبة M_o^{min} لعدد القنوات الجزئية M_o من أجل تحقيق قيمة عظمى لإنتاجية توصيل في نظام OMA مساوية للقيمة العظمى لإنتاجية التوصيل في النظام الهجين عند قيم محددة لعدد الطبقات L وعدد القنوات الجزئية M كالآتي:

$$M_o^{min} = min\{M_o | \max_{1 \le N \in Z} T^{OMA} \ge \max_{1 \le N \in Z} T\} \qquad (9-4)$$

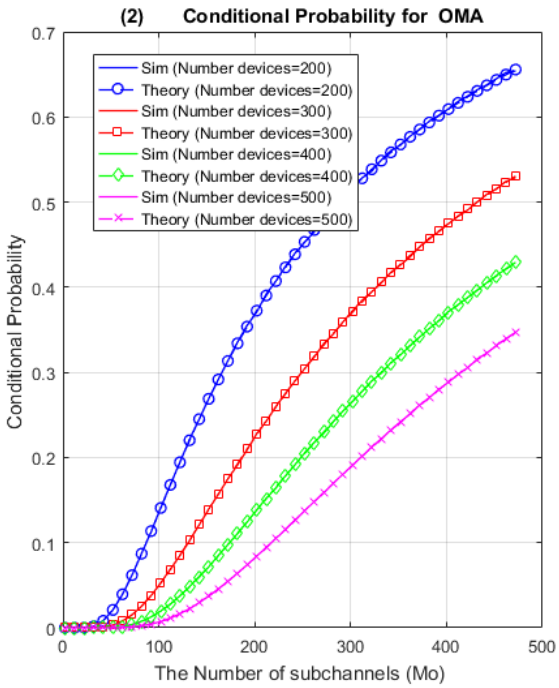
حيث $\max_{1 \le N \in Z} T$ إنتاجية التوصيل العظمى الممكن تحقيقها في النظام الهجين والمعطاة بالعلاقة (4-7)، و $\max_{1 \le N \in Z} T^{OMA}$ إنتاجية التوصيل العظمى الممكن تحقيقها في نظام OMA والمعطاة بالعلاقة (4-8).

3.2.4. النتائج العددية والمحاكاة

نستخدم خوارزمية Monte Carlo بتكرار 1000مرة من أجل التحقق من صحة النتائج العددية لاحتمال التوصيل الصحيح لكل طبقة ℓ في النظام الهجين واحتمال التوصيل الصحيح في نظام OMA المبينين في العلاقتين (4-1) و(4-5) على الترتيب. يتناسب احتمال التوصيل الصحيح لكل طبقة ℓ عكساً مع قيمة ℓ ، بالإضافة إلى أنه يزداد كلما كان عدد المستخدمين أقل كما هو مبين في الشكل (4-1-1)، حيث $M = 48, L = 10$. بينما يتناسب احتمال الارتباط الصحيح في نظام OMA طرداً مع عدد القنوات الجزئية M_o، بالإضافة إلى أنه يزداد كلما كان عدد المستخدمين أقل كما هو مبين في الشكل (4-1-2).



(1)

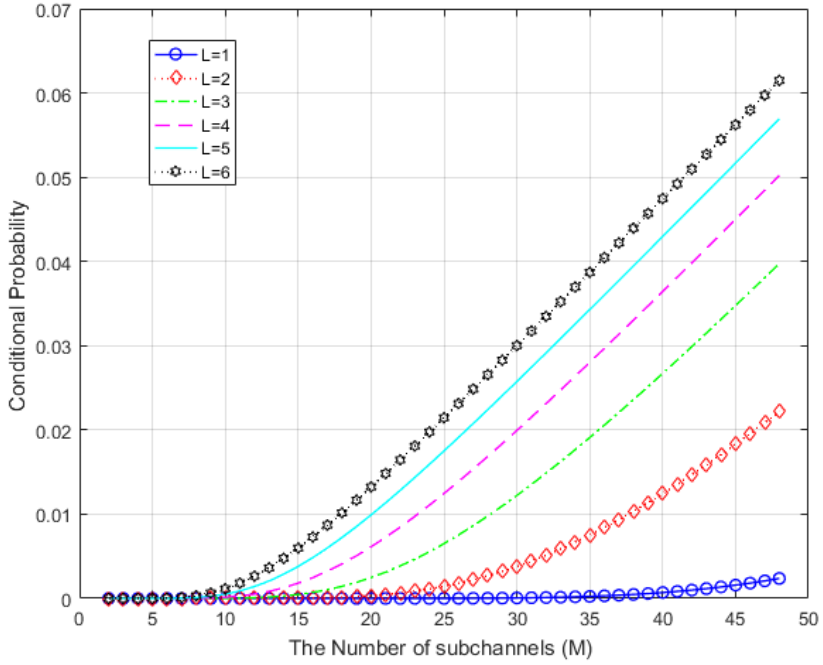


(2)

الشكل (4−1) النتائج العددية ونتائج المحاكاة 1) لاحتمال التوصيل(العلاقة(4−1)) لكل طبقة في النظام الهجين تبعاً لرقم الطبقة من أجل M=48,L=10، 2) لاحتمال التوصيل(العلاقة(4−5)) تبعاً لعدد القنوات الجزئية M_o في نظام OMA . حيث عدد المستخدمين N=200,300,400,500

يتزايد احتمال التوصيل الصحيح في النظام الهجين والمبين في العلاقة (4−2)، بزيادة عدد الطبقات وعدد القنوات الترددية الجزئية كما هو مبين في الشكل (4−2)، حيث تم اعتماد المعاملات التالية من النتائج المبينة في الشكل (3−5): العدد الأعظمي للطبقات $L_{max} = 6$، العدد الأعظمي لعدد القنوات $M_{max} = 48$ وعدد المستخدمين $N = M_{max}\, L_{max}$ من أجل حد أعلى لمتوسط الاستطاعة المرسلة $P_{max} = 18dBm$ و $\Gamma = 5dB$. أما احتمال التوصيل في نظام OMA مطابق لاحتمال التوصيل الصحيح في النظام الهجين من أجل $L = 1$ كما ذكرنا سابقاً، حيث يتيح نظام OMA درجة حرية واحدة هي عدد القنوات الجزئية ويكون احتمال التوصيل الصحيح أعظمياً عند $M_o = M_{max} =$ 48 (حيث أعظم قيمة لعدد القنوات في هذا النموذج). بينما يتيح استخدام النظام الهجين إمكانية زيادة احتمال التوصيل الصحيح من خلال التحكم بعدد الطبقات إضافةً إلى عدد القنوات الجزئية، حيث يمكن تحقيق احتمال توصيل صحيح أكبر من احتمال التوصيل الأعظمي في نظام OMA وذلك من خلال

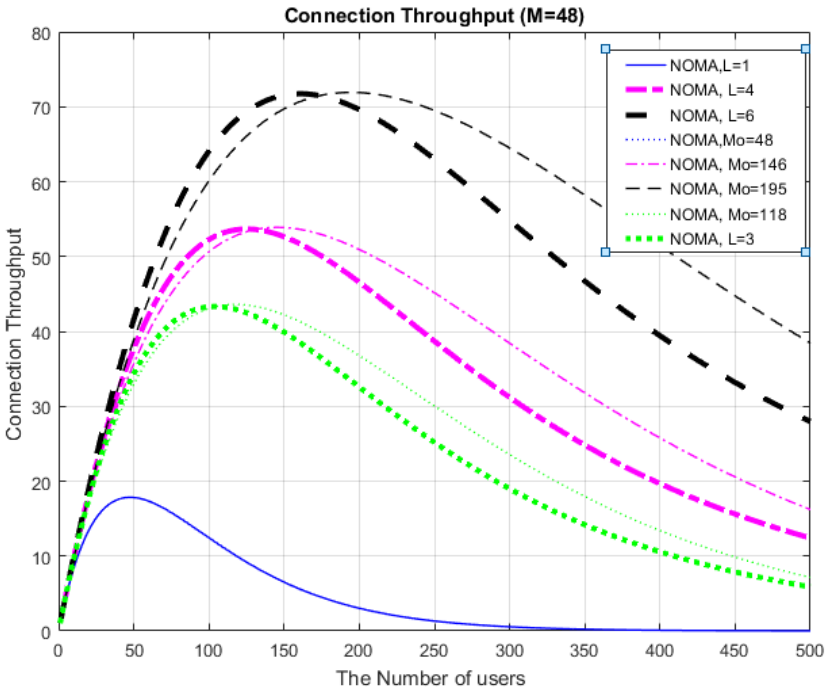
رفع عدد الطبقات وتقليل عدد القنوات الجزئية. فمثلاً من الشكل (4−2)، يمكن تحقيق احتمال توصيل أكبر من 0.0024 (الذي يمثل احتمال التوصيل الصحيح الأعظمي في نظام OMA عند$M_o = 48$) باختيار $M \geq 28$ من أجل $L = 2$، و $M \geq 12$ من أجل $L = 6$.



الشكل (4−2) احتمال التوصيل في النظام المقترح تبعاً لعدد القنوات الجزئية في النظام الهجين من أجل قيم L≤6 عدد مستخدمين N=288

تتناسب القيمة العظمى للإنتاجية طرداً مع عدد الطبقات L وعدد القنوات الجزئية M في النظام المقترح (العلاقة(4−4)) وطرداً أيضاً مع عدد القنوات الجزئية M_o في نظام OMA (العلاقة(4−6))، كما هو مبين في الشكل(4−3). حيث قيم مختلفة لعدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية $M = 48$ للنظام الهجين وقيم مختلفة لعدد القنوات الجزئية M_o محددة من العلاقة (4−9) في نظام OMA. تتزايد إنتاجية التوصيل في النظام المقترح مع عدد المستخدمين وصولاً إلى قيمة عظمى ومن ثم تتناقص بعدها، أي عندما يكون هناك حمل زائد على النظام. يحقق النظام الهجين إنتاجية عظمى 31 من أجل$L = 2$ و $M = 48$ عندما يكون عدد المستخدمين $N = 84 < ML = 96$، بينما يحتاج نظام OMA إلى $M_o = 86$ من أجل تحقيق هذه القيمة. أما من أجل $L = 6$ و $M = 48$ يحقق

النظام الهجين إنتاجية عظمى 71 عندما يكون عدد المستخدمين $N = 161 < ML = 288$، بينما يحتاج نظام OMA إلى $M_o = 195$ من أجل تحقيق هذه القيمة .



الشكل (4-43) إنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين من أجل قيم مختلفة لعدد الطبقات عند قيمة M=48 في النظام الهجين، ومن أجل قيم مختلفة لعدد القنوات الجزئية M_o في نظام OMA

يبين الشكل (4-4) عدد المستخدمين الذي تكون عنده إنتاجية النظام أعظمية تبعاً لعدد الموارد المتاحة في النظام، حيث نلاحظ أن القيمة العظمى للإنتاجية في كلا النظامين تكون عند عدد مستخدمين أصغر من عدد الموارد، أي أنه من أجل عدد طبقات L وعدد قنوات جزئية M محددين في النظام الهجين، يعطى عدد المستخدمين الذي تكون عنده الإنتاجية أعظمية بالصيغة التالية:

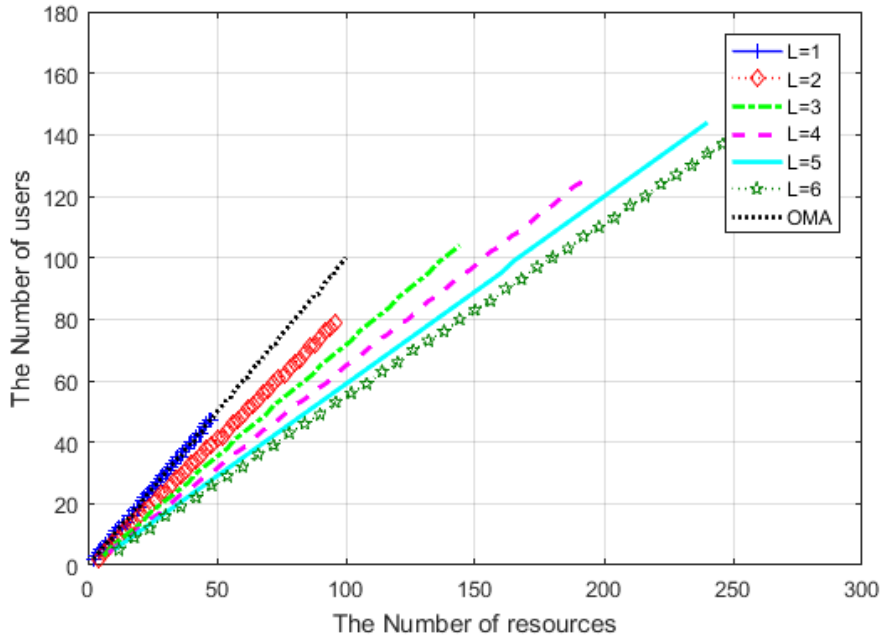
$$N_{T_{max}} = \{N | \max_{1 \le N \in Z} T\} \le N_{RB} \qquad (10\text{-}4)$$

حيث $\max_{1 \le N \in Z} T$ القيمة العظمى للإنتاجية الممكن تحقيقها في النظام الهجين، و N_{RB} عدد الموارد المتاحة في النظام المبين في العلاقة (4-7).

كذلك يعطى عدد المستخدمين الذي تكون عنده الإنتاجية أعظمية في نظام OMA من أجل قيمة محددة لعدد القنوات الجزئية M_o، بالصيغة التالية:

$$N_{T_{max}}^{OMA} = \{N | \max_{1 \le N \in Z} T^{OMA}\} \le N_{RB}^{OMA} \qquad (11-4)$$

حيث $\max_{1 \le N \in Z} T^{OMA}$ القيمة العظمى للإنتاجية الممكن تحقيقها في نظام OMA، و N_{RB}^{OMA} عدد الموارد المتاحة في النظام المبين في العلاقة (4-8).



