



كلية الهندسة - جامعة بغداد

Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences

مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية

جمعية كليات الهندسة
اعضاء اتحاد الجامعات العربية

الكشف الأمثل للأنظمة المتعددة الدخل – المتعددة الخرج في أنظمة التعديل الفراغي ذات مخطط الكوكبة M-QAM

محمد عبد الرزاق بكار^{1*}

¹ قسم هندسة الاتصالات، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة الاتحاد الخاصة، دمشق، سوريا، Email: bakkarmb968@gmail.com

*الباحث الممثل: محمد عبد الرزاق بكار، Email: bakkarmb968@gmail.com

نشر في: 31 كانون الأول 2021

الخلاصة – تقترح هذه الورقة البحثية خوارزمية كشف ذات تعقيد منخفض لأنظمة التعديل الفراغي (SM) والتي تستخدم مخطط كوكبة الرموز (M-QAM)، رياضياً، قمنا بتحليل المعادلة الرياضية لكاشف الأرجحية العظمى (ML)، تم توظيف نتائج التحليل الرياضي مع الاستفادة من مزايا مخطط الكوكبة للرموز (M-QAM) من أجل تقدير قيم الرموز المرسل، أظهرت نتائج المحاكاة أنّ الخوارزمية المقترحة تمتلك نفس قيمة معدل الخطأ لكاشف الأرجحية العظمى (ML)، بالإضافة إلى أنها خفّضت بشكل كبير التعقيد الحسابي. تم التحقق من نتائج الخوارزمية المقترحة (LC-QAM) بالمحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب.

الكلمات المفتاحية – التعديل الفراغي (SM)، مخطط الكوكبة (M-QAM)، كاشف الأرجحية العظمى (ML)، التعقيد الحسابي المنخفض، الخوارزمية (LC-QAM).

1. المقدمة

أن مشكلة هذا الكاشف له تعقيد حسابي كبير، ويمكن صياغة مشكلة الدراسة في التساؤلات الآتية:

- كيف يمكننا تقليل التعقيد الحسابي في عملية الكشف لأنظمة التعديل الفراغي؟
- كيف يتم اقتراح خوارزميات كشف ذات تعقيد حسابي منخفض بالمقارنة مع الكاشف الأمثل (كاشف الأرجحية العظمى ML) ونحافظ على أداء نظام الاتصالات من خلال معدل الخطأ للنظام (BER)؟

3. أهداف الدراسة

- دراسة وتحليل خوارزمية كاشف الأرجحية العظمى لتقنية التعديل الفراغي واستنتاج الصيغة الرياضية المعبرة عن تعقيد تنفيذ هذه الخوارزمية.
- اقتراح خوارزمية كشف جديدة لأنظمة التعديل الفراغي خاصة بأنظمة التعديل الرقمية (M-QAM).
- استنتاج الصيغة الرياضية المعبرة عن تعقيد تنفيذ هذه الخوارزمية وتوصيفها.

4. الدراسات السابقة

- دراسة Tina Zengshan, Li Zhe, Zhou Mu, and Yang Xiaobo (2015) تناولت اقتراح خوارزمية كشف (M-Algorithm) تعتمد على الكاشف الأمثل لأنظمة التعديل

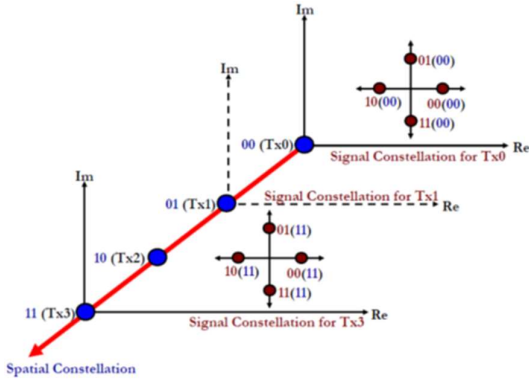
يؤدي توظيف تقنية تعدد المداخل والمخارج، والمسماة (MIMO) Multiple Input Multiple Output، والتي سنطلق عليها تجاوزاً الأنظمة متعددة الهوائيات في أنظمة الاتصالات اللاسلكية إلى زيادة خطية في معدل الإرسال [4,11,13] من خلال استخدام تقنية التضمين الفراغي Spatial Multiplexing، وهذه الزيادة تتناسب مع العدد الأصغر من أعداد الهوائيات في المرسل والمستقبل [11,13]، وكذلك تؤدي الأنظمة المتعددة الهوائيات إلى تحسين الوثوقية [4] من خلال استخدام تقنية التنوع diversity، وذلك بسبب تحسن نسبة الإشارة إلى الضجيج، وبالتالي زيادة مجال التغطية في أنظمة الاتصالات الخلوية [13]، ويمكن لأنظمة الاتصالات اللاسلكية متعددة الهوائيات أن تعطي تحسناً إضافياً عند إجراء التكيف المناسب لإشارة الإرسال من خلال استخدام تقنية تشكيل الحزمة Beam forming، وذلك بشرط توفر معلومات عن حالة القناة عند المرسل Channel State Information Transmitter (CSIT) [11].

تستفيد أنظمة الاتصالات اللاسلكية متعددة المداخل والمخارج من تعدد الهوائيات في كل من طرفي الاتصال المرسل والمستقبل، والمبدأ الأساسي لـ MIMO هو أن الإشارات المرسل من كل هوائيات الإرسال، يتم استقبالها على كل هوائي استقبال، فيتم بذلك تقليل احتمال حدوث الخفوت العميق، مما يؤدي إلى تقليل احتمال انقطاع الخدمة outage probability، وبالتالي يتحسن الأداء وفق معدل الخطأ Bit Error Rate (BER)، أو وفق معدل نقل المعطيات، وذلك طبقاً للتقنية المتبعة في توظيف تعدد الهوائيات.

