

تحسين فعالية الطيف بالاختيار المناسب لمخطط التعديل ومعدل الترميز

د. ناجي ابراهيم محمد*

د. محمد علي عنبر**

رهف ابراهيم ابراهيم***

(تاريخ الإيداع 21 / 9 / 2020 . قبل للنشر 19 / 11 / 2020)

□ الملخص □

الزيادة المستمرة في عدد مستخدمي الشبكات اللاسلكية، والحاجة لمعدلات نقل عالية دفع إلى ابتكار تقنيات عديدة لتلبية حاجات المستخدمين. تهدف الدراسة إلى تحديد إمكانية الاستخدام الفعال للطيف المتاح عند الإرسال، وذلك باستخدام تقنيات التعديل والترميز التكيفي (AMC). بالاعتماد على نموذج ماركوف ذو الحالة المنتهية FSMC للاختيار بين مخططات التعديل، ومعدل الترميز المناسب من أجل تحقيق التوازن بين فعالية الطيف، ومعدل خطأ البت، (حيث حقق مخطط 64QAM 2/3 أفضل قيمة لفعالية الطيف، وحقق مخطط QPSK 1/2 أفضل نسبة خطأ)، وذلك حسب حالة القناة. وذلك باستخدام البيئة البرمجية MATLAB. الكلمات المفتاحية: OFDMA ، LTE ، سلاسل Markov، فعالية الطيف، معدل خطأ البت، التعديل، الترميز.

* مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا
** مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا
*** طالبة ماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس سوريا

Optimizing spectrum efficiency by appropriate selection of modulation scheme and coding rate

Dr. Naji Ibrahim Mohamad*
Dr. Mohammad Ali Anbar**
RahafIbraheemIbraheem***

(Received 21/ 9 / 2020 . Accepted 19 / 11/ 2020)

□ ABSTRACT □

The continuous increase in the number of wireless network users and the need for high transmission rates, so many technologies has emerged to meet the needs of the users. In this article, we examine the possibility of efficient utilization of the available spectrum upon transmission, using adaptive modulation and coding techniques (AMC).By relying on the Finite-State Markov Model Chine (FSMC) to choose between modulation schemes, and the appropriate coding rate in order to achieve a balance between spectrum efficiency and bit error ratios, (64-QAM 2/3 achieved the best spectrum efficiency value, and QPSK 1/2 scheme achieved its best error rate), depending on the channel's condition. Using the MATLAB programming environment.

Key words: OFDMA, LTE, Markov Chains, Spectral Efficiency, Bit error rate, modulation, coding.

*Teacher, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

**Teacher, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.

*** Master student, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering, Tartous University, Syria

1. مقدمة:

ازداد عدد المستخدمين بشكل كبير على الشبكات اللاسلكية كما زاد طلبهم لمعدلات نقل بيانات عالية لتلبية متطلباتهم في استخدام التطبيقات الحديثة من اتصالات مرئية، وتصفح انترنت عالي السرعة... وهذا ما شكل تحدياً كبيراً لمهندسي الاتصالات، فسعوا لتحسين وابتكار معايير جديدة بمعدلات نقل بيانات أكبر وعرض حزمة أكبر، فوفرت شبكات الجيل الرابع LTE عرض حزمة كبير يصل إلى 20MHz، وحققت معدلات نقل بيانات تصل إلى 100Mbps على الوصلة الهابطة [3].

تعدّ زيادة الحزمة الترددية (Bandwidth) أحد الطرق الفعالة لزيادة معدلات نقل البيانات، لكن هذا الإجراء غير فعال، فهي مقيدة بمعدلات النظام نفسه من هوائيات، ومرشحات فكلاهما يعمل في عرض حزمة محدود.

يتم استخدام (OFDMA Orthogonal frequency-division multiple access) حيث يسمح بتعيين كل حامل فرعي (subcarrier) بشكل مستقل للمستخدمين، مما يتيح الاستخدام المرن للموارد، ويجعل من الممكن دعم التطبيقات المتنقلة. يحقق إرسال OFDMA متعدد الحوامل نتائج أفضل إذا تمدمجه مع التقنيات التكميلية من أجل تحقيق كفاءة أعلى من حيث معدل الخطأ واستغلال الطيف. من بين عدة أساليب لتخصيص الموارد، يسمح التعديل والترميز التكميلي (AMC) لأنظمة OFDMA بتحديد أنسب مخطط للتعديل والترميز (MCS) اعتماداً على ظروف الانتشار لقناة الاتصال [2].

أثناء ظروف الانتشار الجيدة، مخطط تعديل عالي الترتيب (مثلاً 64-QAM) مع ترميز منخفض، بينما في ظروف الانتشار غير الجيدة للإشارة، يختار النظام مخطط تعديل أكثر قوة (مثلاً QPSK أو 4-QAM)، ومعدل ترميز أعلى للحفاظ على جودة الاتصال واستقرار الوصلة دون زيادة استطاعة الإشارة [1][8].
نهدف لاستفادة الكاملة من خصائص الإرسال متعدد الحوامل، والمرونة التي يوفرها مخطط OFDMA لتحسين استخدام موارد الشبكة من خلال تخصيص التعديل، والترميز لكل إرسال للبيانات، بناءً على حالة القناة الراديوية.

تم في [9] بناء قناة ذات الحالة المحدودة (FSMC) Finite State Markov Chain لتقدير حالة القناة عن طريق تقسيم نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) المستقبل إلى فواصل زمنية. وذلك لتحديد خطوة التكميم الأمثل. وفي [6] أخذت ذاكرة القناة بالحسبان وبالتالي كانت احتمالات الانتقال شرطية معقدة ولكن التعامل مع احتمال الانتقال في القنوات ذات سعات كبيرة سيكون أكثر تعقيداً.

في [11] تم تشكيل نموذج (FSMC) لقناة تخامد رايلي من أجل عدد محدود من حالات SNR وفقاً للمدة الزمنية لكل حالة، حيث تقابل كل حالة جودة قناة مختلفة مبنية حسب معدل خطأ البت BER.