الشكل (4-4) عدد المستخدمين الذي تكون عنده إنتاجية النظام أعظمية تبعاً لعدد الموارد المتاحة M×L في النظام

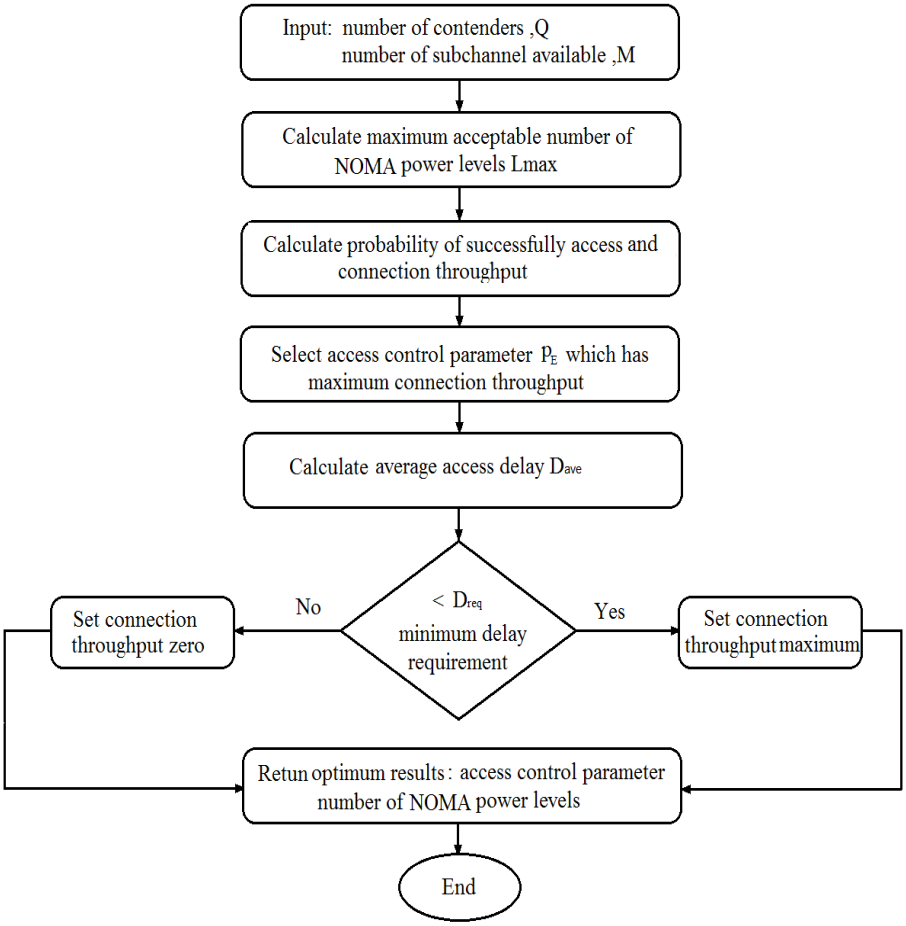
تتناقص إنتاجية التوصيل من أجل عدد مستخدمين $N_{T_{max}} \le N$ (ومن أجل $N \le N_{T_{max}}^{OMA}$ في نظام OMA) في النظام المقترح، أي تتناقص عندما يكون هناك حمل زائد على النظام، حيث يمكن تحسين الإنتاجية في هذه الحالة من خلال حل مسألة أمثلة إنتاجية التوصيل ضمن زمن تأخير محدد باستخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ ذات المخطط التدفقي المبين في الشكل(4-5) [1].

يمكن الحفاظ على القيمة العظمى التي يمكن الوصول إليها حتى بعد تزايد عدد المستخدمين الفعالين ضمن هذا الزمن وفق الإجرائية التالية[26]:

1- حساب القيمة الأمثلية لمعامل التحكم بالنفاذ $P_E(0 < P_E \leq 1)$ الخاص بآلية EABEnhanced Access Barring والقيمة الأمثلية لعدد الطبقات L في المحطة القاعدية بعد وضع القيم البدائية في كل شقب زمني time slot وبث هذه القيم.

2- توليد عدد عشوائي p من قبل كل جهاز لديه رزمة للإرسال. فإذا كان $p < P_E$ يتم حساب استطاعة الإرسال بالاعتماد على L وفقاً للطريقة المتبعة في تخصيص الموارد ويرسل معطياته بهذه الإسطاعة. أما في الحالة المعاكسة $p \geq P_E$ فإنه يتراجع عن الإرسال وينتظر إلى الحيز الزمني اللاحق المتاح.

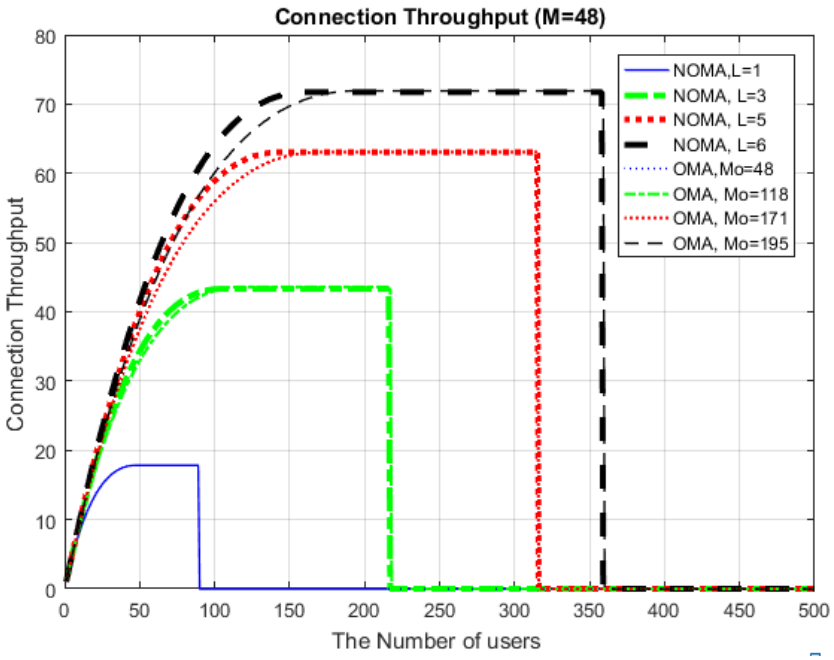
3- ينجح الإرسال عندما يتلقى الجهاز رسالة تأكيد من المحطة القاعدية ضمن مدة زمنية محددة تدل على استقبال وفك ترميز المعطيات بشكل صحيح من قبل المحطة. وفي حالة عدم تلقي هذه الرسالة ينتظر الجهاز إلى الحيز الزمني اللاحق المتاح.



الشكل (4–5) المخطط التدفقي لخوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ

يبين الشكل (4–6) النتائج العددية لإنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين باستخدام الإجرائية السابقة من أجل قيم مختلفة لعدد الطبقات L وعدد القنوات الجزئية $M = 48$، حيث فرضنا أن زمن التأخير المطلوب $D_{req} = 1ms$ والحيز الزمني بدور $T_P = 0.2ms$ وتم وضع الإنتاجية على القيمة الصفرية عند تجاوز زمن التأخير المطلوب D_{req} . بمقارنة نتائج استخدام هذه الإجرائية مع النتائج المبينة في الشكل(4–3) من أجل حالات حمل زائد على النظام، نجد تحسين بقيمة الإنتاجية عند هذه الحالات، على سبيل المثال، من أجل $M = 48, L = 5$ تحقق الإجرائية إنتاجية بمقدار 63 عندما يكون عدد المستخدمين $N = 315$، بينما تكون الإنتاجية 40 في الشكل (4–3) عند $N = 315$ ،

أي تحقيق ربح بالإنتاجية بمقدار 57.5% باستخدام هذه الخوارزمية مقارنةً مع عدم استخدامها(الشكل(4−3)).



الشكل (4−6) النتائج العددية لإنتاجية التوصيل في النظام الهجين تبعاً لعدد المستخدمين باستخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ من أجل M=48 ، زمن التأخير المطلوب $D_{req} = 1ms$ والحيز الزمني بدور $T_P =$ $0.2ms$ ، ومن أجل قيم مختلفة لعدد القنوات الجزئية M_o في نظام OMA

يتيح استخدام النظام الهجين إمكانية زيادة إنتاجية التوصيل من خلال زيادة عدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية، بينما يمكن زيادة إنتاجية التوصيل في نظام OMA من خلال زيادة عدد القنوات الجزئية فقط، وبالتالي يصبح استخدام النظام الهجين أكثر فعالية من نظام OMA في سيناروهات mMTC التي تتطلب إنتاجية توصيل كبيرة قد لا يستطيع نظام OMA تحقيقها حيث أن عدد الموارد المتعامدة محدود.

3.4. أمثلة إنتاجية التوصيل

تعتمد إنتاجية التوصيل في النظام المقترح على عدد الطبقات L وعدد القنوات الجزئية M، حيث يمكن رفع هذه الإنتاجية بزيادة أحدهما أو كلاهما، لكن زيادة عدد الطبقات سيؤدي إلى تقليل نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ كما هو مبين في الشكل (3−6)، وذلك عند قيمة عظمى محددة لمتوسط استطاعة

الإرسال المعطاة بالعلاقتين (3−7) و(3−8)، وبالتالي انخفاض قيمة معدل نقل المعطيات الممكن تحقيقه لكل مستخدم (السعة لكل مستخدم) تبعاً لقيمة Γ كما هو مبين في العلاقة (3−15). كذلك زيادة عدد القنوات الجزئية M سيؤدي إلى انخفاض معدل نقل المعطيات لكل مستخدم المعطى بالعلاقة (3−15). أما في نظام OMA، تعتمد إنتاجية التوصيل على عدد القنوات الجزئية M_o الذي تؤدي زيادته إلى رفع الإنتاجية وتخفيض معدل نقل المعطيات لكل مستخدم المعطى بالعلاقة (3−18) كما هو مبين في الشكل (3−8). بالإضافة إلى ذلك، ترتبط القيمة العظمى لإنتاجية التوصيل الممكن تحقيقها في النظام المقترح على اختيار قيمة المعاملات التالية: عدد الطبقات L ، عدد القنوات الجزئية M، ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ، وذلك من أجل متطلبات جودة الخدمة وقيود الاستطاعة المفروضة، أي من أجل حد أدنى لمعدل نقل المعطيات لكل مستخدم R_{min} وحد أعلى لمتوسط استطاعة الإرسال P_{max} . أي أنه من أجل النظام المقترح يمكن صياغة المسألة التالية:

$$\max_{L,M} \max_{N} T$$

$$S.t: \begin{cases} R \geq R_{min} \\ P \leq P_{max} \\ 1 \leq L \in Z \\ 1 \leq M \in Z \\ 1 \leq N \in Z \end{cases} \qquad (12-4)$$

حيث T إنتاجية التوصيل في النظام الهجين والمعطاة بالعلاقة (4−4)، $R = R_{m,\ell}$ معدل نقل المعطيات لكل مستخدم المعطى بالعلاقة (3−15)، $P = P_{max-1} or P_{max-2}$ الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المحدد بالعلاقة (3−7) أو (3−8) بالترتيب تبعاً لطريقة تخصيص الموارد المتبعة، L عدد الطبقات، M عدد القنوات الجزئية، Γ نسبة الإشارة للتداخل والضجيج (dB)، و N عدد المستخدمين.

من أجل تبسيط المسألة المطروحة بالعلاقة (4−12) نعتمد الفرضيات والمقاربات التالية:

- إن الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المحدد بالعلاقة (3−7) في طريقة تخصيص الموارد الأولى المعتمدة على القناة، فعال من أجل $M \geq 2$، لذلك نفرض أن الحد الأدنى لعدد القنوات الجزئية هو:

$$M_{min} = 2 \qquad (13-4)$$

- نفرض أن الحد الأدنى المطلوب لمعدل نقل المعطيات لكل مستخدم R_{min} هو معدل نقل المعطيات لكل مستخدم في نظام OMA والمعطى بالعلاقة (3−18) من أجل قيم محددة لعدد القنوات الجزئية M_o واستطاعة الإرسال P_{max}، أي أن $R_{min} = {R_{m_o}}^{OMA}$. يتغير معدل نقل المعطيات في نظام OMA بتغير عرض المجال للقناة الجزئية أي بتغير عدد القنوات الجزئية M_o، وبالتالي يعتمد الحد الأدنى R_{min} المطلوب على قيمة M_o من أجل قيمة مفروضة لاستطاعة الإرسال العظمى المتاحة P_{max} عند قيمة محددة لعدد القنوات الجزئية M في النظام الهجين. وبالتالي تكتب النسبة R/R_{min} كالآتي: $R/R_{min} = BR_g$، حيث BR_g ربح السعة الممكن تحقيقها لكل مستخدم في النظام الهجين المعطى بالعلاقة (3−21). بالاعتماد على ذلك، يصبح القيد $R \geq R_{min}$ في المسألة(4−12) كالآتي:

$$BR_g = R/R_{min} \geq 1 \qquad (14-4)$$

من أجل تحقيق القيد المعطى بالعلاقة (4−14) وبالاعتماد على العلاقتين (3−23) و(3−24) في الفقرة (3−2)، يجب أن يتحقق مايلي:

$$BR_g(\mathrm{M}, \Gamma) \geq 1 \; if \; M \leq M_{max} \; and \; \Gamma_{M_min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{max} \qquad (15-4)$$

حيث M_{max} عدد القنوات الجزئية المحدد في العلاقة (3−22)، Γ_{max} نسبة الإشارة للتداخل والضجيج المحدد في العلاقة (3−9)، و Γ_{M_min} الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافق

لكل قيمة لعدد القنوات الجزئية M حيث يعطى كمايلي:

$$\Gamma_{M_min} = \min\{\Gamma_{max}, SINR_{min}\} \qquad (16-4)$$

- يكون عدد الطبقات أعظمياً عندما تكون نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ أصغرية من أجل قيمة معطاة لعدد القنوات الجزئية M و والاستطاعة P_{max}، كما يبين الشكل(3-6) في الفقرة(3-1). أي يعطى عدد الطبقات الأعظمي L_{M_max} الموافق لعدد القنوات الجزئية M من أجل تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة كالآتي:

$$L_{M_max} = \max\{L | P_{\max_1}(M, \Gamma = \Gamma_{M_min}) \le P_{max}, 1 \le \mathrm{L} \in Z\} \qquad (17-4)$$

حيث $P_{\max_1}$ الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المعطى بالعلاقة (3-7)، Γ_{M_min} الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافق لكل لعدد القنوات الجزئية M المعطى بالعلاقة (4-16). أما من أجل تخصيص الموارد بالطريقة الثانية العشوائية، يكون عدد الطبقات الأعظمي L_{r_max}:

$$L_{r_max} = \max\{L | P_{\max_2}(\Gamma = \Gamma_{M_min}) \le P_{max}, 1 \le \mathrm{L} \in Z\} \qquad (18-4)$$

$P_{\max_2}$ الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المعطى بالعلاقة (3-8).

- تعطى إنتاجية التوصيل T_M الموافقة لعدد المستخدمين حتى N من العلاقة(4-4)، وذلك من أجل عدد القنوات الجزئية M، حيث $N \le ML_{M_max}$ وعدد الطبقات $L = L_{M_max}$. وتكون هذه الإنتاجية أعظمية عند عدد مستخدمين $N_{T_{M_max}} \le ML_{M_max}$ كما تبين العلاقة(4-10)، أي أن القيمة العظمى للإنتاجية T_{M_max} عند هذه القيم تكتب كمايلي:

$$T_{M_max} = \max_{1 \le N \le ML_{M_max}} T_M(M, L = L_{M_max}) \qquad (19-4)$$

حيث L_{M_max} عدد الطبقات الأعظمي المعطى بالعلاقة(4-17). $T_M(M, L)$ إنتاجية التوصيل المعطاة بالعلاقة (4-4) من أجل عدد المستخدمين حتى $N \le ML_{M_max}$.

بالاعتماد على الفرضيات والمقاربات السابقة يمكن إعادة صياغة المسألة العطاة في (4−12) كالآتي:

$$\max_{M} T_{M_max} = \max_{M} \max_{1\le N\le ML} T_M(M,L)$$

$$S.t: \begin{cases} M_{min} \le M \in Z \le M_{max} \\ 1 \le L = L_{M_max} \in Z \end{cases} \qquad (20-4)$$

حيث M_{min} الحد الأدنى لعدد القنوات الجزئية المعطى بالعلاقة(4−13)، M_{max} الحد الأعلى لعدد القنوات الجزئية المعطى بالعلاقة(3−22)، L_{M_max} عدد الطبقات الأعظمي الموافق لعدد القنوات الجزئية M من أجل تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة والمعطى بالعلاقة (4−17)، $T_M(M,L)$ إنتاجية التوصيل المعطاة بالعلاقة (4−4) من أجل عدد المستخدمين حتى $N \le ML_{M_max}$، وT_{M_max} القيمة العظمى للإنتاجية من أجل عدد القنوات الجزئية M المعطاة بالعلاقة(4−19).