2. مشكلة الدراسة

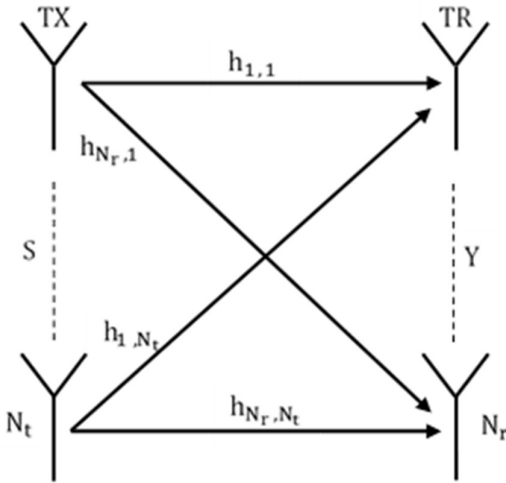
في أنظمة MIMO، إحدى التقنيات الحديثة المتبعة لزيادة الفعالية الطيفية وتقليل التعقيد في المرسل والمستقبل هي تقنية التعديل الفراغي Spatial Modulation (SM)، ويعتبر كاشف الأرجحية العظمى (ML) من الكواشف الأمثلية المستخدمة في الكشف في تقنية التعديل الفراغي، إلا

(1) نرسل خانة واحدة ونستقبل خانتين أما في الشكل (2) فإننا نرسل خانتين ونستقبل أربع خانات، فقط مطلوب من المستقبل أن يكشف رقم الهوائي المرسل للرمز المستقبل. توجد عدة خوارزميات كشف تُستخدم في هذه التقنية.



الشكل 2: مبدأ التعديل الفراغي لأربعة هوائيات ارسال [9]

يبين الشكل (3) نموذج القناة في أنظمة الـ MIMO والمؤلف من N_t مرسل و N_r مستقبل كما يلي:



الشكل 3: نموذج القناة في أنظمة الـ MIMO

(المصدر: إعداد الباحث)

بفرض أن القناة مسطحة عندئذ يُعبر عن علاقة شعاع الرموز المستقبلية بالصيغة الرياضية الآتية [8, 12, 15]:

$$y = Hx + n = Hs + n \quad (1)$$

حيث y : شعاع الرموز المستقبلية ذو الأبعاد $1 \times N_r$ ، H : هي مصفوفة القناة ذات الأبعاد $N_r \times N_t$ وتعطى بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$H = \begin{pmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \dots & h_{N_r,N_t} \end{pmatrix}$$

x : تمثل الشعاع المرسل ذو الأبعاد $1 \times N_t$ حيث يحتوي على رموز من مخطط الكوكبة (التوضيح) للتعديل الرقمي المستخدم، n : شعاع الضجيج الأبيض AWGN ذو الأبعاد $1 \times N_r$ ، S : شعاع الرموز المرسله ذو الأبعاد

الفراغي، طُبقت الدراسة على أنظمة التعديل الرقمية QPSK, 16QAM, 64QAM [12].

ب- دراسة Zhang Xinhe, Zhang Yuehua, Liu Chang, and Jia Hanzhong (2018) تناولت اقتراح خوارزمية كشف Modified Beam Search (MBS)، طُبقت الدراسة على أنظمة التعديل الرقمية 16QAM, 64QAM [14].

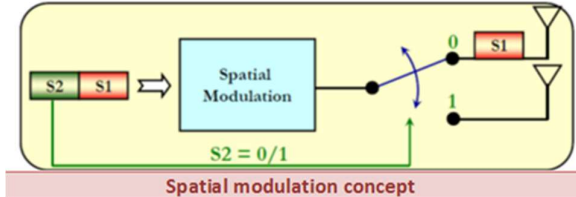
ت- دراسة Mohammad Bakkar (2020) تناولت اقتراح خوارزمية كشف جديدة (LC) لأنظمة التعديل الفراغي خاصة بأنظمة التعديل الرقمي (M-PSK) [1].

5. هيكلية الدراسة

تم تقسيم هذه الدراسة إلى أربعة مباحث، تناول المبحث الأول دراسة نظام التعديل الفراغي، بينما يتطرق المبحث الثاني إلى تقنيات الكشف في أنظمة التعديل الفراغي، المبحث الثالث تناول تحليل التعقيد الحسابي لتقنيات الكشف في أنظمة التعديل الفراغي، أخيراً تناول المبحث الرابع حساب معدل الخطأ لكل من خوارزمية ML, LC-QAM للأنظمة ذات التعديل الرقمي M-QAM.

5.1 المبحث الأول- دراسة نظام التعديل الفراغي Spatial Modulation

يقوم التعديل الفراغي بتفعيل هوائي إرسال وحيد في كل لحظة إرسال، وذلك بحسب معلومات المدخل، وبوضوح أكثر فإن تسلسل بثات المعلومات المرسله مرتبط برقم الهوائي، ويتم الاستفادة من استقلال قنوات القنوات المرتبطة بهوائيات الإرسال، وكمثال عليها نذكر مثلاً التعديل بإزاحة المكان (Space Shift Keying) (SSK) [2,10]. وعلى الرغم من أن الخرج (الفعالية الطيفية) يزداد فقط لغايتها مع عدد هوائيات الإرسال [7,13]، فإن التعديل الفراغي قادر على خفض تعقيد كل من المرسل والمستقبل. وكذلك الوصول إلى فعالية طيفية عالية بمساعدة عدد كبير وكافي من الهوائيات [5-7,13]. يمثل الشكلين (1) و (2) توضيحاً لمبدأ التعديل الفراغي [9].