واستخدم [10] نموذج (FSMC) من الدرجة الأولى في أنظمة الجيل الثالث 3G لاتخاذ قرار بمخطط MCS لزيادة متوسط الإنتاجية مع الحفاظ على معدل خطأ إطار FER مقبول. أما [6] اقترح طريقة جديدة لتقسيم القناة بناءً على معدل الخطأ FER المستهدف. استخدمنا سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية في دراستنا ضمن جهة الإرسال، والحصول على معلومات حالة القناة عن طريق تغذية راجعة بعد تقديرها في المستقبل، أما جميع الدراسات السابقة فعمدت على استخدام هفي جهة الاستقبال، حيث يتم تقدير حالة القناة ومعالجتها في المستقبل.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تتمثل أهمية البحث في استغلال عرض الحزمة بفعالية، أو ما يسمى بفعالية عرض الحزمة (Bandwidth efficiency) أو فعالية الطيف (spectral efficiency)، وذلك باستخدام سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية FSMC لاختيار مخطط التعديل، والترميز المناسب لحالة قناة (الوصلة الهابطة) عند الإرسال، وذلك حسب نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) للقناة اللاسلكية ذات الضجيج الغاوسي الأبيض المضاف (AWGN)، وذلك لتحسين استغلال عرض الحزمة، والحفاظ على استقرار القناة بأقل معدل خطأ ممكن.

3. طرائق البحث ومواده:

1.1. النفاذ المتعدد بتقسيم التردد المتعامد وبنية الإطار الزمنية:

Orthogonal frequency division multiple access and time frame structure

يستخدم OFDMA في الوصلة الهابطة لشبكات LTE وفق المعيار [12] IEEE 802.16. ينقسم كل إطار بطول 10ms إلى 10 إطارات فرعية (sub-frame) طول كل منها 1ms، والتي تتكون من فترتين 2 slots (0.5ms)، وهذه الفترات تقسم إلى ما يسمى بكتل موارد (RB)، وقد يصل عددها إلى 100RB في الفترة الواحدة. تحتوي كل RB على 12 حامل فرعي، وهو الذي يحمل الرموز التي تحتوي على بيانات المعلومات، وتظهر في الشكل (1)، ويتم استخدام نطاق حماية (Cyclic Prefix (CP بين رموز OFDMA لإلغاء التداخل بين الرموز (Inter Symbol Interference) في المستقبل، ولها نوعين: عادية (normal) أو طويلة (extended)، وهي التي تحدد عدد الرموز في الحامل الفرعي (1) [8].

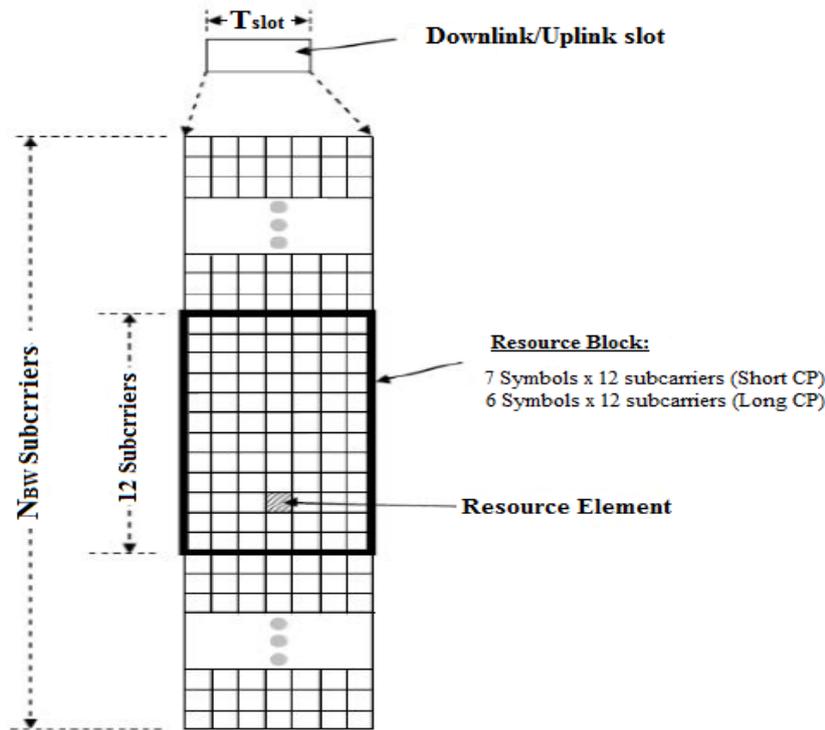
نستطيع حساب معدل الرموز (br) وفق العلاقة (1):

$$br = \frac{\text{number of symbols}}{\text{time}}, \quad \text{symbol/s (1)}$$

وبالتالي يحسب معدل البيانات (bit rate) بالعلاقة:

$$\text{bit rate} = \text{baud rate} \times k, \quad \text{bit/s (2)}$$

حيث k هو عدد البتات في الرمز الواحد.



الشكل (1) شبكة الموارد للوصلة الهابطة والصاعدة.

2.3. التّعديل والتّرميز المتكيف (Adaptive Modulation and Coding (AMC))

يستخدم مصطلح التّعديل المتكيف في الاتصالات اللاسلكية للدلالة على مطابقة التّعديل، والتّرميز مع الإشارة، وبارامترات البروتوكول الأخرى لتتوافق مع حالة الوصلة الراديوية. تعمل أنظمة التّعديل التكيفي على تحسين معدّل الإرسال، ومعدّلات خطأ البت، من خلال استغلال المعلومات التي يمتلكها جهاز الإرسال عن القناة الراديوية. تظهر أنظمة التّعديل المتكيفة، خاصةً عبر بيئات الانتشار اللاسلكي التي يحدث فيها تخامد الإشارة، ويحقّق تحسينات كبيرة في الأداء مقارنة بالأنظمة التي لا تستغل معرفة حالة القناة في جهاز الإرسال [5].

3.3. سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية:

بفرض $S = S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ تشير إلى مجموعة محدودة من حالات القناة كما في الشكل (2). و $\{S_n\}$ هي عملية ماركوف ثابتة حيث $n = 0, 1, 2, \dots$ تمثّل الحالات فترات منفصلة غير متداخلة من غلاف الإشارة المستقبلية، وتتمتع عملية ماركوف المحدودة بخاصية انتقالات الحالة الثابتة، ويكون احتمال الانتقال مستقلاً عن الزمن n . [9] ويمكن كتابته كـ

$$p_{i,k} = \Pr(S_{n+1} = s_k | S_n = s_i) \quad (3)$$

من أجل $n = 0, 1, 2, \dots, k$ و $i \in \{0, 1, 2, \dots, K - 1\}$

يمكننا باستخدام هذا التعريف تحديد مصفوفة احتمال الانتقال P وذلك لـ $K \times K$ حالة بعناصرها $p_{i,k}$ كما

في العلاقة (3). وفي مصفوفة احتمال انتقال الحالة، فإن مجموع العناصر في كل صف يساوي 1 أي:

$$\sum_{l=0}^{K-1} p_{i,l} = 1, \forall k \in \{0, 1, 2, \dots, K - 1\} \quad (4)$$