يبين الشكل (4−7) المخطط التدفقي لخوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات والقنوات الجزئية المعتمدة لإيجاد القيم المثلى لعدد الطبقاتL_{opt} وعدد القنوات الترددية الجزئيةM_{opt} للمسألة (4−20)، كذلك تعطي هذه الخوارزمية نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ_{opt} وأعلى إنتاجية ممكن تحقيقها عند هذه القيم T_{max} وفق الخطوات التالية:

- **المدخلات:** عدد القنوات الترددية الجزئيةM_o، واستطاعة الإرسال العظمى المتاحة P_{max}، معامل فقد المسار β ، حد أدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} والحد الأدنى لعدد القنوات الجزئية M_{min}.
- **المخرجات:** عدد الطبقاتL_{opt}، عدد القنوات الترددية الجزئيةM_{opt}، نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ_{opt} وأعلى إنتاجية ممكن تحقيقها عند هذه القيم T_{max}.

1. حساب القيم الصغرى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{M_min} الموافقة لقيم $M \in [M_{min}, M_{max}]$ وذلك باستخدام العلاقة (4−16).

2. حساب قيم الحد الأعلى لعدد الطبقات L_{M_max} الموافقة لقيم عدد القنوات الجزئية $M \in [M_{min}, M_{max}]$ وقيم نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{M_min} المقابلة لكل M ، وذلك باستخدام العلاقة (4−17).

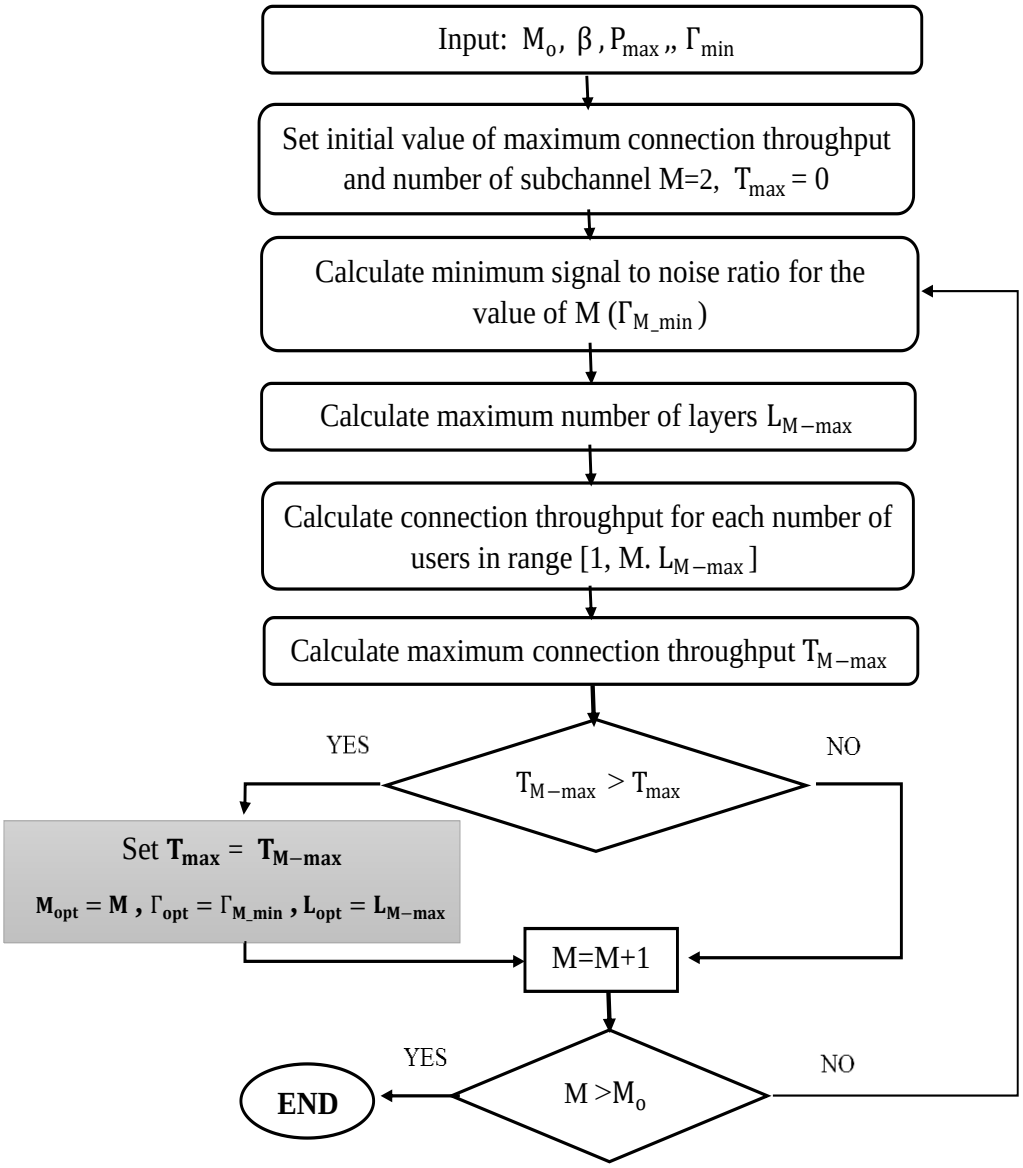
3. حساب إنتاجية التوصيل T_M الموافقة لقيم عدد القنوات الجزئية $M \in [M_{min}, M_{max}]$ وقيم عدد الطبقات L_{M_max} الموافقة لكل M، وذلك باستخدام العلاقة (4−4)، حيث يتغير عدد المستخدمين الموافق لكل ثنائية (M, L_{M_max}) حتى $N = ML_{M_max}$ تبعاً للعلاقة (4−10).

4. حساب القيم العظمى للإنتاجية T_{M_max} الموافقة لقيم عدد القنوات الجزئية $M \in [M_{min}, M_{max}]$ وقيم عدد الطبقات L_{M_max} الموافقة لكل M، باستخدام العلاقة (4−19).

5. حساب الإنتاجية الأعظمية T_{max} كالآتي: $T_{max} = \max T_{M_max}$.

6. اختيار القيمة المثلى لعدد القنوات الجزئية M_{opt} حيث تكون القيمة العظمى للإنتاجية عندها مساوية للإنتاجية الأعظمية T_{max} أي $M_{opt} = \{M | T_{M_max} = T_{max}\}$.

7. اختيار القيمة المثلى لعدد الطبقاتL_{opt} والقيمة المثلى لنسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج Γ_{opt} الموافقة لعدد القنوات الجزئية.



الشكل (4-7) المخطط التدفقي لخوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات والقنوات الجزئية

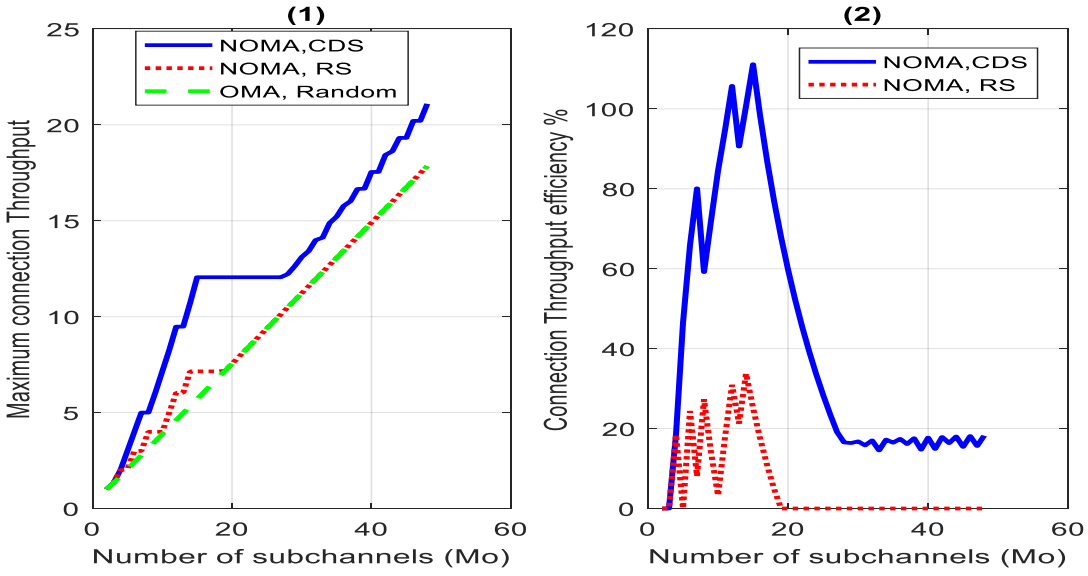
4.4. تقييم النتائج

تم إجراء المحاكاة في بيئة ماتلاب من أجل قيم المعاملات المبينة في الجدول(4-1)، حيث تنفذ الخوارزمية المبينة في الشكل(4-7) عند قيم مختلفة لعدد القنوات الجزئية M_o، وذلك للنظام الهجين المعتمد على طريقتي الاختيار (بالاعتماد على القناة و العشوائية) المذكورتين سابقاً، ومقارنتهما مع أداء نظام OMA يعتمد على الاختيار العشوائي.

الجدول (4−1): قيم معاملات النظام من أجل المحاكاة

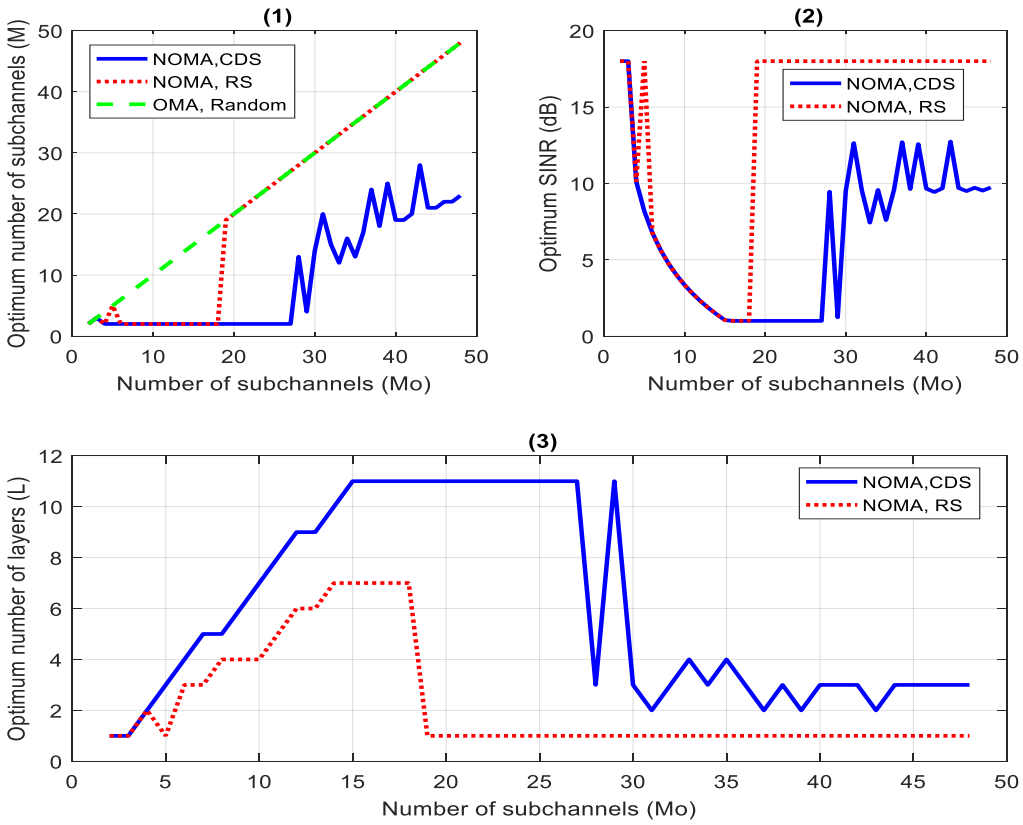
$D_{req}\ (ms)$	$T\ \ (ms)$	β	$P_{max}\ (dBm)$	$B_T\ (Hz)$	**الرمز**
1	0.2	3.8	18	1	**القيمة**

يتشابه أداء الأنظمة من حيث القيمة العظمى لانتاجية التوصيل من أجل عدد القنوات $M_o = 2$و3، كما هو مبين في الشكل(4−8)، حيث تم اعتبار قيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $\Gamma_{min} = 1dB$، أي عندما تكون معدلات نقل المعطيات المطلوبة لكل مستخدم عالية. لكن من أجل معدلات نقل معطيات منخفضة لكل مستخدم (أي قيم كبيرة لعدد القنوات الجزئية $M_o \geq 4$)، يمكن تحقيق زيادة في فعالية انتاجية التوصيل باستخدام النظام الهجين تصل إلى 111.2% عند $M_o = 15$ وذلك بالاعتماد على طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على معلومات القناة مقارنةً مع OMA، وفعالية تصل إلى 33.79% عند $M_o = 14$ باستخدام طريقة تخصيص الموارد العشوائية).



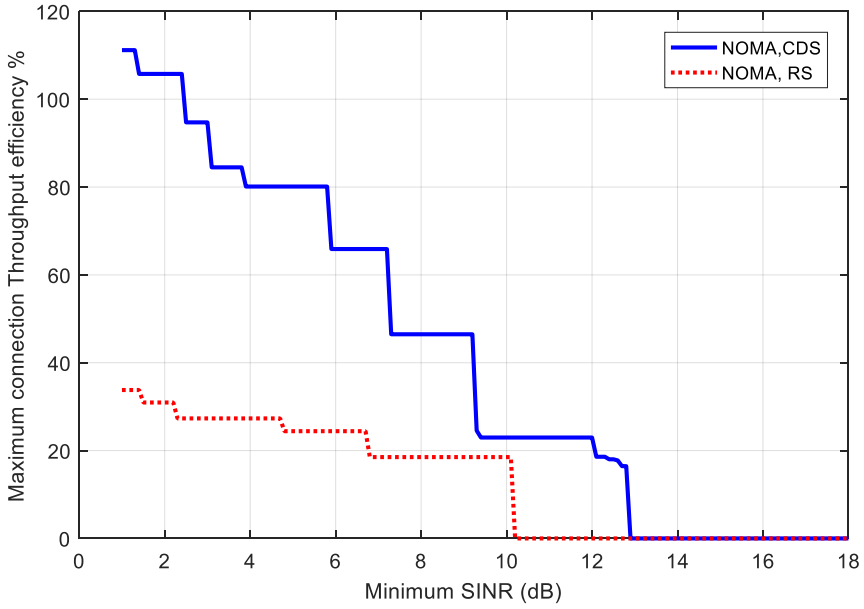
الشكل (4−8) 1) القيمة العظمى لانتاجية التوصيل الممكن تحقيقها في النظام الهجين تبعاً لعدد القنوات الجزئية M_o في نظام OMA 2) فعالية انتاجية التوصيل باستخدام النظام الهجين مقارنةً مع نظام OMA حيث $\Gamma_{min} = 1dB$.