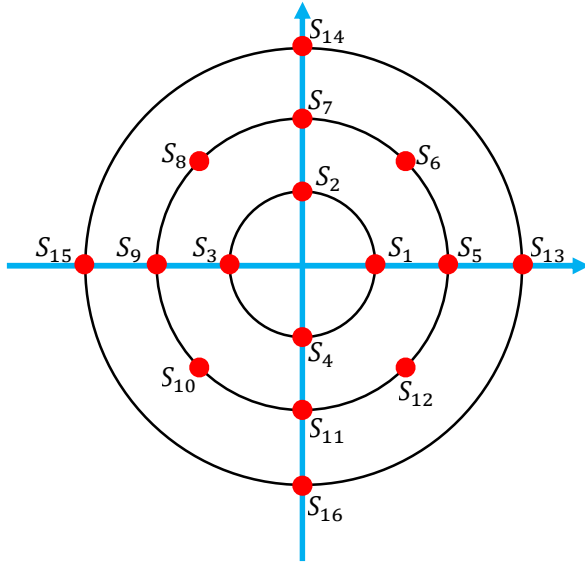
الشكل 1: مبدأ التعديل الفراغي لهوائيين في المرسل [9]

من الشكل (1) والذي يُعبر عن التعديل BPSK بحيث نتعامل مع خانتين متعاقبتين من تسلسل معطيات الدخل، الخانة الأولى تحدد رقم الهوائي الذي سوف تُرسل عليه الخانة الثانية، فمثلاً إذا كانت قيمة الخانة الأولى هي (0) تُرسل قيمة الخانة الثانية (0) أو (1) على الهوائي الأول، أما إذا كانت قيمة الخانة الأولى هي (1) تُرسل قيمة الخانة الثانية (0) أو (1) على الهوائي الثاني.

من الشكل (2) والذي يُعبر عن التعديل QPSK بحيث نتعامل مع أربع خانات متعاقبة من تسلسل معطيات الدخل، الخانات الأولى والثانية تحدد رقم الهوائي الذي سوف تُرسل عليه الخانات الثالثة والرابعة، فمثلاً إذا كانت الخانات الأولى والثانية هي (00) تُرسل الخانات الثالثة والرابعة على الهوائي الأول، وإذا كانت الخانات الأولى والثانية هي (01) تُرسل الخانات الثالثة والرابعة على الهوائي الثاني، وإذا كانت الخانات الأولى والثانية هي (10) تُرسل الخانات الثالثة والرابعة على الهوائي الثالث، وإذا كانت الخانات الأولى والثانية هي (11) تُرسل الخانات الثالثة والرابعة على الهوائي الرابع، وبالتالي في كل لحظة زمنية تُرسل المعطيات فقط على هوائي واحد وتبقى الهوائيات الأخرى بدون إرسال. نلاحظ أن هذه التقنية تحقق فعالية طيفية لنظام الاتصال وخاصة عند زيادة عدد هوائيات الإرسال. فمثلاً في الشكل

5.2.2 اقتراح خوارزمية كشف جديدة نو تعقيد حسابي منخفض (LC-QAM) Low Complexity Detection Algorithm بالاعتماد على كاشف الأرجحية العظمى (ML) للأنظمة (M-QAM)

تقترح هذه الخوارزمية وضع نقاط مخطط التوضع للأنظمة (M-QAM) في عدة طبقات عوضاً عن طبقة واحدة كما هو في الأنظمة (M-PSK)، يبين الشكل (4) مخطط التوضع ذو الطبقات للنظام 16QAM مبيّن عليه توزع الرموز على الطبقات، وكذلك يبين الجدول (1) التمثيل العنقدي للرموز:



الشكل 4: توزع الرموز على الطبقات للنظام 16QAM

الجدول 1: التمثيل العنقدي والقيم الرقمية المقابلة للرموز لنظام 16QAM

| الرموز | القيم الرقمية | التمثيل العنقدي للرموز |
|----------|---------------|------------------------|
| S_1 | 0000 | 0.5 |
| S_2 | 0001 | $0.5i$ |
| S_3 | 0010 | -0.5 |
| S_4 | 0011 | $-0.5i$ |
| S_5 | 0100 | 1 |
| S_6 | 0101 | $0.7071 + 0.7071i$ |
| S_7 | 0110 | i |
| S_8 | 0111 | $-0.7071 + 0.7071i$ |
| S_9 | 1000 | -1 |
| S_{10} | 1001 | $-0.7071 - 0.7071i$ |
| S_{11} | 1010 | $-i$ |
| S_{12} | 1011 | $0.7071 - 0.7071i$ |
| S_{13} | 1100 | 1.5 |
| S_{14} | 1101 | $1.5i$ |
| S_{15} | 1110 | -1.5 |
| S_{16} | 1111 | $-1.5i$ |

من العلاقة الرياضية (5) نكتب ما يلي:

$S \in N_t \times 1$ وقيمته هي من مجموعة رموز التعديل الرقمي $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ ، حيث M : رتبة التعديل الرقمي المستخدم.

في أنظمة التعديل الفراغي يكون مرسل وحيد فعال في حالة كل عملية إرسال وبالتالي يمكن التعبير عن العلاقة الرياضية (1) بالصيغة الآتية [8,12,15]:

$$y = h_i s + n \quad (2)$$

حيث h_i : العمود i في مصفوفة القناة H والذي يُعبّر عن رقم الهوائي الفعال في الإرسال.