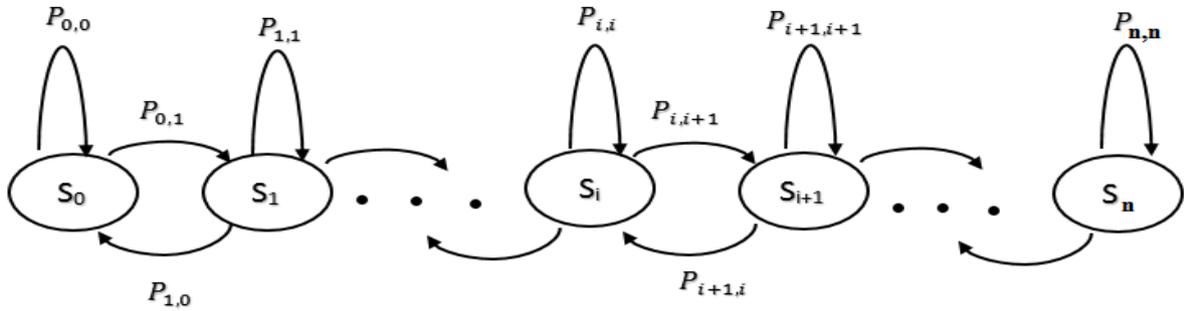
يُطلق على احتمال البقاء في الحالة k في أي فترة زمنية ممكنة n خاصية الانتقال الثابت (الحالة المستقرة) ويمكن تحديدها كما في العلاقة (5):

$$\pi_k = \Pr(S_n = s_k) \quad (5)$$

بالنسبة إلى كل حالة k ، يجب أن تكون حصيلة الدخل والخرج متساوية. تسمى هذه الحالة بالتوازن، ويظهر في العلاقة (6):

$$\sum_{i=0}^{K-1} \pi_i \cdot p_{i,k} = \sum_{l=0}^{K-1} \pi_k \cdot p_{k,l} \quad (6)$$

أو يمكن كتابة العلاقة (6) بشكل مبسط: $\pi^t P = \pi^t$ حيث π^t هي منقول مصفوفة π كما أن مجموع عناصر π مساوي لـ 1.



الشكل (2): نموذج سلسلة ماركوف للقناة.

فعالية الطيف Spectral efficiency:

تشير كفاءة الطيف، أو كفاءة عرض الحزمة الترددي إلى معدل المعلومات التي يمكن نقلها عبر عرض النطاق الترددي المحدد في نظام اتصالات معين.

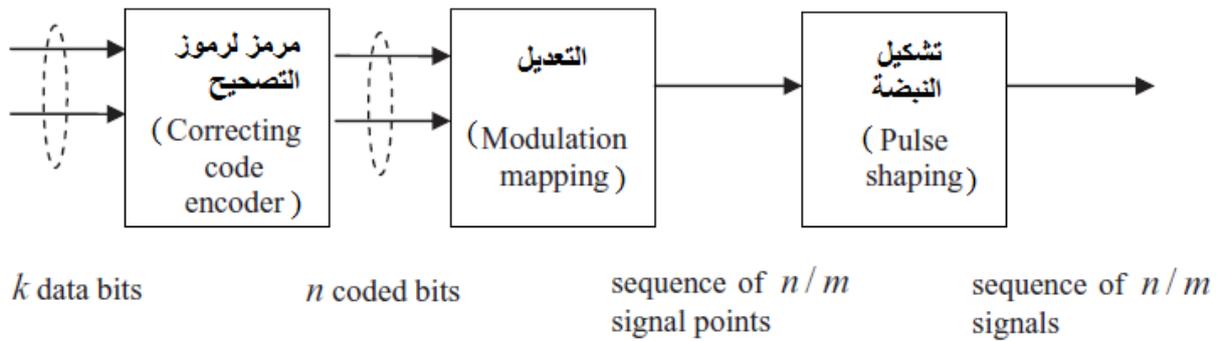
فمن أجل الإرسال غير المرمز بتعديل له ترتيب M باستخدام إشارات تنتمي إلى مجموعة إشارات S ، $(M = |S|)$

حيث $M = 2^m$ عدد صحيح ، ومعدل إرسال البيانات غير المرمزة R_u يعطى في العلاقة (7) :

$$R_u = \frac{k}{T} = \frac{\log_2 M}{T} \text{ bit/s} \quad (7)$$

حيث k عدد البتات المرسل خلال زمن إرسال T .

بالنسبة لإرسال البيانات المرمزة، تكون بنية الجزء المرسل من النظام كما في الشكل (3) [7]:



الشكل (3) المخطط العام لجزء الإرسال في النظام المرمز

تدخل كتله البيانات المكونة من K bit، وتخرج من المرز n bit، وذلك بعد إضافة بتات لتصحيح الخطأ، ونسبة $R = k/n$ بمعدلاً لترميز أو معدّل التصحيح، وبالتالي سيتأثر معدّل إرسال البيانات نتيجة للبتات التي تمت إضافتها في المرز، ويتم حساب معدّل الإرسال R_c للإرسال المرز في العلاقة (8)[7]:

$$R_c = \frac{k}{(n/m)T} = \frac{R \log_2 M}{T} = R \cdot R_u \text{ bit/s} \quad (8)$$

تحدد فعالية الطيف بنسبة معدّل الإرسال R_c إلى عرض الحزمة B وتعطى بالعلاقة (9):

$$\eta = \frac{R_c}{B}, \quad \text{bit/s/Hz} \quad (9)$$

وعلى هذا تحسب الكفاءة الطيفية لمرسل يستخدم تعديل بترتيب M ، وترميز بمعدّل تصحيح (معدّل ترميز) R مع معدّل رمز معين من العلاقات (2) و (8) و (9) نجد:

$$\eta = \frac{R \cdot R_u}{B} = \frac{R \cdot k \cdot \text{baud rate}}{B} \text{ bit/s/Hz} \quad (10)$$