نلاحظ من الشكل(4−8) انعدام فعالية انتاجية التوصيل باستخدام النظام الهجين المعتمد على طريقة تخصيص الموارد العشوائية من أجل قيم $M_o \geq 19$، بينما تستمر الطريقة المعتمدة على معلومات القناة بتحقيق فعالية أكبر من 14% ، وذلك لأن قيم عدد الطبقات، عدد القنوات الجزئية، ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج التي تحقق القيود المفروضة في المسألة(4−20) وصلت إلى الحدود المتاحة كما هو مبين في الشكل (4−9)، حيث الحل الأمثلي للمسألة (4−20) من أجل هذه الطريقة عند $M_o \geq 19$ هو: $L_{opt} = 1$، $M_{opt} = M_o$، $\Gamma_{opt} = \Gamma_{max}$، بينما يختلف الحل في الطريقة المعتمدة على معلومات القناة من أجل $M_o \geq 19$ التي تتيح عدد طبقات أكثر كما رأينا في الفقرة (3−1)، فمثلاً من أجل $M_o = 48$ يكون الحل في هذه الطريقة:$L_{opt} = 3$ ، $M_{opt} = 23$، $\Gamma_{opt} = 9.733dB$.



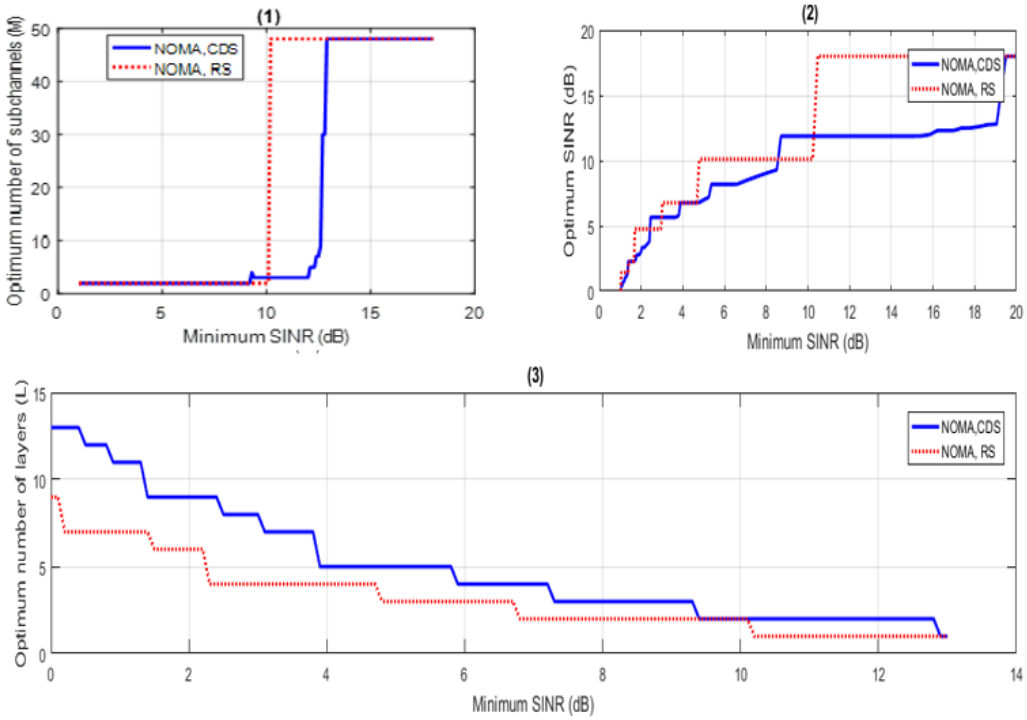
الشكل (4−9) الحل الأمثلي للمسألة (4−20) تبعاً لعدد القنوات الجزئية Mo 1) عدد القنوات الجزئية M_{opt}. 2) نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{opt}. 3) عدد الطبقات L_{opt} . حيث $\Gamma_{min} = 1dB$.

يبين الشكل (4−10) فعالية انتاجية التوصيل العظمى الممكن تحقيقها باستخدام النظام الهجين تبعاً لقيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}، حيث نلاحظ تناقص هذه الفعالية مع زيادة قيمة Γ_{min} فمثلاً من أجل $\Gamma_{min} = 4dB$ تكون الفعالية 80.12% أي انخفاض بمقدار 1.39 مرة عن حالة $\Gamma_{min} = 1dB$ وذلك من أجل طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على معلومات القناة. أما في طريقة تخصيص الموارد العشوائية تكون الفعالية 27.32% من أجل $\Gamma_{min} = 4dB$ أي انفاض بمقدار 0.81 مرة عن حالة $\Gamma_{min} = 1dB$.



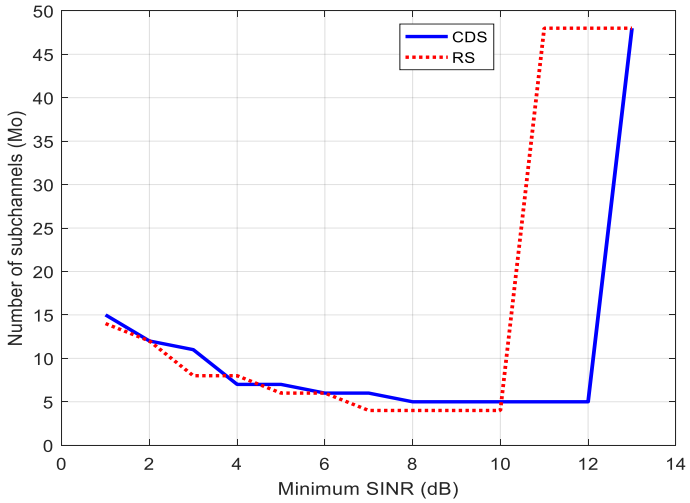
الشكل (4−10) فعالية انتاجية التوصيل العظمى الممكن تحقيقها باستخدام النظام الهجين تبعاً لقيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}

يتناقص عدد الطبقات اللازم لتحقيق فعالية عظمى بزيادة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} كما هو مبين في الشكل(4−11−3)، حيث يحتاج إلى 5طبقات من أجل طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على معلومات القناة عند $\Gamma_{min} = 4dB$. وتكون $M_{opt} = 2$ ، $\Gamma_{opt} = 6.659dB$. أي أنه يمكن تقليل عدد الطبقات من خلال زيادة قيمة Γ_{min} من أجل تقليل خطأ الانتشار في نظام PD_NOMA والذي يزداد بزيادة عدد الطبقات.



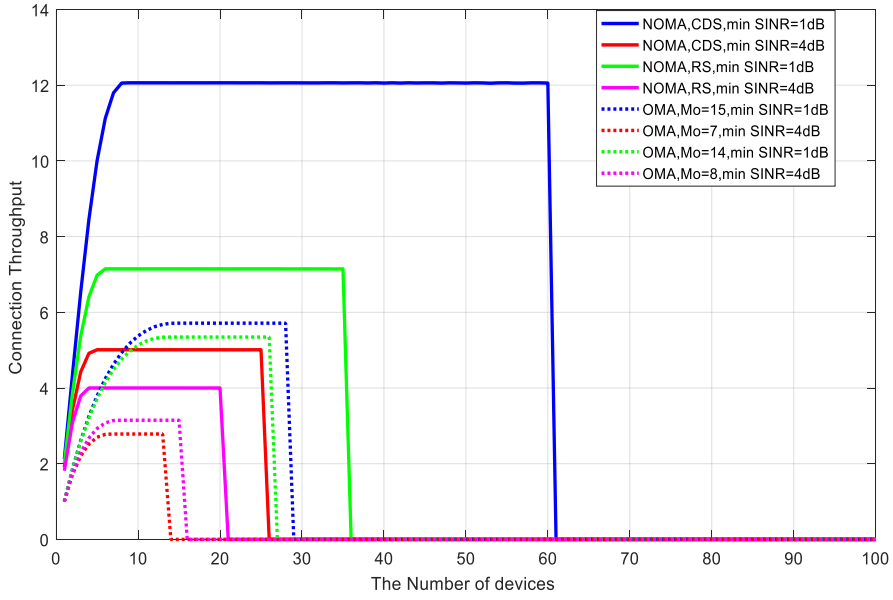
الشكل (4−11) الحل الأمثلي للمسألة (4−20) تبعاً لقيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} عند أعلى فعالية إنتاجية ممكن تحقيقها من أجل $M_o \in [2,48]$. 1) عدد القنوات الجزئية M_{opt}. 2) نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{opt}. 3) عدد الطبقات L_{opt}

يبين الشكل (4−12) عدد القنوات الجزئية $M_o \in [2,48]$ التي تكون عندها فعالية الإنتاجية أعظمية تبعاً لقيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} .



الشكل (4−12) عدد القنوات الجزئية M_o التي تكون عندها فعالية الإنتاجية أعظمية تبعاً لقيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}

تبين النتائج السابقة أنه يمكن تحسين إنتاجية التوصيل بنسب ربح مختلفة تبعاً لمعدل نقل المعطيات المطلوب وتحديد الحد الأدنى لنسبة استطاعة الإشارة للضجيج والتداخل $\Gamma_{\min}$، والذي من الممكن مقاربته من دراسة معدل احتمال الخطأ[37][25]. كما أنه يمكن تطبيق خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ المبينة في الشكل(4-5) عند قيم M, L الأمثلية من أجل تحسين الإنتاجية في حالات الحمل الزائد للنظام. حيث يبين الشكل (4-13) تطبيق هذه الخوارزمية من أجل بعض القيم الأمثلية الموافقة لقيمتي $M_o = 15,7$ وتكون عندها فعالية الإنتاجية أعظمية من أجل $\Gamma_{min} = 1dB, 4dB$ و $L_{opt} = 11,5$ و $M_{opt} = 2,2$ على الترتيب في طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة. وقيمتي $M_o = 14,8$ من أجل $\Gamma_{min} = 1dB, 4dB$ و $L_{opt} = 7,4$ و $M_{opt} = 2,2$ على الترتيب في طريقة تخصيص الموارد العشوائية.



الشكل (4-13) النتائج العددية لإنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين بعد تطبيق خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات ومعامل التحكم بالنفاذ عند قيم المعاملات الأمثلية من أجل $M_o = 15,7$

5.4. الخلاصة

رأينا في هذا الفصل أن تحسين إنتاجية التوصيل للنظام الهجين مرتبط بزيادة عدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية، كما أن أداء إنتاجية التوصيل للنظام الهجين يتفوق على أداء إنتاجية توصيل نظام OMA من خلال حل مسألة أعظم إنتاجية توصيل يمكن تحقيقها في النظام ضمن قيود الاستطاعة والسعة لكل مستخدم، وذلك باستخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات وعدد القنوات الجزئية.

الفصل الخامس

معدل خطأ البت

Bit Errore Rate (BER)

1.5. مقدمة

في هذا الفصل سندرس أثر عدد الطبقات على معدل الخطأ bit error rat، ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المرتبطة بعدد الطبقات من خلال قيود استطاعة الإرسال، حيث سنرى أداء معدل الخطأ من أجل قيم مختلفة لهذه المعاملات بالإضافة إلى الأداء عند القيم الأمثلية الناتجة من حل المسألة (4-20) المطروحة في الفصل الرابع. كما يتضمن الفصل مقترح لتحسين أداء معدل الخطأ، حيث سنرى انخفاض أداء معدل الخطأ عندما تكون إنتاجية التوصيل المرغوبة عالية.

2.5. فرضيات الدراسة

من أجل التبسيط نفرض أن القنوات الجزئية الترددية مفصولة كفاية بحيث يتم إهمال احتمال الخطأ الناتج عن تداخلها، بالإضافة إلى اعتبار قناة ضجيج أبيض غاوصي جمعي AWGN حيث أن معلومات حالة القناة معلومة بالكامل. كذلك نفرض أن L مستخدم يتشاركون كل قناة جزئية بالاعتماد على تقنية PD-NOMA ضمن نفس الشريحة الزمنية(t) بدون حدوث تصادم، أي يتم استخدام كل طبقة ℓ ذات المستوى المحدد في العلاقة(3-2)، من قبل مستخدم واحد رقم ℓ باستطاعة إرسال P_ℓ بحيث تكون $P_\ell = v_\ell$، كما هو مبين في الشكل(3-2). ضمن هذه الفرضيات سندرس معدل احتمال الخطأ من أجل L مستخدم على قناة جزئية واحدة، حيث تصبح الإشارة المستقبلة على هذه القناة والمعطاة بالعلاقة (3-5) كالآتي:

$$y = \sum_{\ell=1}^{L} \sqrt{P_\ell} x_\ell + w, \;\; k = 1,2, \dots, N_B, \qquad (1-5)$$

حيث y الإشارة المستقبلة على القناة الجزئية في الموقع $k = 1,2, \dots, N_B$ حيث فرضنا أن $y(k) = y$ لتبسيط الكتابة، L عدد الطبقات (ويساوي عدد المستخدمين لكل قناة جزئية)، P_ℓ استطاعة الإرسال

للمستخدم ℓ ويساوي v_ℓ المعطى بالعلاقة (2−3)، $x_\ell = x_\ell(k)$ الرمز المعدل المرسل على القناة الجزئية من المستخدم رقم ℓ، حيث $\mathbb{E}[|x_\ell|^2] = 1, \forall \ell$ وذلك من أجل التعديل BPSK، w عينة ضجيج عقدية من توزع غاوصي Gaussian بمتوسط صفري وتشتت σ^2 . في المستقبل يتم كشف إشارات المستخدمين المتراكبة في مجال الاستطاعة على مستوى كل رمز ،وذلك من خلال تقدير الرمز بالاعتماد على خوارزمية MMSE ومن ثم فصل إشارة كل مستخدم باستخدام حذف التداخل التتابعي SIC تبعاً لأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج، أي تطبيق مستقبل MMSE-SIC المبين في الفصل الثاني على النموذج المبين في العلاقة (5−1) والذي يُكتب بشكل مشابه للنموذج المعطى بالصيغة (11−2) كما يلي:

$$y = px + w \qquad (2-5)$$

حيث y الإشارة المستقبلة، $p = \left[\sqrt{P_1} \dots \sqrt{P_L}\right]$ معاملات الاستطاعة (حيث y تقابل r و p تقابل h في النموذج (11−2))، w عينات ضجيج أبيض غاوصي بمتوسط صفري وتشتت σ^2، و $\boldsymbol{x} = [x_1 \dots x_L]^T$ شعاع الرموز المرسلة والتي يتم كشفها وتقديرها وفق الخطوات التالية:

- **الخطوة الأولى:** حساب شعاع التحويل بالاعتماد على العلاقة (10−2) كالآتي:

$$w_{mmse} = (p^H p + \sigma^2 I_L)^{-1} p^H \qquad (3-5)$$

- **الخطوة الثانية:** حساب نسبة الإشارة للتداخل والضجيج SINR لكل مستخدم بالاعتماد على العلاقة (16−2)، ومن ثم اختيار المستخدم الأعلى نسبة SINR من أجل تقدير رمزه المرسل $\hat{x}$ باستخدام MMSE كما يلي:

$$\hat{x} = w_{x,MMSE}\, y \qquad (4-5)$$

حيث y الإشارة المستقبلة المبينة في العلاقة (5−2)، و $w_{x,MMSE}$ عنصر الشعاع $\boldsymbol{w}_{mmse}$ الموافق لرقم المستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج SINR، حيث $\boldsymbol{w}_{mmse}$ شعاع التحويل المعطى بالعلاقة (5−3).