5.2 المبحث الثاني- تقنيات الكشف في أنظمة التعديل الفراغي:

تتمتع أنظمة التعديل الفراغي بفعالية طيفية كبيرة وخاصة عند زيادة عدد هوائيات الإرسال، لأننا نقوم بتقسيم قطار المعطيات الرقمية في دخل المرسل إلى بلوكات من المعطيات بعدد خانوات متساوية، يعتمد طول كل بلوك على رتبة التعديل الرقمي وعدد هوائيات الإرسال ويعطى طول كل بلوك معطيات وفق العلاقة الآتية [3,7,14]:

$$r = \log_2 N_t + \log_2 M \quad (\text{bits}) \quad (3)$$

حيث r : عدد خانوات كل بلوك معطيات ويُعبّر عنها أيضاً بعدد الخانات المنقولة في قناة الاتصال (bpcu) bits per channel use، N_t : عدد هوائيات الإرسال، M : رتبة التعديل الرقمي، تستخدم عدد الخانات الأولى $\log_2 N_t$ لتحديد رقم الهوائي الذي سيتم إرسال الرمز عليه، أما الخانات الثانية $\log_2 M$ فتستخدم لتحديد الرمز (من مخطط كوكبة الرموز) الذي سيتم إرساله على الهوائي الفعال. بعد تشكيل بلوك المعطيات نقوم بإرسال الرمز المحدد بالمقطع الثاني من بلوك المعطيات على رقم الهوائي المحدد في المقطع الأول من نفس بلوك المعطيات في جهة المرسل، في جهة الاستقبال يتم كشف جزء المعطيات المرسل لكل بلوك والجزء الآخر من نفس البلوك والذي لم يرسل أصلاً يتم كشفه والذي يُعبّر عن رقم الهوائي الفعال في المرسل.

5.2.1 كاشف الأرجحية العظمى (ML) Maximum Likelihood

يُعدّ كاشف الأرجحية العظمى من الكواشف الفعالة في عملية الكشف، إلا أنه يعتبر من الكواشف الذي له تعقيد حسابي كبير، ويعطى بالعلاقة الرياضية الآتية [15]:

$$\hat{s} = \arg \min \|Y - HS\|_F^2 \quad (4)$$

في أنظمة التعديل الفراغي تستبدل H بـ h_i حيث h_i تمثل ثوابت القناة في العمود i في المصفوفة H والتي تُعبّر عن ثوابت القناة بين هوائي الإرسال الفعال i (رقم الهوائي الذي يتم عليه إرسال الرموز) وكافة هوائيات الاستقبال F : هو تنظيم فروبينوس Frobenius norm، كذلك تستبدل Y بـ y لأنها تتغير ببعيد وحيد في أنظمة التعديل الفراغي خلال فترة الاستقبال وبالتالي y هو شعاع، أما Y فهو مصفوفة ببعدين كل بعد أكبر من واحد.

كذلك في أنظمة التعديل الفراغي المطلوب كشف رقم الهوائي الفعال مع الرمز المرسل عليه بحيث تصبح العلاقة (4) بالشكل الآتي [15]:

$$[\hat{i}, \hat{s}] = \arg \min_{i,s} (\|y - h_i s\|_F^2) \quad (5)$$

$$[\hat{i}, \hat{s}] = \arg \min_{i,s} \left\{ \sum_{j=1}^{N_r} |y_j - h_{j,i} s|^2 \right\} \quad (6)$$

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_l^2 - 2\Re(\tilde{\mathbf{y}}_i(s(\hat{\phi}))^*) \right) \quad \text{حيث } J_{i,l} \text{ نحسب } \quad - \quad [\hat{l}, \hat{s}] = \arg \min_{i,s} (\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s\|_F^2) = \arg \min_i \left(\min_s (\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s\|_F^2) \right) \quad (7)$$

End for l -

End for i -

من العلاقة الرياضية (7) نكتب ما يلي:

$$\hat{s}_i = \arg \min_s (\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s\|_F^2)$$

مثال: ليكن لدينا نظام 2×2 MIMO يستخدم تقنية الإرسال بالتعديل الفراغي لرموز مُعدّلة رقمياً 16QAM ويفرض أن البوك المراد إرساله هو: $q_t = [11010]$ ، وكانت ثوابت القناة H كما يلي:

$$H = \begin{pmatrix} 0.85 + 0.03i & 0.39 + 0.22i \\ -0.72 - 0.05i & -1.32 + 0.13i \end{pmatrix}$$

المطلوب كشف التسلسل المرسل في جهة المستقبل باستخدام خوارزمية LC - QAM علماً أن channel state information (CSI) معروفة عند المستقبل؟

الحل: تطبق الخوارزمية LC - QAM على النظام 2×2 MIMO - SM لرموز معدّلة رقمياً 16QAM ويفرض أن البوك المراد إرساله هو: $q_t = [11010]$ ، وكانت ثوابت القناة H كما يلي:

$$H = \begin{pmatrix} 0.85 + 0.03i & 0.39 + 0.22i \\ -0.72 - 0.05i & -1.32 + 0.13i \end{pmatrix}$$

من البوك المراد إرساله وهو: $q_t = [11010]$ ، نلاحظ أن أول خانة هي (1) تحدد أن الهوائي الثاني هو الهوائي الفعّال للإرسال وأن الخانات (1010) تحدد الرمز المرسل وهو الرمز s_6 للتعديل 16QAM، عندئذ الإشارة المستقبلية تُكتب:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_i s = h_2 s_6 \Rightarrow \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.39 + 0.22i \\ -1.32 + 0.13i \end{pmatrix} \times (0.7071 + 0.7071i)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.120 + 0.431i \\ -1.025 - 0.841i \end{pmatrix}$$

For $i = 1:2$ -

نحسب $\tilde{\mathbf{y}}_i$ من خلال العلاقة:

$$\tilde{\mathbf{y}}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_i\|_F^2$$

من أجل $i = 1$ يكون:

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 = (0.85 - 0.03i \quad -0.72 + 0.05i) \times \begin{pmatrix} 0.120 + 0.431i \\ -1.025 - 0.841i \end{pmatrix} / (|0.85 + 0.03i|^2 + |-0.72 - 0.05i|^2)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 = (0.895 + 0.917i) / 1.244$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_1 = (0.719 + 0.737i)$$