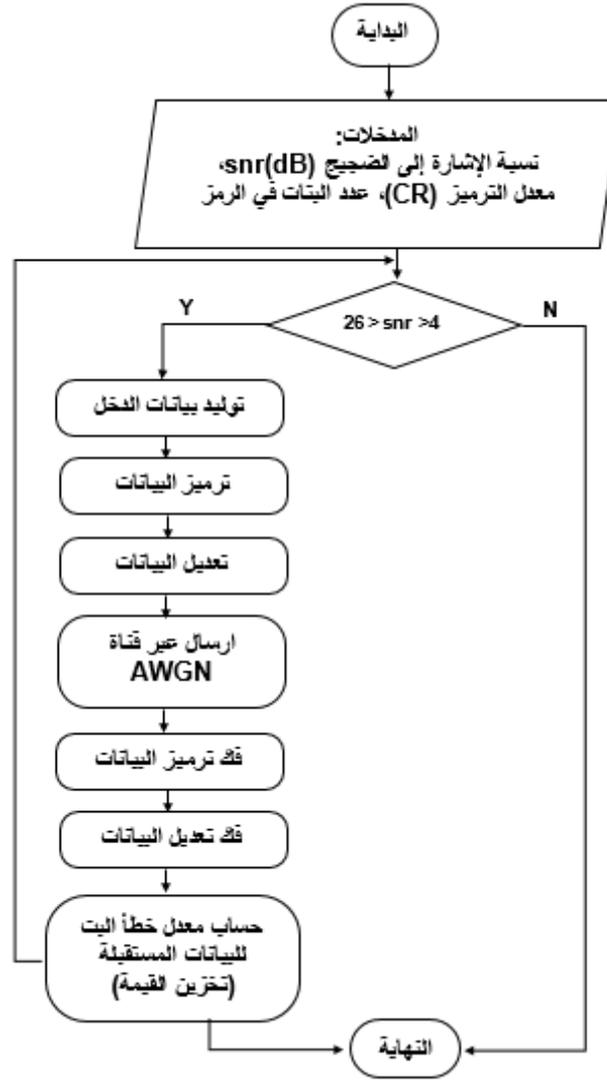
5.3. معدّل خطأ البتات (BER):

معدّل خطأ البت هو عدد البتات الخاطئة مقسوماً على العدد الإجمالي للبتات المرسله خلال فترة زمنية مدروسة. معدّل الخطأ في البتات هو مقياس أداء ليس له وحدة يعطى بالعلاقة [8]:

$$BER = \frac{\text{Error Bits}}{\text{Number of Transmitted Bits}} \quad (11)$$

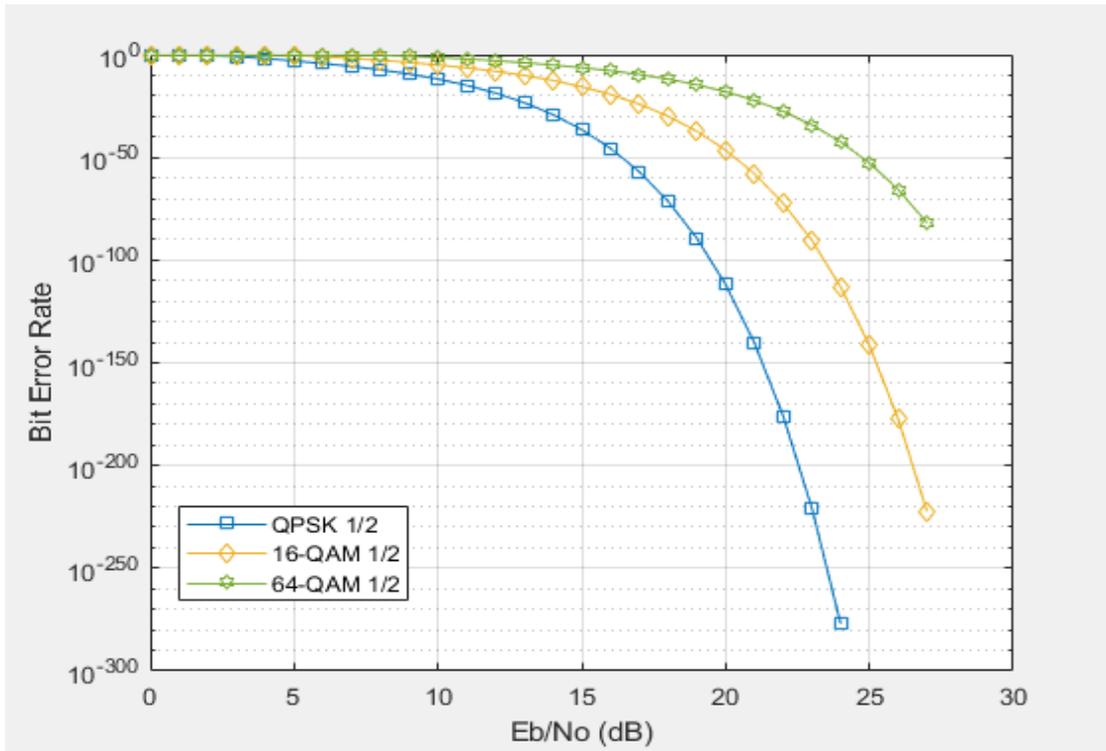
4. النتائج والمناقشة:

يعدّ استغلال الطيف بفعالية أمر بالغ الأهمية، لكن يجب استلام البيانات بأقل خطأ ممكن، لذلك لا بد من استخدام مخططات تعديل قوية، ومعدّلات ترميز أعلى، بالرغم أنها لا تستثمر عرض الحزمة بشكل جيد، حيث يكون عدد بتات المعلومات المرسله أقل، وتزداد البتات المستخدمة للتصحيح. يمثل الشكل (4) مخطط يوضح حساب BER كتاباً بنسبة الإشارة إلى الضجيج:



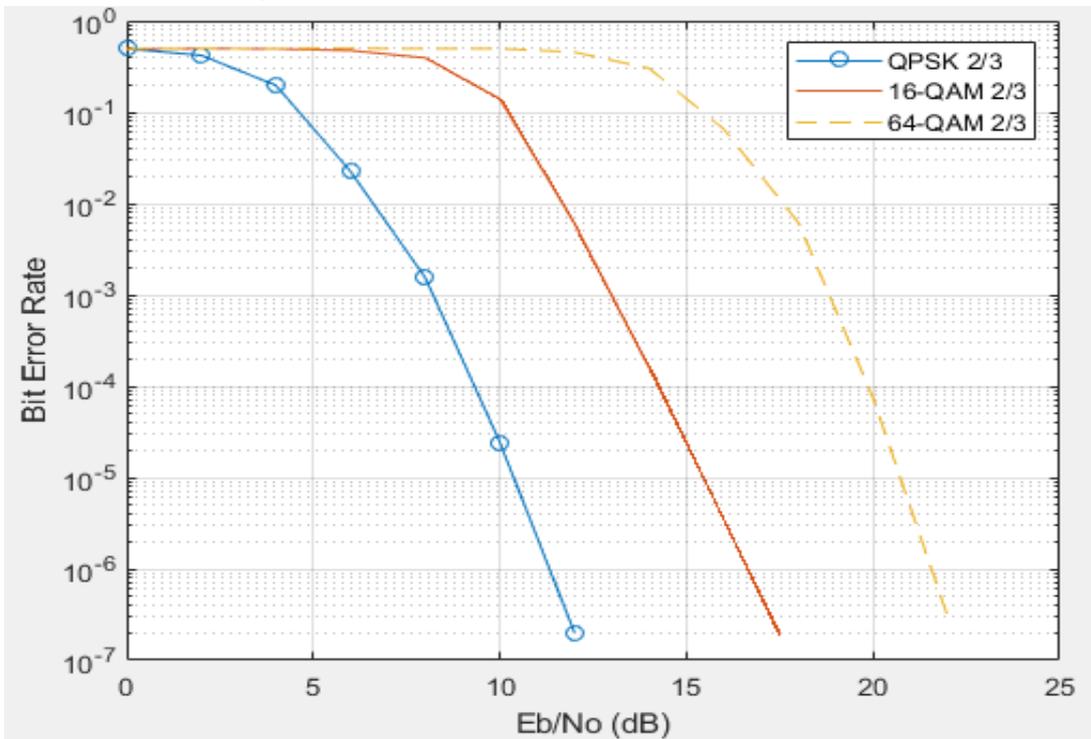
الشكل (4) يوضح المخطط المقتر لحساب آلية حساب BER