- **الخطوة الثالثة:** تقدير معطيات المستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج SINR من خلال فك تعديل (BPSK) الرمز المقدر $\hat{x}$ الموافق له المبين في العلاقة (5−4) ومن ثم تعديل المعطيات المقدرة من أجل بناء إشارة هذا المستخدم وحذف التداخل الناتج عن هذا المستخدم كما يلي:

$$\hat{y} = y - \tilde{x}\sqrt{P_x} \qquad (5-5)$$

حيث $\hat{y}$ الإشارة الناتجة عن حذف تداخل المستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج، y الإشارة المستقبلة المبينة في العلاقة (5−2)، $\tilde{x}$ الرمز المعدل للمستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج والناتج عن تعديل معطياته المقدرة باستخدام التعديل BPSK، و P_x استطاعة الإرسال المخصصة للمستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج.

- **الخطوة الرابعة:** إعادة تكرار الخطوات الثلاث السابقة على الإشارة $\hat{y}$ التي يمكن نمذجتها بالشكل التالي:

$$\hat{y} = \acute{p}\acute{x} + \acute{w} \qquad (6-5)$$

حيث $\boldsymbol{\acute{p}}$ معاملات الاستطاعة الموافقة للمستخدمين والذي ينتج من إزالة معامل الاستطاعة المخصص للمستخدم الأعلى نسبة إشارة للتداخل والضجيج (الذي تم كشف معطياته) من $\boldsymbol{p}$، $\boldsymbol{\acute{x}}$ شعاع رموز المستخدمين الناتج عن إزالة رمز المستخدم الذي تم كشفه في العلاقة (5−4)، و $\acute{w}$ عينات ضجيج أبيض غاوصي بمتوسط صفري وتشتت σ^2.

- **الخطوة الخامسة:** تكرار الخطوات السابقة حتى كشف وتقدير معطيات كل المستخدمين.

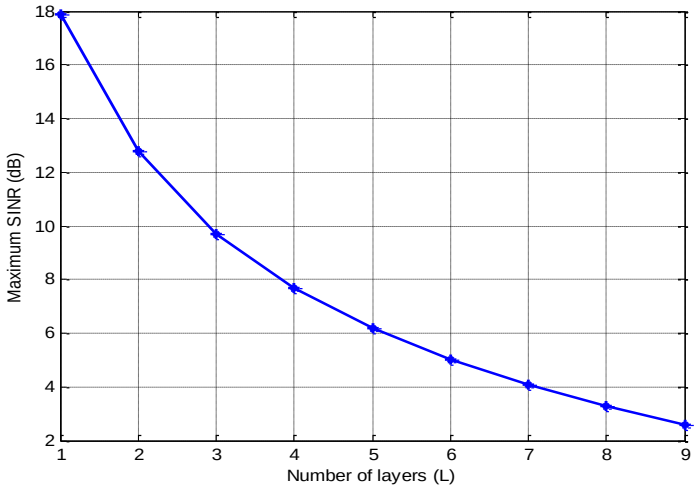
من أجل تحليل أثر الطبقات على معدل احتمال الخطأ يجب تحديد مستويات الاستطاعة المستقبلة وفقاً للعلاقة (3–2) والتي تتطلب تحديد نسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ، حيث يمكن تحديد القيمة الأعظمية $\Gamma_{L_\max}$ لهذه القيمة من أجل عدد طبقات محدد تبعاً لطريقة تخصيص الموارد المبينة في الفقرة (3–1) عند قيم محددة للحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال وعدد القنوات الجزئية كالآتي:

$$\Gamma_{L_\max} = \{\Gamma \mid P_{ave} \le P_{\max}, \Gamma > 0dB\} \qquad (7-5)$$

حيث $P_{\max}$ الحد الأعلى المتاح لمتوسط استطاعة الإرسال، $P_{ave} = P_{ave_1} or P_{ave_2}$ الحد الأعلى لمتوسط استطاعة الإرسال المعطى بالعلاقتين (3–7) و(3–8) بالترتيب تبعاً لطريقة تخصيص الموارد.

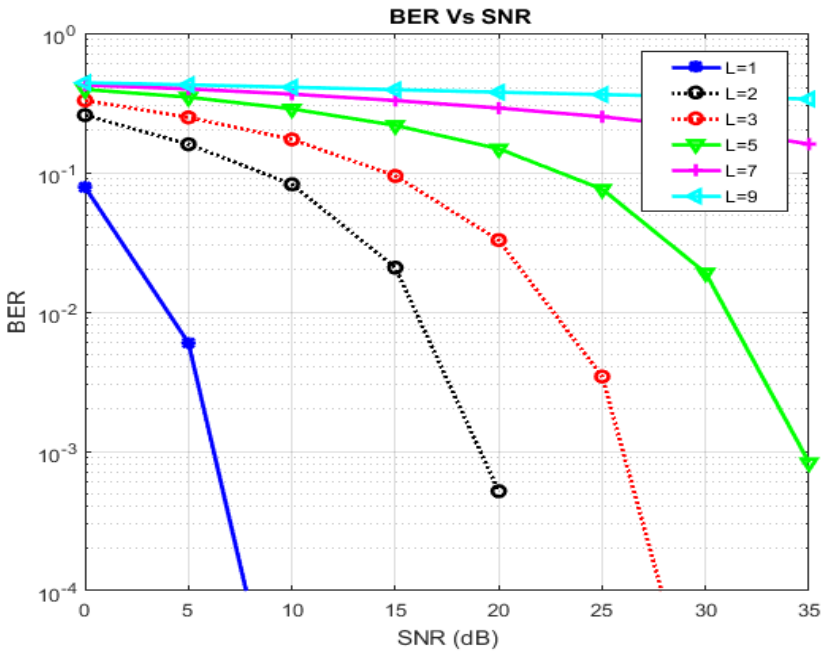
3.5. تقييم أداء معدل الخطأ

يتم تحليل أثر عدد الطبقات وتقييم الأداء بالاعتماد على المحاكاة للنظام في بيئة MATLAB. من أجل الحد الأعلى المتاح لمتوسط استطاعة الإرسال $P_{max} = 18dBm$ وعدد القنوات الجزئية $M = 48$ ، حيث يتم حساب القيمة الأعظمية $\Gamma_{L_\max}$ الموافقة لكل عدد طبقات L من العلاقة (5–7) والذي يتناقص بازدياد عدد الطبقات كما هو مبين في الشكل(5–1).



الشكل (5–1) الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج تبعاً لعدد طبقات L من أجل $\boldsymbol{P_{max} = 18dBm}$,M=48

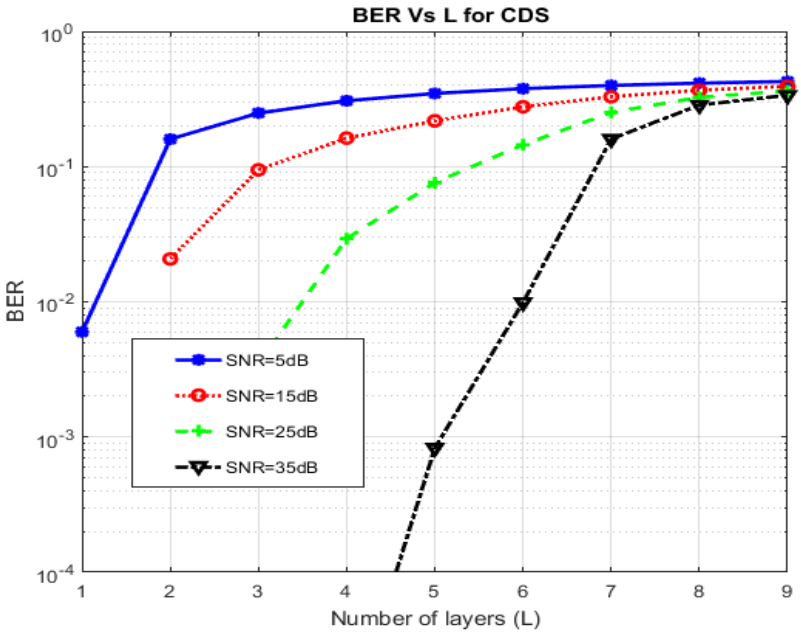
يبين الشكل (5–2) معدل خطأ البت BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج من أجل عدد طبقات L مختلفة وقيم $\Gamma_{L_\max}$ الموافقة لها والمبينة في الشكل (5–1)، حيث يتناقص هذا المعدل بزيادة نسبة الإشارة للضجيج بشكل عام لكن يصبح معدل الخطأ أقل من 10^{-1} من أجل $L = 9$ حتى عند قيم نسبة إشارة للضجيج عالية $snr = 35dB$.



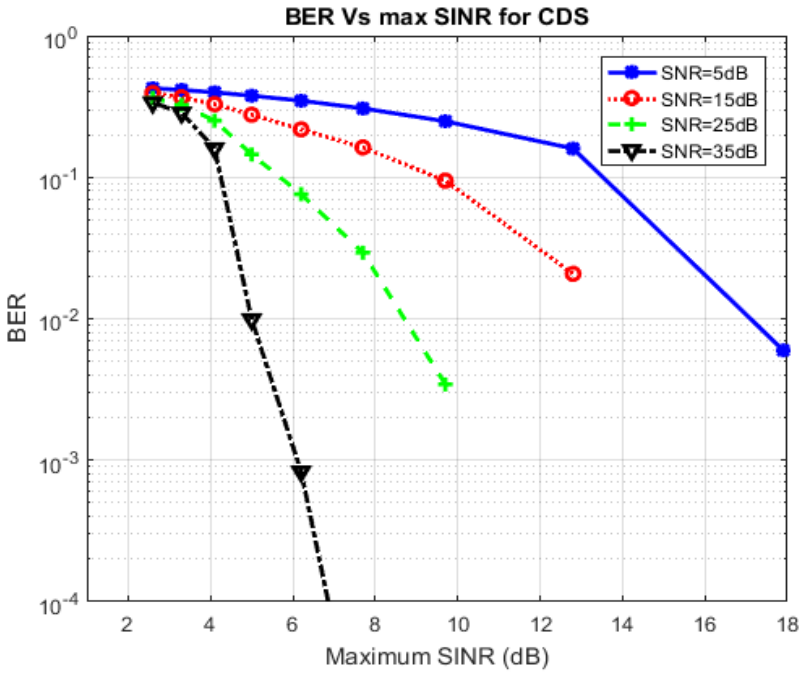
الشكل (5–2) معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج من أجل قيم مختلفة لعدد طبقات L .

يزداد معدل الخطأ بازدياد عدد الطبقات في طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة كما هو مبين في الشكل (5–3)، حيث يؤدي تزايد عدد الطبقات إلى انخفاض قيمة الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج المعطى بالعلاقة (5–7) كماهو مبين في الشكل (5–1). أي أن معدل الخطأ يتناقص بزيادة الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج كما هو مبين في الشكل (5–4). فمثلاً عند $snr = 35dB$ من أجل $L = 8$ تكون نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافقة $\Gamma_{L_\max} = 3.296dB$ ويكون معدل الخطأ من رتبة $\approx 10^{-1}$ والذي يمكن تحسينه من خلال تخفيض عدد الطبقات الذي يؤدي إلى زيادة الحد الأعلى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج تبعاً للعلاقة (5–7)،

حيث يُصبح الخطأ من رتبة 10^{-2} بتخفيض عدد الطبقات إلى $L = 6$ وذلك بسبب تزايد نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافقة لهذه القيمة لتصبح $\Gamma_{L_\max} = 4.996dB$.

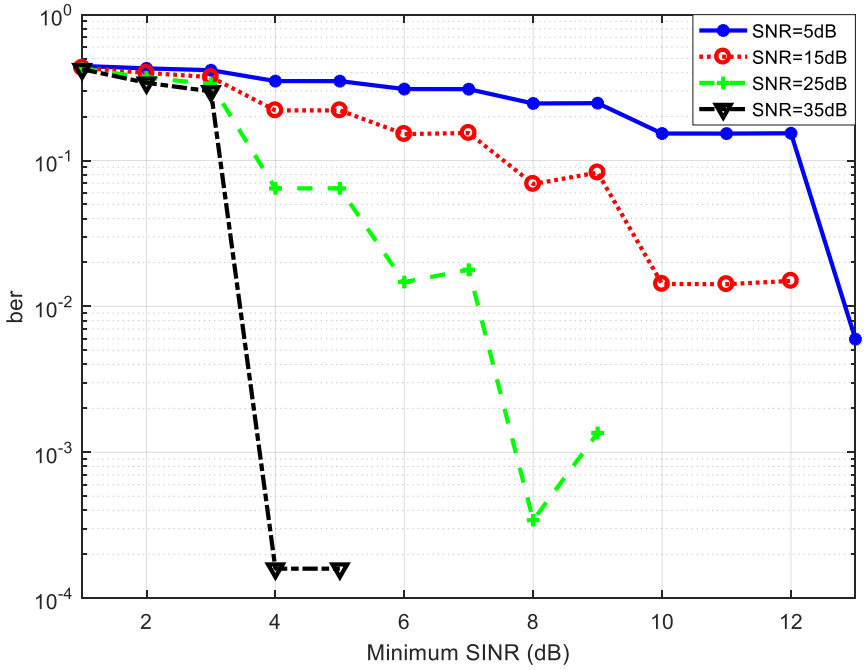


الشكل (5-3) معدل الخطأ BER تبعاً لعدد طبقات L من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة للضجيج



الشكل (5-4) الشكل (5-4): معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأعظمية من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة للضجيج

وجدنا من الشكل (4–11) أن عدد الطبقات الأمثلي L_{opt} ينخفض بازدياد قيمة الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}، بينما تزداد نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأمثلية Γ_{opt}، أي أن أداء خطأ البت BER يتحسن بازدياد قيمة الحد الأدنى Γ_{min} كما هو مبين في الشكل (5–5). حيث معدل الخطأ من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المبينة في الشكل (4–11–3)، والناتجة من حل المسألة (4–20) من أجل قيم مختلفة للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}.



الشكل (5–5) معدل الخطأ BER تبعاً للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_min من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات.

تبين النتائج السابقة أن تحسين معدل خطأ البت BER مرتبط بتقليل عدد الطبقات الذي يؤدي بدوره إلى زيادة نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافقة لعدد الطبقات في طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة. أي أنه في المسألة (4–20) يمكن التحكم بعدد الطبقات من خلال زيادة الحد الأدنى لنسبة

الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} كما هو مبين في الشكل(4−11−3)، لكن تؤدي زيادة قيمة Γ_{min} إلى انخفاض إنتاجية التوصيل كما هو مبين في الشكل(4−10).