For $l = 1:3$ -

من أجل $l = 1$

نحسب $\hat{\phi}_1$ من العلاقة (9):

$$[\hat{\phi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\phi}_1}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث: $\tilde{\mathbf{y}}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_i\|_F^2$ ، وهو يُعبّر عن الرمز المستقبل والمرسل من الهوائي ذو الرقم i ، $\mathbf{h}_i^H = (\mathbf{h}_i^*)^T$ هي المصفوفة الهرميتية وهي منقول مرافق المصفوفة \mathbf{h}_i ، ويمكن أيضاً كتابته بالصيغة الرياضية الآتية: $\tilde{\mathbf{y}}_i = r_l e^{j\theta_i}$ ، حيث: r_l طول الرمز في الطبقة l ، نقوم أولاً بحساب الزاوية θ_i ، بفرض $\psi_{\hat{\phi}} = \theta_i / (2\pi/M)$ حيث: $\psi_{\hat{\phi}}$ تمثّل رقم حقيقي، M : عدد الرموز في الطبقة الواحدة، نقوم بتدوير $\psi_{\hat{\phi}}$ إلى أقرب رقم صحيح من خلال استخدام التابع في الماتلاب $\text{round}(\psi_{\hat{\phi}})$ ، أيضاً نستخدم التابع الاتي $\text{mod}(x, y)$ والذي يعطي قيمة باقي القسمة فمثلاً: $(\text{mod}(5,8) = 5, \text{mod}(7,8) = 7, \text{mod}(8,8) = 0)$ وبالتالي يمكن تقدير زاوية الرمز $\hat{\phi}$ كما يلي:

$$[\hat{\phi}] = \text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\phi}}), M) \times \frac{2\pi}{M} \quad (9)$$

بعد تقدير الزاوية $\hat{\phi}$ و استناداً إلى العلاقة (7) نقدّر رقم الهوائي الفعّال كما يلي:

$$[\hat{l}] = \arg \min_i (\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s(\hat{\phi})\|_F^2) \quad (10)$$

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s(\hat{\phi})\|_F^2 = \|\mathbf{y}\|_F^2 + \|\mathbf{h}_i\|_F^2 |s(\hat{\phi})|^2 - 2\Re(\mathbf{h}_i^H \mathbf{y} s(\hat{\phi})^*)$$

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s(\hat{\phi})\|_F^2 = \|\mathbf{y}\|_F^2 + r_l^2 \|\mathbf{h}_i\|_F^2 - 2\|\mathbf{h}_i\|_F^2 \Re(\tilde{\mathbf{y}}_i(s(\hat{\phi}))^*)$$

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i s(\hat{\phi})\|_F^2 = \|\mathbf{y}\|_F^2 + \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_l^2 - 2\Re(\tilde{\mathbf{y}}_i(s(\hat{\phi}))^*) \right) \quad (11)$$

من العلاقات الرياضية (10)، (11) نكتب ما يلي:

$$[\hat{l}] = \arg \min_i \left(\|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_l^2 - 2\Re(\tilde{\mathbf{y}}_i(s(\hat{\phi}))^*) \right) \right)$$

حيث r_l : طول الرمز في الطبقة l في مخطط التوضع للأنظمة M-QAM.

تسلسل حساب خوارزمية LC-QAM للأنظمة SM ذات التعديل الرقمي M-QAM:

For $i = 1:N_t$ -

أحسب $\tilde{\mathbf{y}}_i$ من خلال العلاقة $\tilde{\mathbf{y}}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_i\|_F^2$ -

For $l = 1:L$ مسح كل الطبقات في مخطط التوضع -

باستخدام العلاقة (9) نحسب $\hat{\phi}_i$ -

باستخدام $\hat{\phi}_i$ والجداول (1) لحساب r_l نحسب الرموز المرسل $s(\hat{\phi}_i) = r_l e^{j\hat{\phi}_i}$

$$J_{1,2} = -0.589$$

- من أجل 3 l

- نحسب $\hat{\varphi}_1$ من العلاقة (9):

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\varphi}_1}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث M هي عدد الرموز في الطبقة الثالثة،
نحسب θ_1 كما يلي:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_1)}{\Re(\tilde{y}_1)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.737}{0.719} \right) = 45.7^\circ \Rightarrow \psi_{\hat{\varphi}_1} = \frac{45.7^\circ}{\left(\frac{360}{4} \right)} = 0.5077$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(0.5077), 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(1, 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(1 \times \frac{2\pi}{4} \right) = 90^\circ$$

$$[\hat{\varphi}_1] = 90^\circ \Rightarrow s(90^\circ) = s_{14}(\hat{\varphi}_1) = 1.5i$$

- نحسب $J_{1,3}$ حيث:

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$

$$J_{1,3} = 1.244 \left((1.5)^2 - 2\Re((0.719 + 0.737i)(0 - 1.5i)) \right)$$

$$J_{1,3} = 1.244(2.25 - 2(1.1055))$$

$$J_{1,3} = 0.0485$$

- End for l

- نحسب \tilde{y}_i من خلال العلاقة:

$$\tilde{y}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_i\|_F^2$$

من أجل $i = 2$ يكون:

$$\tilde{y}_2 = (0.39 - 0.22i - 1.32 - 0.13i) \times \frac{(0.120 + 0.431i)}{(-1.025 - 0.841i)} / (|0.39 + 0.22i|^2 + |-1.32 + 0.13i|^2)$$

$$\tilde{y}_2 = (1.38529 + 1.38506i) / 1.960$$

$$\tilde{y}_2 = 0.70678 + 0.70666i$$

- For $l = 1:3$

- من أجل 1 l

- نحسب $\hat{\varphi}_2$ من العلاقة (9):

حيث: $\psi_{\hat{\varphi}_1} = \theta_1 / (2\pi/M)$ ، M هي عدد الرموز في الطبقة الأولى ، نحسب θ_1 كما يلي:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_1)}{\Re(\tilde{y}_1)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.737}{0.719} \right) = 45.7^\circ \Rightarrow \psi_{\hat{\varphi}_1} = \frac{45.7^\circ}{\left(\frac{360}{4} \right)} = 0.5077$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(0.5077), 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(1, 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(1 \times \frac{2\pi}{4} \right) = 90^\circ$$

$$[\hat{\varphi}_1] = 90^\circ \Rightarrow s(90^\circ) = s_2(\hat{\varphi}_1) = 0.5i$$