فيما يلي محاكاة لمخططات التعديل المقترحة تظهر تغير BER بالنسبة إلى E_b/N_0 حيث E_b هي طاقة البيت و N_0 هي كثافة استطاعة الضجيج وذلك في قناة AWGN باستخدام برنامج matlab.



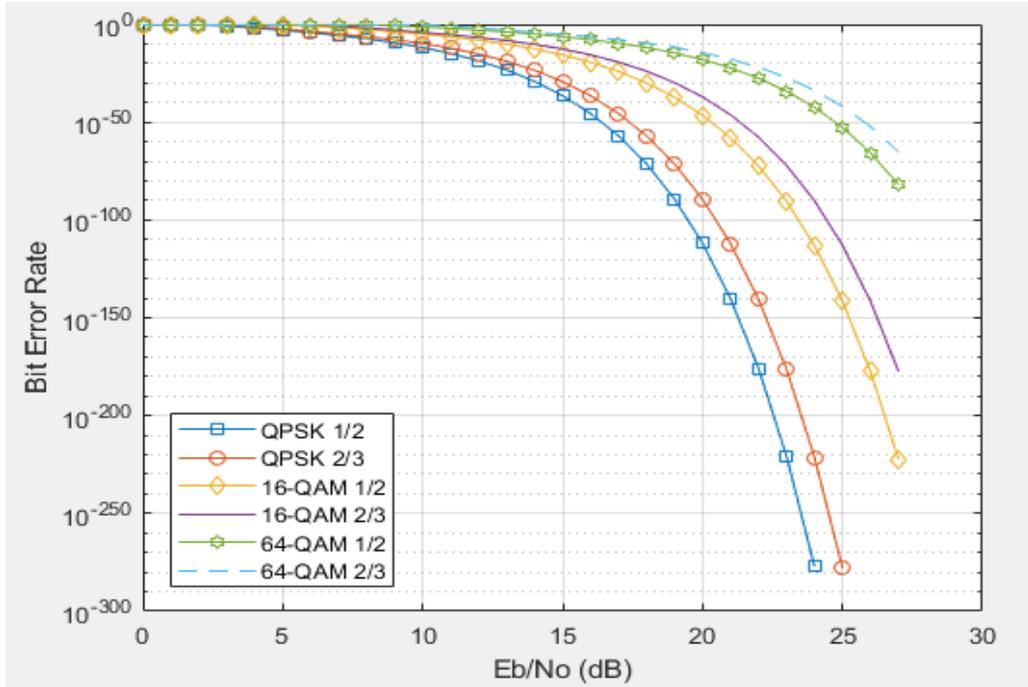
الشكل (5-a) مقارنة بين التّعديلات مع معدّل ترميز 1/2

يوضح الشكل (5-a) مخطّطات التّعديل المختلفة، وذلك بالنسبة لمعدّل ترميز (1/2)، ونبيّن أن مخطّط QPSK يتفوّق على المخطّطات الأخرى من حيث نسبة الخطأ المنخفضة وذلك لأجل قيم SNR صغيرة.



الشكل (5-b) مقارنة بين التّعديلات مع معدّل ترميز 2/3

وهذا يظهر واضحاً في الشكل (5-b) فهو يظهر مخططات التعديل مع معدل ترميز أكبر (2/3)، ويحقق QPSK أيضاً أقل معدل خطأ.