4−5 تحسين أداء معدل الخطأ

رأينا في الفصل الرابع أن النظام الهجين المقترح يحقق إنتاجية توصيل أعلى من نظام OMA من خلال حل المسألة (4−20)، ما يجعل هذا النظام مناسب لسيناريوهات mMTC التي تتطلب إنتاجية توصيل كبيرة. لكن يتطلب هذا التفوق بالأداء تخفيض قيمة نسبة الإشارة للتداخل والضجيج (أي تخفيض الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}) من أجل زيادة عدد الطبقات، والذي يؤدي بدوره إلى زيادة معدل احتمال الخطأ كما بينت نتائج المحاكاة في الفقرة (5−3). لذلك لابد من إجراء مقايضة بين إنتاجية التوصيل وجودة الوصلة من خلال التحكم بهذه المعاملات. في هذه الفقرة نقترح منهجية لتحسين أداء معدل احتمال الخطأ للنظام الهجين مع الحفاظ على إنتاجية التوصيل المحققة بحل المسألة (4−20) عند القيم الصغيرة للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min}، وذلك من خلال تغيير نقطتي كوكبة التعديل BPSK لكل مستخدم، حيث فرضنا سابقاً نقطتي كوكبة تعديل حقيقية $\{-1,+1\}$ ، أما الآن نفرض أن كل مستخدم يستخدم نقطتي كوكبة تعديل عقدية مختلفة عن باقي المستخدمين أي أن نقطتي كوكبة التعديل للمستخدم ℓ تعطى كالآتي: $\{a_\ell e^{j\theta_\ell}, -a_\ell e^{j\theta_\ell}\}$ حيث $a_\ell \in \mathbb{R}, \theta_\ell \in [0,2\pi]$. لكن من أجل التبسيط الحسابي والمحافظة على $\mathbb{E}[|x_\ell|^2] = 1, \forall \ell$ نفرض أن $a_\ell e^{j\theta_\ell} = 1 \; or \; i$ حيث $i = \sqrt{-1}$، أي أن نقطتي كوكبة التعديل لكل مستخدم ℓ هما إما $\{-1,+1\}$ أو $\{-i,+i\}$.

من أجل إجراء المحاكاة ودراسة فعالية هذه الطريقة نعتبر أن مستخدمي الطبقات ذات الرقم ℓ الفردي يستخدمون نقطتي كوكبة التعديل $\{-1,+1\}$ ، ومستخدمي الطبقات ذات الرقم ℓ الزوجية نقطتي

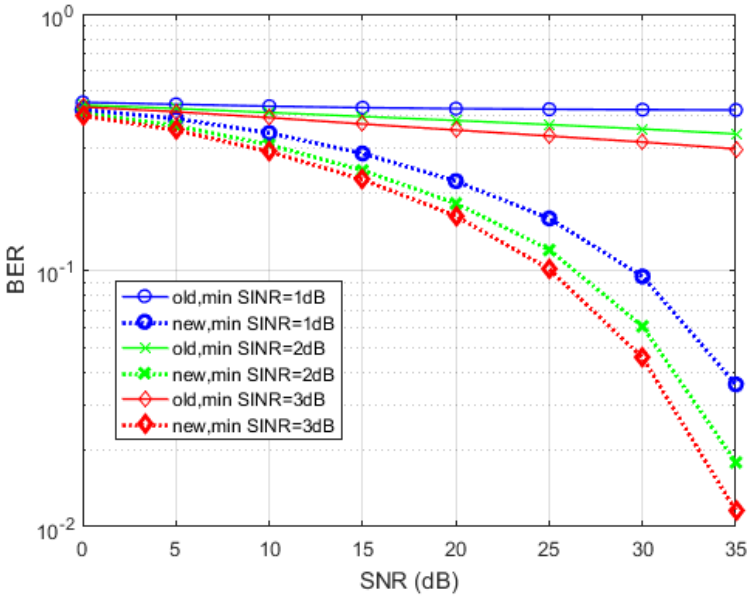
كوكبة التعديل $\{-i,+i\}$، أما في المستقبل فيتم استخدام خوارزمية MMSE-SIC وفق الخطوات السابقة نفسها مع تعديل النموذج المبين في العلاقة (2-5) ليصبح كالآتي:

$$y = \boldsymbol{p}_{new}\boldsymbol{x} + w \qquad (8\text{-}5)$$

حيث $\boldsymbol{p}_{new} = \boldsymbol{\alpha}.\boldsymbol{p}$ ، $\boldsymbol{p} = [\sqrt{P_1}\,\sqrt{P_2}\ldots\sqrt{P_L}]$ شعاع معاملات الاستطاعة في النموذج القديم و$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \ \ldots \alpha_L]$ حيث تُعطى عناصرها كما يلي:

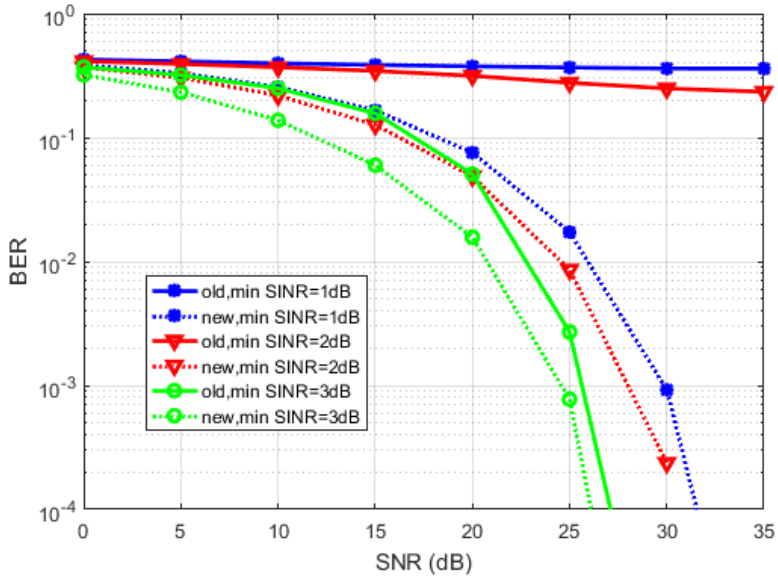
$$\alpha_l = \begin{cases} 1 & l\ odd \\ i & l\ even \end{cases}, l = 1,\ldots,L \qquad (9\text{-}5)$$

تبين نتائج المحاكاة لهذه الطريقة المبينة في الشكل(6-5) من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج عند قيم $\Gamma_{min} = 1,2,3dB$ باستخدام طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة، أنه يمكن تحسين معدل احتمال الخطأ بنسب متفاوتة فمثلاً من أجل $snr = 35dB$ وقيم $\Gamma_{min} = 1,2,3dB$ يصبح الخطأ من رتبة 10^{-2} بينما كان من رتبة 10^{-1} كما هو مبين في الشكل (5-6). حتى عند $snr = 30dB$ يمكن القول إن التحسين من رتبة 10^{-1} .



الشكل (5-6) التحسين على معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة من أجل Γ_min=1,2,3dB.

يبين الشكل (5−7) نتائج المحاكاة لمعدل الخطأ BER بتطبيق طريقة التحسين المقترحة من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المبينة في الشكل (4−11−3) و(4−11−2) عند قيم $\Gamma_{min} = 1,2,3dB$ باستخدام طريقة تخصيص الموارد العشوائية، حيث يمكن تحسين معدل احتمال الخطأ أيضاً بنسب متفاوتة فمثلاً من أجل $snr = 35dB$ عند $\Gamma_{min} = 1dB$ يصبح الخطأ أقل من 10^{-4} بينما كان من رتبة 10^{-1}، أي تحسين من رتبة 10^{-3}. أما من أجل $snr = 30dB$ يكون التحسين من رتبة 10^{-2} .

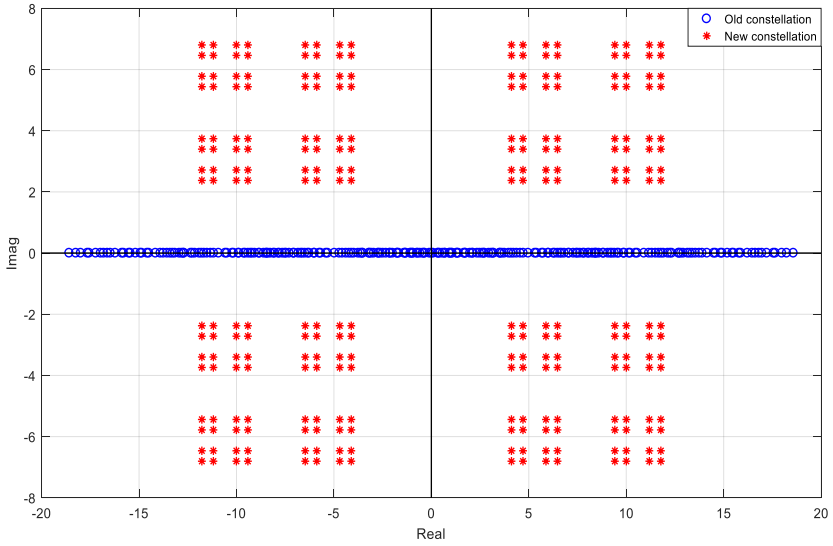


الشكل (5−7) التحسين على معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة تخصيص الموارد العشوائية من أجل Γ_min=1,2,3dB.

نلاحظ من الشكل (5−7)، أن أداء معدل الخطأ للنظام باستخدام طريقة تخصيص الموارد العشوائية أفضل من أداء النظام باستخدام طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة المبين في الشكل (5−6)، وذلك بالاعتماد على طريقة التحسين المقترحة، فمثلاً من أجل $snr = 25dB$ عند $\Gamma_{min} = 1dB$ يكون الخطأ من رتبة 10^{-2} في طريقة تخصيص الموارد العشوائية، بينما في طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة يكون الخطأ من رتبة 10^{-1}، وهذا الاختلاف لأن عدد الطبقات الأمثلي في

طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة $L_{opt} = 11$ أكبر من العدد $L_{opt} = 7$ في طريقة تخصيص الموارد العشوائية.

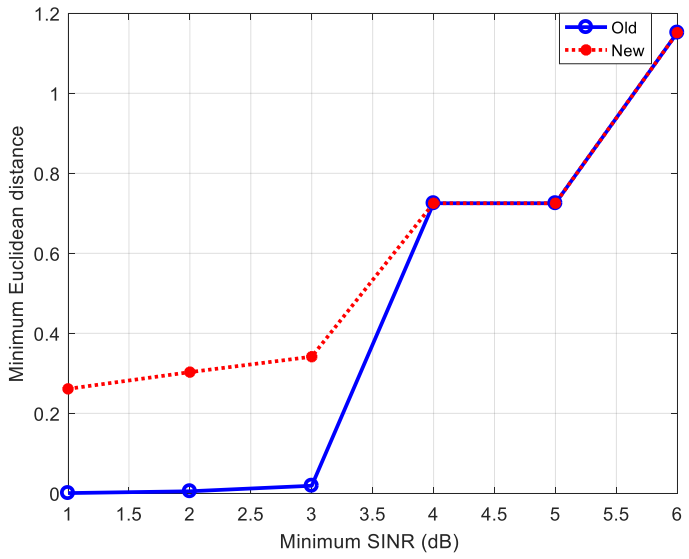
بالنتيجة تتيح الطريقة المقترحة في هذه الفقرة إمكانية تحسين معدل الخطأ في النظام الهجين عند قيم الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج المنخفضة وخصوصاً من أجل نسبة إشارة للضجيج عالية، وهذا التحسين يعود لتزايد أصغر مسافة إقليدية minimum Euclidean distance بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي SC لكل المستخدمين كما هو مبين في الشكل (5-8)، حيث تم توضيح نقاط الكوكبة بعدد $2^L = 256$ من أجل القيم الأمثلية $\Gamma = \Gamma_{opt} = 3dB$ و $L = L_{opt} = 8$ الناتجة عن حل المسألة (4-20) من أجل $\Gamma_{min} = 3dB$ وفقاً لطريقة تخصيص الموارد بالاعتماد على القناة حيث $P_{max} = 18dB$.



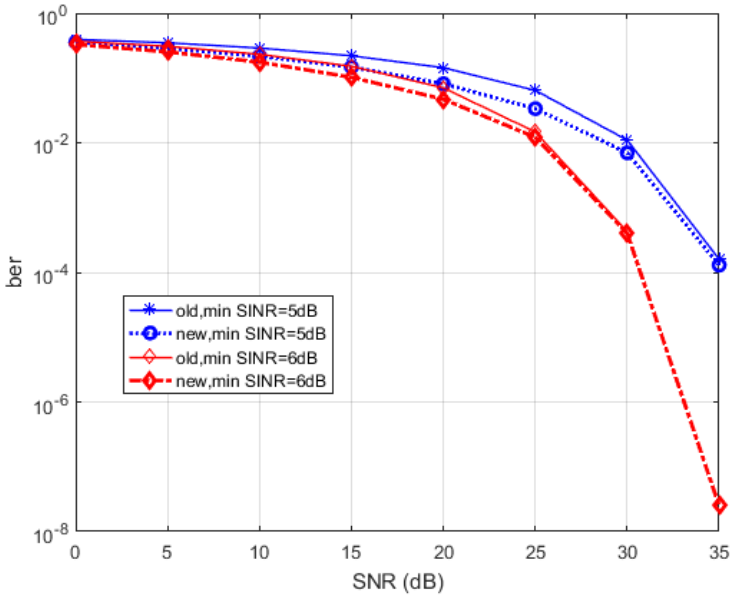
الشكل (5-8): نقاط كوكبة الترميز التراكبي SC من أجل Γ=3dB و L=8.

من الشكل (5-8) نلاحظ أن كوكبة الترميز التراكبي SC الموافقة للحالة الأولى (بدون تحسين) تتمثل بأعداد حقيقية بينما تتمثل الكوكبة في الطريقة المقترحة بنقاط عقدية، حيث تكون المسافة الإقليدية الأصغرية في الحالة الأولى 0.01906 وتصبح في الحالة الثانية 0.3416 من أجل $\Gamma_{min} = 3dB$

أي مضاعفة المسافة بمقدار 18 مرة كما هو مبين في الشكل (5−9)، حيث تُحسب المسافة الإقليدية بين نقطتين (x, y) وفق التالي: $|x - y|$. تم حساب المسافة الإقليدية الأصغرية بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي SC في الحالتين من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافقة لقيم الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $\Gamma_{min} = 1,2,3,4,5,6dB$ ، حيث أدت الطريقة المقترحة لزيادة المسافة الإقليدية الأصغرية عند القيم المنخفضة $\Gamma_{min} = 1,2,3dB$ والذي أدى بدوره إلى تحسين أداء معدل الخطأ BER عند هذه القيم كما بينت النتائج في الشكل (5−6). بينما لا تتغير المسافة الإقليدية الأصغرية عند استخدام الطريقة المقترحة من أجل قيم الحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $\Gamma_{min} = 5,6dB$ كما هو موضح في الشكل (5−9)، ما يؤدي إلى تشابه أداء معدل الخطأ BER في الحالتين كما تبينه نتائج المحاكاة في الشكل (5−10)، حيث معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة من أجل القيم الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المبينة في الشكل (4−11−3) و(4−11−2) عند قيم مختلفة للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج $\Gamma_{min} = 5,6dB$.