- نحسب $J_{1,1}$ حيث:

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$

$$J_{1,1} = 1.244 \left((0.5)^2 - 2\Re((0.719 + 0.737i)(0 - 0.5i)) \right)$$

$$J_{1,1} = 1.244(0.25 - 2(0.3685))$$

$$J_{1,1} = -0.606$$

- من أجل 2 l

- نحسب $\hat{\varphi}_1$ من العلاقة (9):

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\varphi}_1}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث M هي عدد الرموز في الطبقة الثانية،
نحسب θ_1 كما يلي:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_1)}{\Re(\tilde{y}_1)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.737}{0.719} \right) = 45.7^\circ \Rightarrow \psi_{\hat{\varphi}_1} = \frac{45.7^\circ}{\left(\frac{360}{8} \right)} = 1.015$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(\text{round}(1.015), 8) \times \frac{2\pi}{8} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(\text{mod}(2, 8) \times \frac{2\pi}{8} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_1] = \left(2 \times \frac{2\pi}{8} \right) = 90^\circ$$

$$[\hat{\varphi}_1] = 90^\circ \Rightarrow s(90^\circ) = s_7(\hat{\varphi}_1) = i$$

- نحسب $J_{1,2}$ حيث:

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$

$$J_{1,2} = 1.244 \left((1)^2 - 2\Re((0.719 + 0.737i)(0 - i)) \right)$$

$$J_{1,2} = 1.244(1 - 2(0.737))$$

$$J_{2,2} = 1.960 \left((1)^2 - 2\Re((0.70678 + 0.70666i)(0.7071 - 0.7071i)) \right)$$

$$J_{2,2} = 1.960(1 - 2(0.999))$$

$$J_{2,2} = -1.956$$

- من أجل 3 l

- نحسب $\hat{\varphi}_2$ من العلاقة (9):

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\varphi}_2}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث $\psi_{\hat{\varphi}_2} = \theta_2 / (2\pi/M)$ ، M هي عدد الرموز في الطبقة الثالثة، نحسب θ_2 كما يلي:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_2)}{\Re(\tilde{y}_2)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.70666}{0.70678} \right) = 44.99^\circ \Rightarrow$$

$$\psi_{\hat{\varphi}_2} = \frac{44.99^\circ}{\left(\frac{360}{4}\right)} = 0.499$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(0.499), 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(0,4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(0 \times \frac{2\pi}{4} \right) = 0^0$$

$$[\hat{\varphi}_2] = 0^0 \Rightarrow s(0^0) = s_{13}(\hat{\varphi}_2) = 1.5 + 0i$$

- نحسب $J_{2,3}$ حيث:

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$

$$J_{2,3} = 1.960 \left((1.5)^2 - 2\Re((0.70678 + 0.70666i)(1.5 - 0i)) \right)$$

$$J_{2,3} = 1.960(2.25 - 2(1.06017))$$

$$J_{2,3} = 0.254$$

- End for l

- End for i

- أوجد القيمة الصغرى لـ $J_{i,l}$ ثم استنتج كلاً من $\hat{\varphi}_i$ ، \hat{s}_i ، مما سبق نجد أن القيمة الصغرى هي $J_{i,l}$ هي:

$$\arg \min_{i,l} (J_{i,l}) = \arg \min_{i,l} (J_{1,1}, J_{1,2}, J_{1,3}, J_{2,1}, J_{2,2}, J_{2,3})$$

$$\arg \min_{i,l} (J_{i,l}) =$$

$$\arg \min_{i,l} (-0.606, -0.589, 0.0485, -0.895, -1.956, 0.254)$$

$$\arg \min_{i,l} (J_{i,l}) = -1.956 = J_{2,2}$$

ومنه نستنتج كلاً من $\hat{\varphi}_2$ ، $\hat{s}_2 = s_6 = 0.7071 + 0.7071i$ ، وبالتالي يكون البلوك المستقبل هو: $q_r = [11010]$.

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\varphi}_2}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث $\psi_{\hat{\varphi}_2} = \theta_2 / (2\pi/M)$ ، M هي عدد الرموز في الطبقة الأولى، نحسب θ_2 كما يلي:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_2)}{\Re(\tilde{y}_2)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.70666}{0.70678} \right) = 44.99^\circ \Rightarrow$$

$$\psi_{\hat{\varphi}_2} = \frac{44.99^\circ}{\left(\frac{360}{4}\right)} = 0.499$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(0.499), 4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(0,4) \times \frac{2\pi}{4} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(0 \times \frac{2\pi}{4} \right) = 0^0$$

$$[\hat{\varphi}_2] = 0^0 \Rightarrow s(0^0) = s_1(\hat{\varphi}_2) = 0.5 + 0i$$

- نحسب $J_{2,1}$ حيث:

$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$

$$J_{2,1} = 1.960 \left((0.5)^2 - 2\Re((0.70678 + 0.70666i)(0.5 - 0i)) \right)$$

$$J_{2,1} = 1.960(0.25 - 2(0.35339))$$

$$J_{2,1} = -0.895$$

- من أجل 2 l

- نحسب $\hat{\varphi}_2$ من العلاقة (9):

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(\psi_{\hat{\varphi}_2}), M) \times \frac{2\pi}{M} \right)$$

حيث $\psi_{\hat{\varphi}_2} = \theta_2 / (2\pi/M)$ ، M هي عدد الرموز في الطبقة الثانية، نحسب θ_2 كما يلي:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\Im(\tilde{y}_2)}{\Re(\tilde{y}_2)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.70666}{0.70678} \right) = 44.99^\circ \Rightarrow$$

$$\psi_{\hat{\varphi}_2} = \frac{44.99^\circ}{\left(\frac{360}{8}\right)} = 0.999$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(\text{round}(0.999), 8) \times \frac{2\pi}{8} \right)$$