الشكل (6) مقارنة بين مخططات التعديل مع معدلي ترميز 1/2 و 2/3

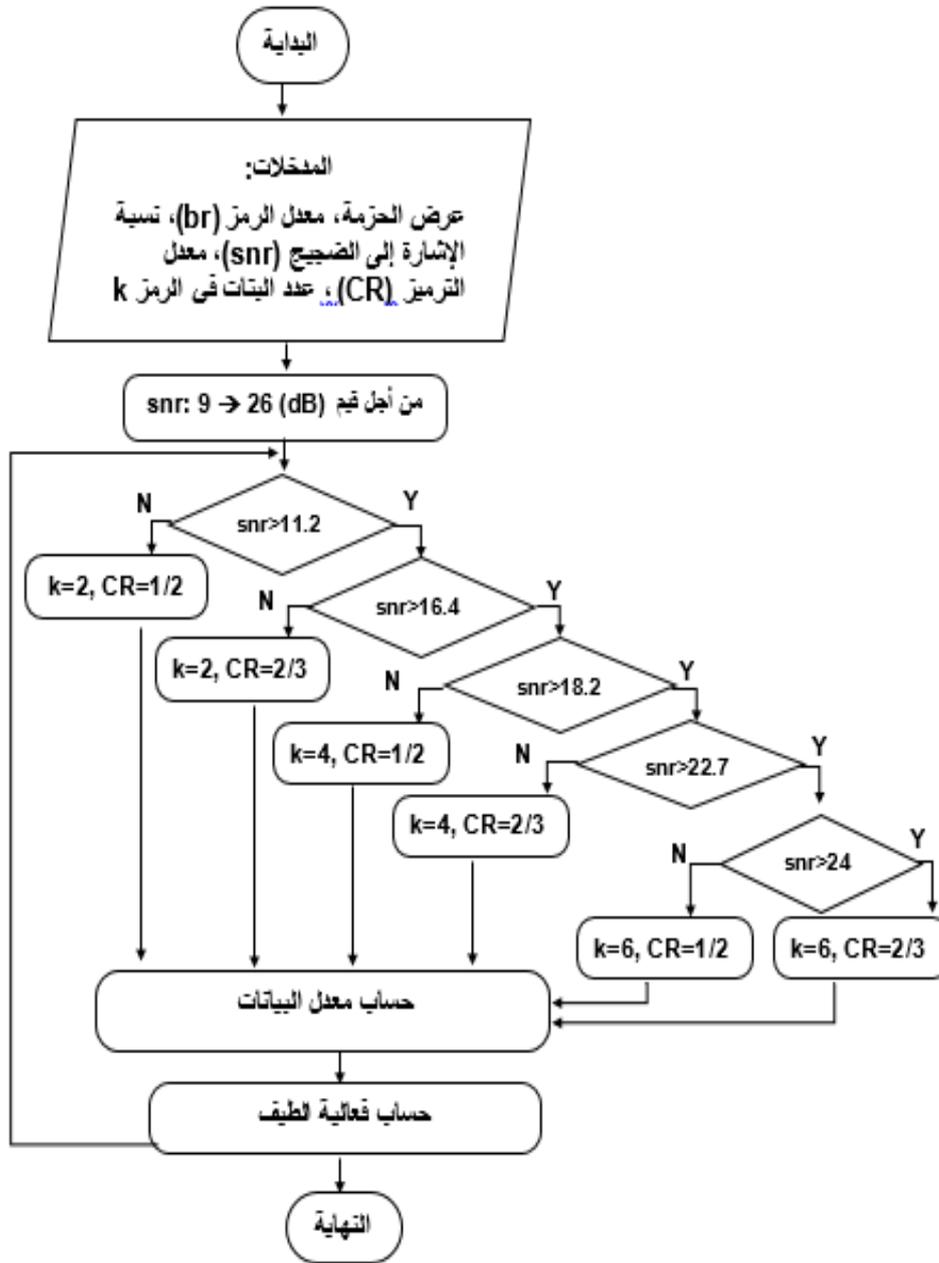
يتبين من الشكل (6) أن التعديل QPSK 1/2 يحقق أقل نسبة خطأ بت، فهو الأنسب لظروف القناة غير الجيدة، وبالتالي سيتم استخدامه عند قيمة SNR منخفضة. ويأتي بعده QPSK 2/3 أما 64 QAM تبقى فيه نسبة BER عالية حتى تتحسن ظروف القناة وتصبح قيمة SNR مرتفعة. وذلك من أجل تحقيق التوازن بين نسبة الأخطاء، وفعالية الطيف نستخدم نموذج ماركوف لتحقيق الاستخدام الأمثل لموارد القناة، والحفاظ على استقرارها اقترحنا في هذه المقالة مجموعة من العتبات لكل مخطط تعديل، ومعدل ترميز كما يوضح الجدول (1):

الجدول (1) العتبات المقترحة لاختيار مخطط التعديل والترميز.

معدلات الترميز	مخطط التعديل	العتبة (SNR dB)
1/2	QPSK	9.5
2/3	QPSK	11.2
1/2	16-QAM	16.4
2/3	16-QAM	18.2
1/2	64-QAM	22.7
2/3	64-QAM	24

يوضح الشكل (7) المخطط الصندوقي لآلية عمل النموذج المقترح لإيجاد فعالية الطيف في قناة

:AWGN



الشكل (7) مخطط يوضح آلية عمل نموذج سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية

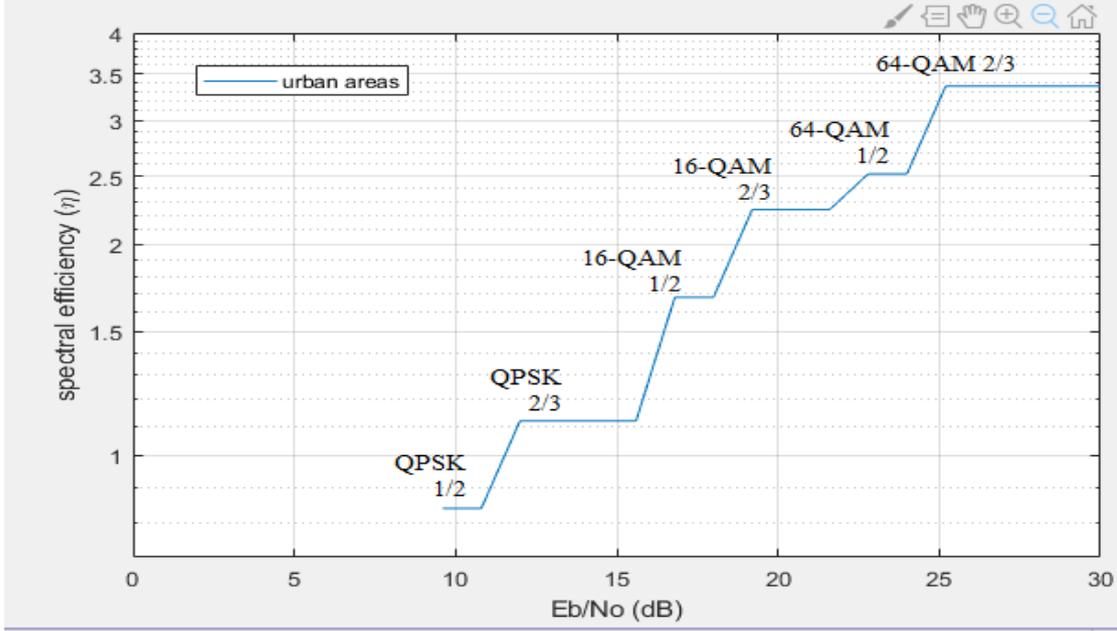
نراعي في المحاكاة بيئتين مختلفتين من حيث الكثافة السكانية وهما:

البيئة الحضرية (المدن): حيث يتم استخدام ترددات عالية، وذلك للحاجة الكبيرة لمعدلات نقل عالية

لعدد كبير من المشتركين، ويتم استخدام بادئة دورية عادية (normal CP) وبالتالي يحتوي كل حامل فرعي

على 7 رموز فيتم حساب معدل الرمز baud rate من العلاقة (2):