الشكل (5−9): المسافة الإقليدية الأصغرية بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي تبعاً للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج



الشكل (5-10): معدل الخطأ BER تبعاً لنسبة الإشارة للضجيج باستخدام طريقة تخصيص الموارد المعتمدة على القناة من أجل Γ_min=5,6dB .

بينت نتائج المحاكاة السابقة فعالية الطريقة المقترحة لتحسين أداء معدل الخطأ BER للنظام من أجل القيم المنخفضة للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج الموافقة لمتطلبات نقل معطيات منخفضة، حيث يتناقص معدل نقل المعطيات المطلوب لكل مستخدم بتخفيض نسبة الإشارة للتداخل والضجيج كما تتزايد إنتاجية توصيل النظام الممكن تحقيقها كما بينت النتائج في الفصل السابق. عملياً، إن تحقيق الطريقة المقترحة لتحسين أداء الكشف يمكن أن يتم من خلال تغيير نقطتي كوكبتي التعديل BPSK وفقاً للطبقة المستهدفة التي اختارها كل مستخدم.

5.5. إقرار صلاحية النتائج ومقارنتها مع دراسات سابقة

تُساهم خوارزمية الأمثلة المقترحة في إيجاد قيم المعاملات الأمثلية (عدد الطبقات، عدد القنوات الجزئية ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج) الموافقة لأعلى إنتاجية توصيل ممكن تحقيقها في النظام الهجين ضمن قيود استطاعة الإرسال المتاحة للأجهزة ومتطلبات جودة الخدمة لكل مستخدم والتي تم تحديد

حدها الأدنى بمعدل النقل المتاح ضمن نظام OMA وذلك بالاعتماد على تغيير عرض المجال الترددي المخصصة لكل مستخدم من خلال اختيار عدد القنوات الترددية الجزئية M المناسب.

بهدف المقارنة والتحقق من عمل هذه الخوارزمية نفرض المعاملات المعطاة في المرجع [26]

عرض المجال الكلي	عدد الطبقات الأعظمي	نسبة الإشارة للتداخل والضجيج	عدد القنوات الجزئية
$B_T = 180Hz$	$L_{26} = 5$	$\Gamma_{26} = 6dB$	$M_{26} = M_o = 48$

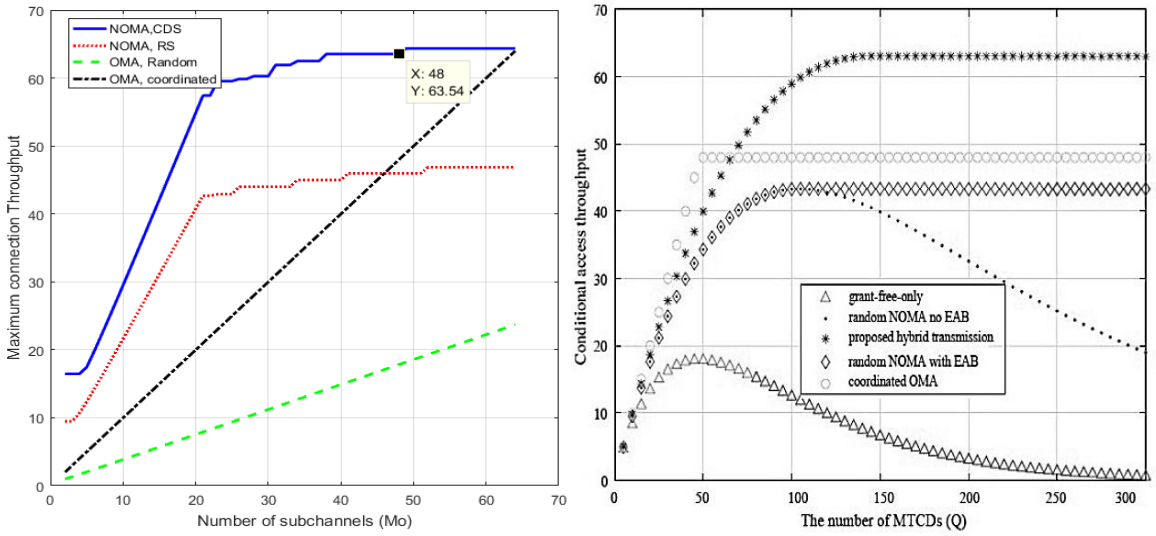
يكون معدل النقل لكل مستخدم الموافق لهذه المعاملات $R_{26} = \left(\frac{B_T}{M_{26}}\right) log_2(1 + \Gamma_{26}) = 8.6867bps$ و من أجل تطبيق الخوارزمية المقترحة بحيث يكون R_{26} هو الحد الأدنى لمعدل النقل (قيد السعة)، يتم حساب القيم الصغرى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{M_min} الموافقة لكل قيمة $M \in [M_{min}, M_{max}]$ وفق الصيغة التالية:

$$\Gamma_{M_min} = \min\{\Gamma_{max}, \max\{\Gamma_{min}, 2^{(MR_{26}/B_T)} - 1\}\} \qquad (21-4)$$

حيث Γ_{max} نسبة الإشارة للتداخل والضجيج الأعظمية المعطاة في العلاقة (3-9).

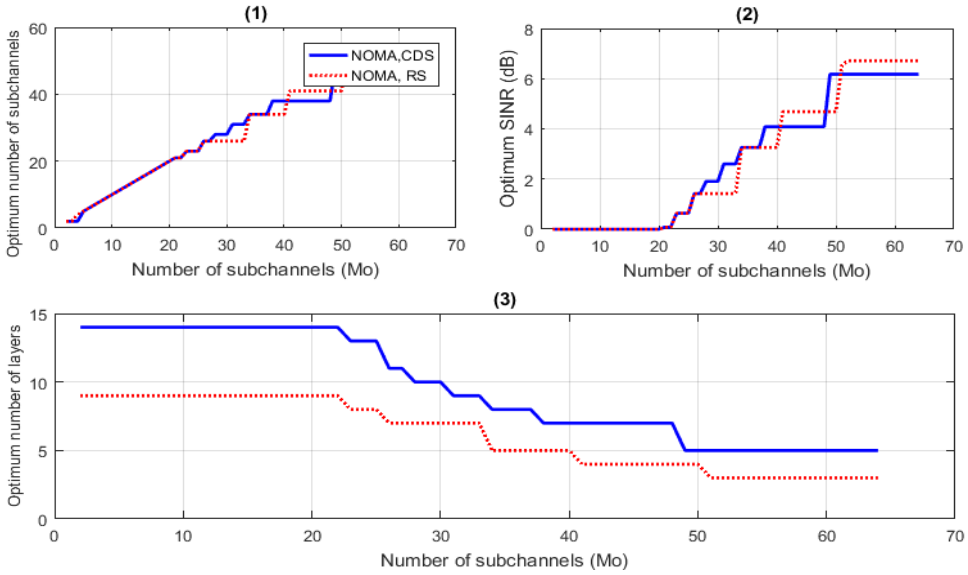
يبين الشكل (4-14-1) إنتاجية التوصيل العظمى الممكن تحقيقها بالاعتماد على مسألة الأمثلة تبعاً لعدد القنوات الجزئية M_o بحيث لا يقل معدل النقل لكل مستخدم عن القيمة $R_{26} = 8.6867bps$ من أجل $\Gamma_{min} = 1dB$.

حيث نلاحظ أن القيمة العظمى لإنتاجية التوصيل هي 63.54 من أجل $M_o = 48$ والتي تساوي القيمة العظمى (63.07) المحققة في المرجع [26] مع تحسن بسيط نتيجة الاختيار الأمثل للمعاملات التي تُحقق قيود الاستطاعة ومعدل النقل المطلوب حيث تكون $L_{opt} = 7$ ، $\Gamma_{opt} = 4.091dB$، $M_{opt} = 38$ ، عند $M_o = 48$ كما هو موضح في الشكل(4-15).



(1) **(2)**

الشكل (4-14): 1) إنتاجية التوصيل العظمى تبعاً لعدد القنوات الترددية الجزئية، 2) إنتاجية التوصيل تبعاً لعدد المستخدمين عند M_o=48 (المرجع 26)



الشكل (4-15): الحلول الأمثلية تبعاً لعدد القنوات الترددية الجزئية: 1) عدد القنوات الجزئية، 2) نسبة الإشارة للتداخل والضجيج، 3) عدد الطبقات. حيث $\Gamma_{min} = 1dB$.

نلاحظ من الشكل (4-14-2) تفوق أداء إنتاجية التوصيل في النظام المقترح مقارنةً مع نظام OMA المنسق (coordinated) والذي تم إدراجه بهدف المقارنة أيضا حيث تكون إنتاجية التوصيل العظمى فيه مساوية لعدد القنوات الترددية الجزئية ولكن على حساب التشوير الزائد signaling overhead وزيادة زمن التلبث Latency.

بالرغم من أن الهدف الأساسي لهذا البحث هو إيجاد القيم الأمثلية لمعاملات النظام التي تحقق القيمة العظمى للإنتاجية ضمن القيود المفروضة فقد وجدنا من خلال هذه المقارنة أنه يمكن أيضا تحسين هذه الانتاجية في النظام المبين في المرجع [26] وذلك من خلال الاختيار الأمثل لمعاملات النظام، لكن يرتبط هذا التحسين بالقيمة المتاحة للحد الأدنى لنسبة الإشارة للتداخل والضجيج Γ_{min} والتي يجب اختيارها بما يتناسب مع جودة الوصلة (معدل خطأ البت) المطلوبة.

بعد التأكد من صحة نتائج خوارزمية الأمثلة المقترحة أصبح من الممكن توظيف نتائج هذا البحث في تحديد القيم الأمثلية لمعاملات النظام المقترح حسب متطلبات التطبيق المستخدم من حيث استطاعة الارسال الأعظمية المتاحة ، معدل نقل البت لكل مستخدم و عدد المستخدمين المطلوب تخديمهم مع الأخذ بعين الاعتبار معدل خطأ البت في كل حالة وهذا ما يمكن توضيحه من خلال الجدول التالي والذي يقارن بين عدة حالات يمكن أن تكون سيناريوهات محتملة لتطبيقات مختلفة:

$$\boldsymbol{M_o = 48}$$

	عامل المقارنة	الحالة 1	الحالة 2	الحالة 3
القيود	**الاستطاعة العظمى (dBm)**	18	18	18
	معدل النقل لكل مستخدم (bps)	6.515	8.686	14.9
القيم الأمثلية	**عدد القنوات الجزئية M**	45	38	25
	عدد الطبقات L	8	7	6
	نسبة الإشارة للتداخل والضجيج (dB)	3.207	4.09	5
الخرج	**الإنتاجية**	82	63.54	38
	معدل خطأ البت من أجل SNR=30 dB	0.285	0.16	0.009

- نلاحظ من القيم في الحالة الأولى ارتفاع قيمة الإنتاجية مع انخفاض معدل نقل البت لكل مستخدم مما يجعل هذه الحالة مناسبة لسيناريوهات mMTC والتي تركز على تخديم أكبر عدد ممكن من المستخدمين ويجعلها مناسبة لتطبيقات مثل IOT

- كما تظهر النتائج في الحالة الثالثة ارتفاع معدل النقل لكل مستخدم على حساب إنتاجية التوصيل وبالتالي تكون مناسبة أكثر للتطبيقات التي تحتاج معدلات نقل عالية.

- تحقق الحالة الثانية إنتاجية مساوية للانتاجية في المرجع 26 حيث يمكن اعتبارها حالة مرجعية تلبي قيم مقبولة لعدد المستخدمين ومعدلات النقل الخاصة بهم

- نلاحظ من الجدول انخفاض معدل خطأ البت في الحالة الثالثة والذي يمكن تفسيره بأن عدد بارتفاع نسبة الإشارة إلى التداخل والضجيج مقارنة بباقي الحالات كما أن عدد الطبقات فيها (5 طبقات) أصغر منه في باقي الحالات حيث أن عدد الطبقات يعتبر العامل الأساسي في ازدياد التعقيد وانتشار الخطأ.

5-6 الخلاصة

رأينا في هذا الفصل أن معدل الخطأ يزداد بزيادة عدد الطبقات، أي ينخفض الأداء عند قيم نسبة الإشارة للتداخل والضجيج المنخفضة الموافقة لعدد الطبقات تبعاً لقيود استطاعة الإرسال وحتى عند القيم الأمثلية لهذه المعاملات الناتجة من حل المسألة (4-20) المطروحة في الفصل الرابع. من أجل تحسين هذا الأداء عند هذه القيم، قدمنا طريقة لتحسين أداء معدل الخطأ BER للحفاظ على ربح إنتاجية توصيل النظام الهجين المحقق في الفصل الرابع من أجل إرسال الوصلة الصاعدة بمعدلات نقل منخفضة، وذلك من خلال زيادة المسافة الإقليدية الأصغرية minimum Euclidean distance بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي SC بتغيير نقطتي كوكبة التعديل BPSK لكل مستخدم وفقاً للطبقة المستهدفة التي اختارها.

الخاتمة

قدمنا في هذا البحث دراسة لمبادئ ومفهوم النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA مع التركيز على إرسال الوصلة الصاعدة UL، حيث تعتمد مخططات إرسال NOMA على مبدأ الترميز التراكبي SC للإشارات المرسلة وتُصنف تبعاً لمجال هذا الترميز إلى فئتين أساسيتين : النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA والنفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الرماز CD-NOMA. كذلك يمكن تصنيفها وفقاً للطريقة المتبعة في تشكيل التواقيع أو محددات المستخدمين على مستوى البت أو الرمز كالاعتماد على النثر، البعثرة، دفاتر الترميز والتشابك. في المستقبل يتم تمييز وفك ترميز معطيات المستخدمين بالاعتماد على كواشف متعددة المستخدمين MUD (مثل كاشف الحد الأدنى لمتوسط الخطأ التربيعي MMSE) وتقنيات حذف التداخل IC (مثل حذف التداخل التتابعي SIC)، حيث تم التحقق من فعالية النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA لتحسين سعة نظام الوصلة الصاعدة من أجل مستخدمين مقارنةً مع نظام OMA.

تدعم مخططات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA إرسالات الوصلة الصاعدة الخالية من الضمان GF الذي يعاني من تزايد احتمال حدوث التصادم مع وجود عدد كبير من المستخدمين النشطين، حيث تتيح مخططات NOMA توفير تنوع أكبر في تواقيع ومحددات المستخدمين ما يؤدي إلى تخفيض احتمال حدوث التصادم. تم اقتراح النفاذ المتعدد غير المتعامد الخالي من الضمان GF-NOMA في الجيل الخامس 5G لتحسينات الأداء من حيث تقليل زمن التلبث وتوفير استهلاك الطاقة رفع الفعالية الطيفية لتوائم متطلبات مختلف السيناريوهات المتوقعة في الجيل الخامس 5G. في هذا السياق قدمنا في هذا البحث نموذج نظام هجين من مخططات النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الاستطاعة PD-NOMA والنفاذ المعدد المتعامد OMA بهدف تقليل تعقيد مستقبل MMSE-SIC، حيث يختار المستخدمون الطبقة والقناة الجزئية بالاعتماد على معلومات حالة القناة والمسافة بين المستخدم والمحطة

القاعدية في كل شريحة زمنية والتي بينت النتائج تفوق هذه الطريقة في تخصيص الموارد مقارنةً مع طريقة التخصيص العشوائي للموارد من حيث أداء إنتاجية توصيل. بالإضافة إلى فعالية هذه الطريقة في رفع السعة وزيادة إنتاجية توصيل مقارنةً مع نظام OMA. وذلك من خلال إيجاد القيم الأمثلية لعدد الطبقات، عدد القنوات الجزئية ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج المطلوبة ضمن متطلبات جودة الخدمة وقيود استطاعة الإرسال المفروضة للأجهزة بهدف تحقيق أعلى إنتاجية توصيل، حيث تم استخدام خوارزمية الاختيار المشترك لعدد الطبقات والقنوات الترددية الجزئية JSCNLS لحل هذه المسألة.