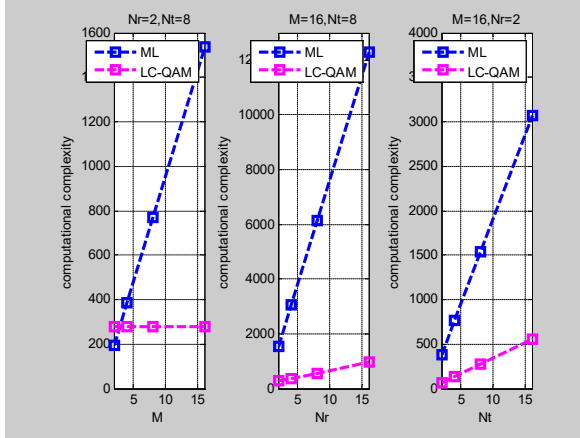
$$[\hat{\varphi}_2] = \left(\text{mod}(1,8) \times \frac{2\pi}{8} \right)$$

$$[\hat{\varphi}_2] = \left(1 \times \frac{2\pi}{8} \right) = 45^0$$

$$[\hat{\varphi}_2] = 45^0 \Rightarrow s(45^0) = s_6(\hat{\varphi}_2) = 0.7071 + 0.7071i$$

- نحسب $J_{2,2}$ حيث:

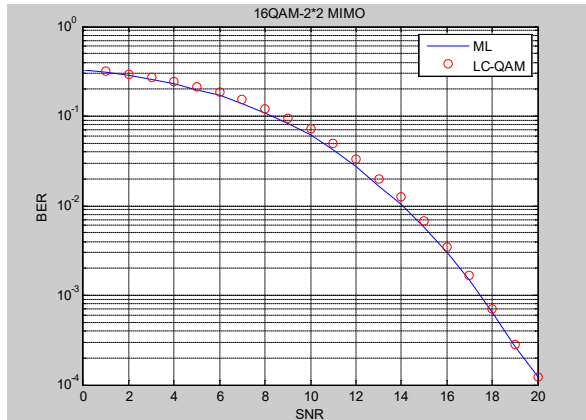
$$J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 \left(r_i^2 - 2\Re(\tilde{y}_i(s(\hat{\varphi}))^*) \right)$$



الشكل 5: التعقيد الحسابي لتنفيذ الخوارزميتين ML ، LC-QAM للنظام 16QAM

5.4 المبحث الرابع- حساب معدل الخطأ لكل من الخوارزميتين ML ، LC-QAM للأنظمة SM ذات التعديل الرقمي M-QAM

تم التحقق من أداء الخوارزمية LC-QAM على أنظمة التعديل الرقمية 16QAM باستخدام البارامترات: $N_r = 2, N_t = 2$ في قناة خفوت رايلي المسطحة والمقارنة مع أداء الخوارزمية ML حيث تم حساب معدل خطأ BER مع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR كما هو مبين بالشكل (6):



الشكل 6: منحنى الأداء لكلا الخوارزميتين ML ، LC-QAM للنظام 2*2 MIMO – 16QAM

6. مناقشة النتائج

تشير نتائج الدراسة والمحاكاة لكلا الخوارزميتين ML ، LC-QAM المطبقة على النظام MIMO-SM وذلك باستخدام برنامج Matlab إلى النتائج الآتية:

- بينت النتائج أن الخوارزمية LC-QAM أقل تعقيداً من الخوارزمية ML بشكل كبير من حيث عدد العمليات الحسابية لتنفيذ كل خوارزمية.
- بينت النتائج أن الخوارزمية ML يزداد تعقيد تنفيذها الحسابية بزيادة رتبة التعديل الرقمي M وفق العلاقة الرياضية

5.3 المبحث الثالث- تحليل التعقيد الحسابي لتقنيات الكشف في أنظمة التعديل الفراغي:

5.3.1 كاشف الأرجحية العظمى (ML) Maximum Likelihood:

نلاحظ من العلاقة الرياضية (5): $\hat{i}, \hat{s} = \arg \min_{i,s} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s}\|_F^2$ أن عملية البحث في فضاء $N_t M$ بسبب تغيرات i والتي تُعتبر عن N_t و s تُعتبر M ، أما حساب عمليات الضرب لحساب القيمة $\mathbf{h}_i \mathbf{s}$ هو جداء عددين عقديين يتطلب لحسابه أربع عمليات ضرب وبما أن \mathbf{h}_i هي عمود واحد بعدد أسطر قدرها N_r وبالتالي يكون عدد عمليات الضرب الحسابية المطلوبة لحساب $\mathbf{h}_i \mathbf{s}$ هو $4N_r$ ، من جهة أخرى يمكن كتابة $\mathbf{y} = \mathcal{R}(\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s}) + j\mathcal{I}(\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s})$ نلاحظ من هذه العلاقة الرياضية لحساب الجزء الحقيقي والجزء التخيلي نحتاج إلى عمليتين ضرب ، وبما أن \mathbf{y} هي عمود واحد بعدد أسطر قدرها N_r وبالتالي يكون عدد عمليات الضرب الحسابية المطلوبة لحساب $\mathcal{R}(\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s}) + j\mathcal{I}(\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s})$ هو $4N_r + 2N_r = 6N_r$ وبالتالي يكون عدد عمليات الضرب الحسابية المطلوبة لحساب المقدار $\hat{i}, \hat{s} = \arg \min_{i,s} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i \mathbf{s}\|_F^2$ هو: $6N_r N_t M$.