$$br = 7 \times 1200 \times 2 \times 10 \times 100 = 16800000 \text{ symbol}$$

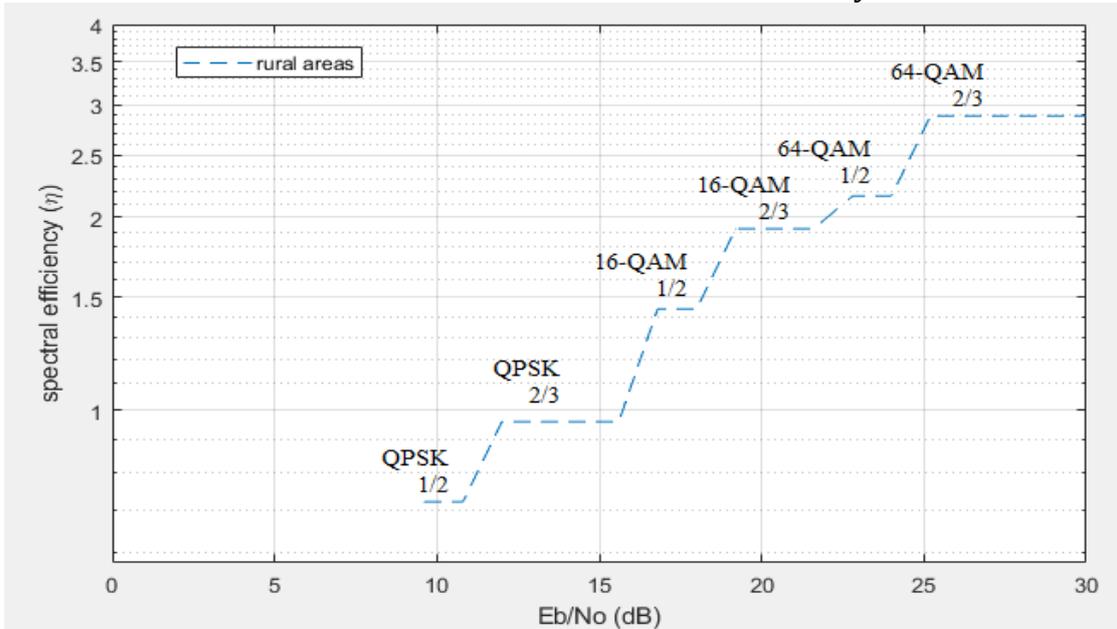


الشكل (8) فعالية الطيف في المناطق الحضرية urban area

يمثل الشكل (8) فعالية الطيف بالنسبة E_b/N_0 ، ويتبين تزايد في فعالية الطيف في المناطق الحضرية، أو المدن مع زيادة مستوى الإشارة، حيث بالاعتماد على نموذج ماركوفنستطيع اختيار مخططات التعديل، ومعدلات الترميز المناسبة وفق العتبات المحددة.

أما البيئة الثانية فهي بيئة الأرياف (منخفضة الكثافة السكانية) يتم استخدام ترددات منخفضة، وتستخدم بادئة دورية طويلة extended CP، وبالتالي سيحتوي كل حامل فرعي على 6 رموز ويكون معدل الرمز:

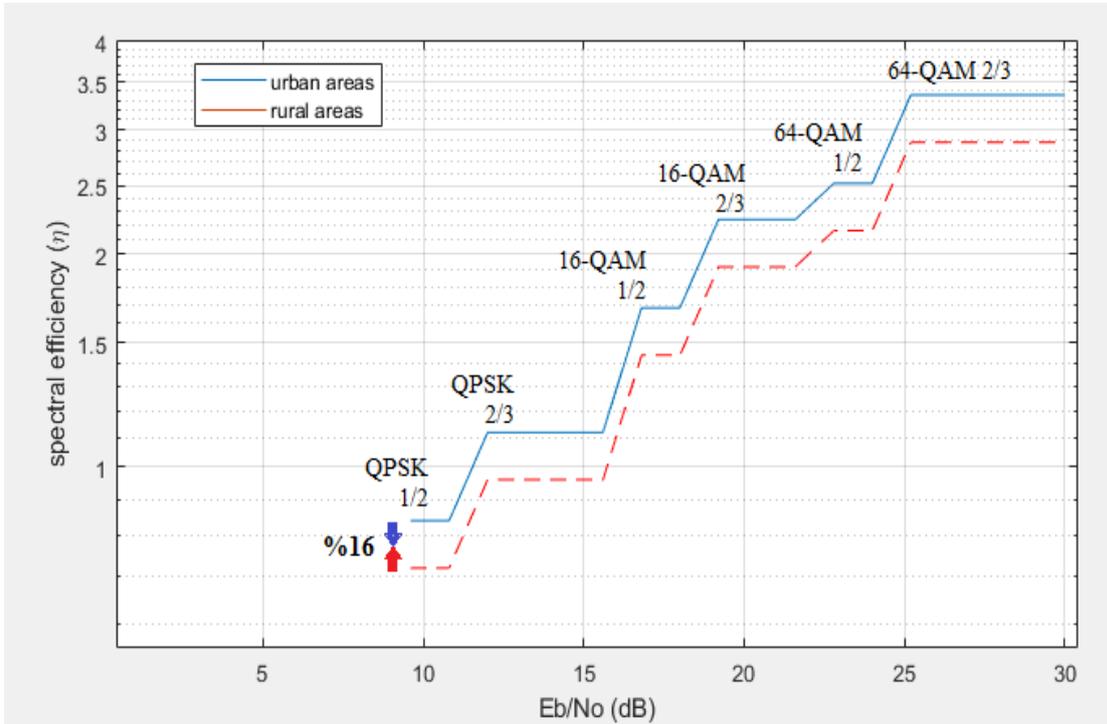
$$br = 6 \times 1200 \times 2 \times 10 \times 100 = 14400000 \text{ symbol}$$



الشكل (9) فعالية الطيف في المناطق الريفية rural area

يتبين لنا في الشكل (9) التزايد في فعالية الطيف مع تحسّن ظروف القناة، ويعود ذلك إلى استخدام مخطّطات تعديل تسمح بإرسال بتات أكثر في الرمز الواحد، وذلك بالاعتماد على سلاسل ماركوف ذات الحالة المنتهية.

ويظهر الشكل (10) فعالية الطيف في كل من البيئتين:



الشكل (10) مقارنة بين فعالية الطيف في المناطق الحضرية والريفية

يتبين أن فعالية الطيف في البيئات ذات الكثافة السكانية المرتفعة أكبر من ذات الكثافة المنخفضة، ويعود ذلك لاستخدام ترددات مرتفعة في الأولى، وبالتالي زيادة معدل الرمز (br) يرافقه زيادة في معدل البيانات (bit rate)، وبالنتيجة هذا سيؤدي إلى الاختلاف في الكفاءة الطيفية.

نوضح في الجدول (2) مقارنة بين فعالية الطيف ومعدل خطأ البت عند قيم SNR المحددة كعتبات في نموذج FSMC، وذلك من أجل كل مخطط تعديل، ومعدل ترميز. حقق QPSK 1/2 نسبة خطأ منخفضة مقارنة مع باقي مخططات التعديل الأخرى عند أقل قيمة لـ SNR، في حين أنّ فعالية الطيف كانت الأقل بين العتبات الأخرى، وذلك لأننا نرسل 2 bit في كل رمز تجنباً للأخطاء في ظروف الإشارة غير الجيدة، وبالتالي ضعف استغلال الطيف، أما QPSK 2/3 هو ثاني أفضل مخطط من حيث نسبة الخطأ، وعند العتبة المختارة حقق نسبة خطأ جيدة جداً، وفعالية أفضل لعرض الحزمة. ومن ثم مخطط 16-QAM ازدادت الفعالية، وكانت نسبة الخطأ قليلة إذ أنّ الإشارة أصبحت أفضل. ليحقق مخطط 16-QAM 2/3 الفعالية الأفضل، ونسبه الخطأ ستكون منخفضة كون نسبة الإشارة إلى الضجيج مرتفعة، وظروف القناة جيدة جداً.