تم إجراء محاكاة للنظام لتقييم أداء معدل الخطأ عند المعاملات الأمثلية لعدد الطبقات ونسبة الإشارة للتداخل والضجيج. ينخفض أداء BER عند ربح أعظمي لإنتاجية التوصيل حيث تكون القيم الأمثلية لعدد الطبقات عالية وقيم نسبة الإشارة للتداخل والضجيج منخفضة، لذلك تم تطوير آلية جديدة تساهم في تحسين الأداء من خلال تغيير كوكبة التعديل المستخدم BPSK في مرسل كل مستخدم وفقاً للطبقة المختارة. ما يؤدي إلى زيادة الحد الأدنى للمسافة الإقليدية بين نقاط كوكبة الترميز التراكبي في مجال الاستطاعة وبالتالي تحسين أداء معدل الخطأ BER خصوصاً عند نسب إشارة للضجيج عالية كما بينتها نتائج المحاكاة للنظام.

الأعمال المستقبلية

- أثبت البحث فعالية استخدام مخطط هجين من تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد NOMA والنفاذ المتعدد متعامد OMA لتحسين إنتاجية التوصيل مع المحافظة على متطلبات جودة الخدمة. لذلك يمكن مستقبلاً دراسة إمكانية دمج تقنيات نفاذ أخرى في النظام والاستفادة من تقنيات النفاذ المتعدد غير المتعامد في مجال الترميز code domain -NOMA لتحسين معايير الأداء المختلفة مثل السعة وإنتاجية التوصيل.
- التحقق من فعالية استخدام هذا النموذج في تحسين الأداء لأنظمة الاتصالات التعاونية حيث يمكن إعادة صياغة مسألة إنتاجية التوصيل على اعتبار وجود تنسيق بين المستخدمين من أجل الاستغلال الأمثلي للموارد.
- يمكن العمل لاحقاً على دراسة وتحليل أثر عدد الطبقات على أداء السعة وإنتاجية التوصيل بوجود نماذج مختلفة للقناة مع عدم إهمال خطأ تقدير القناة.

REFERENCES المراجع

1. M. O. Vaezi, Z. Ding and H. V. Poor, (2018) "**Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond**", Springer,Switzerland, , 692. book papaer2(3)
2. M. Sousa, P. Vieira, M. P. Queluz and A. Rodrigues, (2018)" **A Survey on the 5th Generation of Mobile Communications**", ISEL Academic Journal of Electronics Telecommunications and Computers, vol. 4, no. 1,.
3. P. Paudel, (2018)"**5G Telecommunication Technology: History, Overview, Requirements and Use Case Scenario in Context of Nepal**", Confernce: IT4D.
4. W. Xiang, K. Zheng and X. Shen, (2017) " **5G Mobile Communications**", Springer,Switzerland, , 690. book 5G
5. Al Rabee, F.T. and Gitlin, R.D. (2020). "**Uplink Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)**". International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking, 12(4), pp.65–73.
6. Z. Zhang, A. Vasilakos, and L. Hanzo, (2015)"**Full Duplex Techniques for 5G Networks: Self-Interference Cancellation, Protocol Design, and Relay Selection**", IEEE Communication magazine, vol. 53, no. 5, pp. 128-137,.
7. A.Goldsmith, (2017)"**Wireless communications**", Campridge Unviversity,
8. Dai. L, Wang. B, Ding. Z, Wang. Z, Chen. S, and Hanzo. L, "**A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G**", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 35. 2181–2195,. 3
9. Islam. S. M. R, Avazov.N, Dobre. O. A, and Kwak. K. s, (2017)"**Powerdomain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges**", IEEE Communication. Surveys & Tutorials, vol. 19. 721–742,. 1
10. P. wang, J. xiao and L. Ping, (2016)"**Comparision of Orthogonal and Non-orthogonal Approaches to Future Wireless Cellular Systems**", IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY MAGAZINE,.
11. Rintamaki, M., Koivo, H. and Hartimo, I. (2004). **"Adaptive Closed-Loop Power Control Algorithms for CDMA Cellular Communication Systems"**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 53(6), pp.1756–1768.
12. S Rim, M. and Kang, C. (2019**) " Uplink Non-Orthogonal Multiple Access with Channel Estimation Errors for Internet of Things Applications. Sensors**" 19(4), p.912
13. S. Bopping and J. M. Shea, (2006)"**Superposition coding in the downlink of CDMA cellular systems**," IEEE Wireless Communications and Networking Conference, , pp. 1978-1983.
14. Y. Shan, C. Peng, L. Lin, Z. Jianchi, and S. Xiaoming, (2017)"**Uplink Multiple Access Schemes for 5G: A Survey**", ZTE COMMUNICATIONS, vol.15 No. S1, pp. 31-40.
15. Neng Ye, Hangcheng Han, Lu Zhao, and Ai-hua Wang, (2018) "**Uplink Nonorthogonal Multiple Access TechnologiesToward 5G: A Survey**," Hindawi, https://doi.org/10.1155/2018/6187580.53

16. Liu. L, Larsson. E. G, Yu. W, Popovski. P, Stefanovic. C, and Carvalho. E, (2018) "**Sparse Signal Processing for Grant-Free Massive Connectivity**", IEEE Signal Processing Magazine , vol. . 88-99. 65

17. Mahmood. N. H, Abreu.R, Bohnke. R, Schubert. M, Berardinelli. G, and Jacobsen. T. H, (2019) "**Uplink Grant-Free Random Access Solutions for URLLC services in 5G New Radio**", arXiv:1904.05593v1.71

18. Yifei Yuan, (2018) "**5G Non-Orthogonal Multiple Access Study**", IEEE Wireless Communications 72

19. Liu.Y, Qin. Z, Elkashlan. M, Ding. Z, Nallanathan. A, and Hanzo. L, (2017) "**Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond**", Proceedings of the IEEE, vol. 105. 2347 - 2381. 2

20. Benjebbour. A, Li. A, Saito. K, Saito. Y, Kishiyama. Y, and Nakamura. T, (2015) "**NOMA: From concept to standardization**", IEEE Conference on Standards for Communications and Netwowking.26

21. Yuya Saito, Yoshihisa Kishiyama, AnassBenjebbour, Takehiro Nakamura, Anxin Li, and Kenichi Higuchi, (2013) "**Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access**", IEEE 37

22. Yunlong Cai, ZhijinQin ,Fangyu Cui, Geoffrey Ye Li, and Julie A. McCann, (2018) "**Modulation and Multiple Access for 5G Networks**", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, vol. 20. 629-646.4

23. Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, SelahattinGökçeli ,GüneGKarabulut Kurt, and OLuzKucur, (2018) "**A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond**", Hindawi, https://doi.org/10.1155/2018/9713450.38

24. Higuchi. K, Benjebbour. A, (2015) "**Non-orthogonal Multiple Access(NOMA) With Successive Interference Cancellation for Future Radio Access**", IEICE Trans. Communication, vol. E98-B. 403-414.31

25. Abbas. R, Shirvanimoghaddam. M, Li. Y, and Vucetic. B, (2018) "**A Multi-Layer Grant-Free NOMA Scheme for Short Packet Transmissions**", https://www .researchgate.net /publication/325144473.paper1(14)

26. Hui Jiang, Qimei Cui, Yu Gu,(2018) "**Distributed Layered Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access for Massive MTC**" arXiv:1807.08143v1. paper2(1)

27. J. Choi, "NOMA-Based Random Access With Multichannel ALOHA," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 12, pp.2736-2743, Dec. 2017. paper1(19)

28. TAoYunzheng, Liu Long, Liu Shang, and ZhAngZhi, (2015) "**A Survey: Several Technologies of Non-Orthogonal Transmission for 5G**", China Communications

29. ZHANJI WU , KUN LU, CHENGXIN JIANG, AND XUANBO SHAO, (2018) "**Comprehensive Study and Comparison on 5G NOMA Schemes**", IEEE Access, vol. 6. 18511-18519.34

30. Hyunsoo Kim, Yeon-Geun Lim, Chan-Byoung Chae, and Daesik Hong, (2017) "**Multiple Access for 5G New Radio: Categorization, Evaluation, and Challenges**", arXiv:1703.09042v1. 33.

31. M. Mohammadkarimi, M. A. Raza, and O. A. Dobre, (2018) "**Signature-based Non-orthogonal Multiple Access (S-NOMA) for Massive Machine-Type Communications in 5G**", arXiv.

32. X. Meng, Y. Wu, C. Wang, and Y. Chen, (2018)**" Turbo-like Iterative Multi-user Receiver Design for 5G Non-orthogonal Multiple Access**", IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC2018-Fall).

33. E. M. Eid, M. M. Fouda, A. S. Eldien, and M. M. Tanyawy, (2017)" **Performance Analysis of MUSA with different Spreading Codes Using Ordered SIC Methods**", 12th International Conference on Computer Engineering and Systems.

34. Chen. Y,Bayesteh. A, Wu. Y, B.Ren, Kang. S, Sun. S, Xiong. Q, Qian. C, Yu. B, Ding. Z, Wang. S,Han. S, Hou. R, and Razavi. R, (2018) "**Toward the Standardization of Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks**". IEEE Communication Magazine, vol. 56. 19 - 27.8

35. J. Xu, X. Dai, W. Ma and Y. Wang, (2014)"**A component-level soft interference cancellation based iterative detection algorothm for coded MIMO systems**", IEEE 80th Vehicular Technology Conference.

36. F. R. Kschischang, B. J. Frey and H. A. Loeliger, (2001)" **Factor graghs and sum-product algorithm**", IEEE Transactions on information theory, vol. 47, no. 2, pp. 498-519.

37. L. Bariah, A. Al-Dweik and S. Muhaidat, (2018)"**On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access Systems with Imperfect Successive Interference Cancellation**" IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-6.

38. A. Azari, P. Popovski, G. Miao and C. Stefanovic, (2017)"**Grant-Free Radio Access for Short-Packet Communications over 5G Networks**" GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference, Singapore, pp. 1-7.

39. A. Bayesteh, E. Yi, H. Nikopour and H. Baligh,(2014) "**Blind detection of SCMA for uplink grant-free multiple-access**" 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Barcelona, Spain, 2014, pp. 853-857.

40. R. Keating, R. Ratasuk and A. Ghosh, (2017) "**Investigation of Non-Orthogonal Multiple Access Techniques for Future Cellular Networks**" IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 1-5.

41. R. Hoshyar, R. Razavi and M. Al-Imari,(2010) "**LDS-OFDM an Efficient Multiple Access Technique**" IEEE 71st Vehicular Technology Conference, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 1-5.

42. R. Razavi, R. Hoshyar, M. A. Imran and Y. Wang,(2011) "**Information Theoretic Analysis of LDS Scheme**" in IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 8, pp. 798-800.

43. K. Au et al., (2014)"**Uplink contention based SCMA for 5G radio access**" IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Austin, TX, USA, 2014, pp. 900-905.

44. A. Benjebbovu, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada and T. Nakamura,(2013) "**System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements**" IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Atlanta, GA, USA, 2013, pp. 66-70.

45. Y. Cao, H. Sun, J. Soriaga and T. Ji, (2017)"**Resource Spread Multiple Access - A Novel Transmission Scheme for 5G Uplink**" IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 1-5.

46. Z. Yuan, G. Yu, W. Li, Y. Yuan, X. Wang and J. Xu, (2016)"**Multi-User Shared Access for Internet of Things**" IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 2016, pp. 1-5.

47. Medra, A. and Davidson, T.N. (2014)." **Flexible Codebook Design for Limited Feedback Systems Via Sequential Smooth Optimization on the Grassmannian Manifold**". IEEE Transactions on Signal Processing, 62(5), pp.1305–1318.

48. Zhang.J , Wang X (2017)"**Low Density Spreading Signature Vector Extension (LDS-SVE) for Uplink Multiple Access**" IEEE 86th Vehicular Technology Conference.

49. Li Ping, Lihai Liu, Keying Wu and W. K. Leung,(2006) "**Interleave division multiple-access**" in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, no. 4, pp. 938-947.

50. Hu, S., Yu, B., Qian, C., Xiao, Y., Xiong, Q., Sun, C. and Gao, Y. (2018). "**Nonorthogonal Interleave-Grid Multiple Access Scheme for Industrial Internet of Things in 5G Network**". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(12), pp.5436–5446

51. S. D. Sosnin, G. Xiong, D. Chatterjee and Y. Kwak, (2017)"**Non-Orthogonal Multiple Access with Low Code Rate Spreading and Short Sequence Based Spreading**" IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, Canada, 2017, pp. 1-5.

52. Yang, K., Yang, N., Ye, N., Jia, M., Gao, Z. and Fan, R. (2019). "**Non-Orthogonal Multiple Access: Achieving Sustainable Future Radio Access**". IEEE Communications Magazine, 57(2), pp.116–121

53. Kang, J.-M. and Kim, I.-M. (2018) "**Optimal User Grouping for Downlink NOMA**". IEEE Wireless Communications Letters, 7(5), pp.724–727

54. Wang, X., Labeau, F. and Mei, L. (2018). "**Asynchronous uplink non-orthogonal multiple access (NOMA) with cyclic prefix**". IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, Spain, 2018, pp. 1-6.

55. Morelli, M. (2004) "**Timing and Frequency Synchronization for the Uplink of an OFDMA System**". IEEE Transactions on Communications, 52(2), pp.296–306

Abstract

The new technologies in the fifth-generation (5G) of wireless communication systems, aim to satisfy its growing rapidly requirements. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is one of the promising techniques, which has been actively investigated in recent years for downlink and uplink transmission to help achieve all the targets in system capacity, latency, spectral efficiency and supporting grant-free transmission systems.

transmission scheme is proposed including OMA and PD-NOMA schemes to reduce complexity detection and collision probability in uplink transmission. We divide the cell into different layers based on predetermined received power levels.

The research presents a suggested example algorithm that enables us to determine the optimal values of the parameters of the proposed system that fit imposed application requirements.

This algorithm was arrived at by conducting an analytical study of the connection throughput for this system, which represents the theoretical average number of users which can successfully transmit without collision in a time slot without a collision (choice Several users of the same radio resources), where Numerical results show that the connection throughput can be improved in this scheme compared to OMA scheme, especially at low data rate, which leads to poor link quality. Therefore, a trade-off must be made between connection throughput and link quality by controlling the minimum target SINR or developing new mechanisms at receiver to improve BER performance. So a new mechanism is proposed based on changing the modulation constellation at the transmitter according to the selected layer, and which provided an acceptable improvement.