كما تجدر الإشارة إلى أن فعالية الطيف في المناطق المنخفضة الكثافة السكانية ستكون أقل بنسبه 16% من المناطق ذات الكثافة السكانية المرتفعة، وكما ذكرنا يعود ذلك إلى طبيعة إطارات OFDMA واستخدام رموز أقل في المناطق الريفية.

جدول (2) مقارنة بين فعالية الطيف، ومعدل خطأ البت عند قيم SNR المحددة لكل مخطط تعديل.

مخطط التعديل والترميز	SNR	خطأ البت (BER)	فعالية الطيف (urban area)	فعالية الطيف (rural area)
QPSK 1/2	9.5	2.2919×10^{-11}	0.84	0.72
QPSK 2/3	11.2	1.6367×10^{-13}	1.12	0.96
16-QAM 1/2	16.4	5.5022×10^{-22}	1.68	1.44
16-QAM 2/3	18.2	7.257×10^{-26}	2.24	1.92
64-QAM 1/2	22.7	6.5325×10^{-33}	2.52	2.16
64-QAM 2/3	24.4	8.8162×10^{-38}	3.36	2.88

5. الاستنتاجات والتوصيات:

يعد الاستخدام الفعال للطيف هدفاً هاماً، لاستغلال موارد الشبكة بالطريقة المثلى، وتوفير أفضل خدمة لمستخدمي الشبكات اللاسلكية. لذلك كان لابد من تعديل الإشارة المرسله، فأجرينا محاكاة على برنامج MATLAB لتحديد معدل الخطأ لكل مخطط تعديل وفعالية الطيف بعد استخدام نموذج ماركوف في بيئتين إحداهما منخفضة الكثافة السكانية والأخرى ذات كثافة سكانية كبيرة:

1. بالمقارنة بين مخططات التعديل من حيث نسبة الخطأ، حقق مخطط التعديل QPSK أفضل نسبة، وكانت الأقل عند قيمة SNR منخفضة جداً، أما مخطط 16-QAM فكان ثاني أفضل مخطط، أما 64-QAM امتلك أعلى نسبة لخطأ البت عند قيم إشارة منخفضة.
2. من خلال المقارنة بين قيم الكفاءة الطيفية، حقق مخطط التعديل QPSK أقل قيمة في الفعالية الطيفية (0.84)، حسّن مخطط 16-QAM من استغلال عرض الحزمة وتفوق على QPSK، أما 64-QAM فحقق أفضل قيمة للكفاءة طيفية (3.36)، ولكن تم استخدامه عند قيم SNR مرتفعة.
3. استخدمنا لنموذج ماركوف ذو الحالة المنتهية FSMC للاختيار بين مخططات التعديل، ومعدل الترميز المناسب من أجل فعالية الطيف، ونسبه خطأ البت، وذلك حسب حالة القناة (قيمة نسبة الإشارة إلى الضجيج)، بما يضمن استقراره القناة نتيجة الانتقال السلس بين المخططات بحسب العتبات المحددة، وساعد على تحقيق أعلى كفاءة ممكنة بمعدل خطأ صغير مما زاد موثوقية الوصلة.
4. نبين تفوق المناطق ذات الكثافة السكانية المرتفعة في استغلال الطيف مقارنة مع المناطق ذات الكثافة المنخفضة تصل النسبة بينهما إلى 16%، وذلك يعود لزيادة معدلات النقل نتيجة استخدام الترددات المرتفعة في المناطق ذات الكثافة العالية.
5. استخدمنا النموذج المقترح في قنوات الضجيج المضاف، ولم نتطرق إلى قنوات التخادم، وهذا جانب مهم سنتم دراسته لاحقاً، كما لم يأخذ النموذج المقترح بالحسبان التأخير في وصول معلومات حالة القناة إلى المرسل، وهذا أيضاً أحد المواضيع المهمة التي يجب التطرق إليها. وبشكل عام النموذج المقترح يتفوق على الطرق المتبعة سابقاً في المحاكاة، لكن الكلام الفصل سيكون بالتطبيق التجريبي .

6. المراجع

- [1]مي علي.(2017). "دراسة نماذج التعديل المستخدمة في الوصلة الهابطة لنظام LTE". جامعة البعث.
- [2]هيثم الرضوان." (2016)تأثير التعديل المتكيف على معدل الإرسال في شبكات الاتصال النقالة". جامعة تشرين.
- [3] DAHLMAN, E. PARKVALL, S. SKÖLD, J. *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*. Elsevier Ltd. Amsterdam. 2016.
- [4] ELNAWAA,K. *Performance Evaluation for Adaptive Modulation Wireless System over Rayleigh Fading Channel Using Finite State Markov Chain (FSMC) Technique*. British Columbia, University of Victoria, 2017.
- [5] FARHOOD, A. et all. *Performance Analysis Of OFDMA In LTE*. International Journal of Current Engineering and Technology. Vol.4, No.3, 01 June 2014.
- [6] GOLDSMITH, A. J. and VARAIYA, P. P. *Capacity, Mutual Information, and Coding for Finite-State Markov Channel*. IEEE Transactions On Information Theory, VOL. 42, NO. 3, MAY 1996.
- [7] KROUK, E. and SEMENOV, S. *Modulation and Coding Techniques In Wireless Communications*. John Wiley & Sons Ltd. 2011.
- [8] SUKAR,M. & PAL,M.*SC-FDMA & OFDMA In LTE Physical Layer*. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol 12, Nom 2, Jun 2014, pp74- 85.
- [9] WANG, H. S. and MOAYERI, N. *Finite-State Markov Channel-A Useful Model for Radio Communication Channels*. IEEE Transactions On Vehicular Technology. Vol. 44, No. I. February 1995.
- [10] YANG,J.; KHANDANI, A. K. and TIN,N. *Statistical Decision Making In Adaptive Modulation And Coding For 3G Wireless Systems*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, VOL. 54, NO. 6, NOVEMBER 2005.
- [11] ZHANG, Q. and KASSAM, S. A. *Finite-State Markov Model for Rayleigh Fading Channels,* IEEE Transactions On Communications. VOL. 47, NO. 11, NOVEMBER 1999.
- [12] https://standards.ieee.org/standard/802_16e-2005.htmldownload date 28-02-2006.