5.3.2 الكاشف منخفض التعقيد (LC-QAM) للأنظمة (M-QAM):

من أجل i معروفة، يتم حساب $\tilde{\mathbf{y}}_i$ من العلاقة $\tilde{\mathbf{y}}_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_i\|_F^2$ ، حساب $\mathbf{h}_i^H \mathbf{y}$ كما يلي: $\mathbf{h}_i^H \mathbf{y} = (\mathcal{R}(\mathbf{h}_i^H \mathbf{y}) + j\mathcal{I}(\mathbf{h}_i^H \mathbf{y}))$ وبالتالي يحتاج لحسابه عدد عمليات ضرب حسابية مطلوبة قدرها $4N_r$ ، أيضاً لحساب $\|\mathbf{h}_i\|_F^2$ كما يلي: $\|\mathbf{h}_i\|_F^2 = \mathcal{R}(\mathbf{h}_i)^T \mathcal{R}(\mathbf{h}_i) + \mathcal{I}(\mathbf{h}_i)^T \mathcal{I}(\mathbf{h}_i)$ يحتاج عدد عمليات ضرب حسابية مطلوبة قدرها $2N_r$ وبالتالي يكون عدد عمليات الضرب الحسابية المطلوبة لحساب $\tilde{\mathbf{y}}_i$ كما يلي:

$$\tilde{\mathbf{y}}_i = \frac{\mathbf{h}_i^H \mathbf{y}}{\|\mathbf{h}_i\|_F^2} = \frac{1}{\|\mathbf{h}_i\|_F^2} \mathcal{R}(\mathbf{h}_i^H \mathbf{y}) + \frac{1}{\|\mathbf{h}_i\|_F^2} \mathcal{I}(\mathbf{h}_i^H \mathbf{y})$$

هو: $4N_r + 2N_r + 2 = 6N_r + 2$ من أجل L طبقة، نقوم من أجل كل طبقة بحساب $\hat{\phi}$ من أجل ذلك يتطلب حساب $\psi_{\hat{\phi}} = \theta_i * \psi_{\hat{\phi}}$ من العلاقة $\psi_{\hat{\phi}} = \frac{1}{(2\pi/M)}$ حيث تحتاج إلى عملية ضرب واحدة لأن i معروفة كما ذكرنا سابقاً، وبالتالي لحساب $\hat{\phi}$ من العلاقة (9) نحتاج إلى 3 عمليات ضرب، بعد حساب $\hat{\phi}$ نحسب $s(\hat{\phi})$ حيث لا تحتاج عملية حسابية أي عملية ضرب، بالإضافة إلى معرفة r_i^2 عند معرفة $s(\hat{\phi})$ بعد ذلك نحسب $J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 (r_i^2 - 2\mathcal{R}(\tilde{\mathbf{y}}_i (s(\hat{\phi}))^*))$ حيث نحتاج إلى 4 عمليات ضرب كما يلي: إن $\|\mathbf{h}_i\|_F^2$ محسوبة سابقاً لذلك يطلب حساب $\mathcal{R}(\tilde{\mathbf{y}}_i (s(\hat{\phi}))^*) = \mathcal{R}(\tilde{\mathbf{y}}_i) \mathcal{R}(s(\hat{\phi})) + \mathcal{I}(\tilde{\mathbf{y}}_i) \mathcal{I}(s(\hat{\phi}))$ تحتاج إلى 2 عملية ضرب وبالتالي: $J_{i,l} = \|\mathbf{h}_i\|_F^2 (r_i^2 - 2\mathcal{R}(\tilde{\mathbf{y}}_i (s(\hat{\phi}))^*))$ يحتاج إلى 4 عمليات ضرب، وبالتالي يكون عدد عمليات الضرب لتنفيذ الخوارزمية LC-QAM للأنظمة M-QAM هو:

$$(6N_r + 2 + (3 + 4)L)N_t = (6N_r + 2 + 7L)N_t$$

من أجل البارامترات الآتية: $N_r = 2, 4, 8, 16; N_t = 2, 4, 8, 16; M = 2, 4, 8, 16$ بين الشكل (5) عمليات التعقيد الحسابية لتنفيذ الخوارزميتين ML ، LC-QAM.

- IEEE transactions on vehicular technology, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, July 2008.
- [8] RAJASHEKAR R., HARI K. V. S., and HANZO L. "Reduced-Complexity ML Detection and Capacity-Optimized Training for Spatial Modulation Systems", IEEE Transactions on Communications, pp. 1–14, January 2014.
- [9] RENZO D. R., HAAS H., and GHAYEB A. "spatial modulation for MIMO wireless systems", IEEE wireless communications and networking conference WCNC 2013, Shanghai, China, April 7-10-2013.
- [10] RENZO M. D., HAAS H., GHAYEB A., SUGIURA S., and HANZO L. "Spatial Modulation for Multiple-Antenna Communication", Wiley encyclopedia of the IEEE, pp. 1–26, 2015.
- [11] TELATAR, I. E. "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", European Transactions on Telecommunications, vol. 10, pp. 585–595, 1999.
- [12] TIAN T., LI Z., ZHOU M., and YANG X. "M-Algorithm-Based Optimal Detectors for Spatial Modulation", Journal of Communications Vol. 10, No. 4, pp. 245–251, April 2015.
- [13] YANG, D. "Closed-Loop Multiple Antenna Aided Wireless Communications Using Limited Feedback", A thesis for the degree of Doctor of Philosophy, University of Southampton, 192p, 2010.
- [14] ZHANG X., ZHANG Y., LIU C., and JIA H. "Low-Complexity Detection Algorithms for Spatial Modulation MIMO Systems", Hindawi, Journal of Electrical and Computer Engineering, pp. 1–7, November 2018.
- [15] ZHANG X., ZHAO G., LIU Q., ZHAO N., and JIN M. "Enhanced M-algorithm-based Maximum Likelihood Detectors for Spatial Modulation", Int. J. Electron. Communications. (AEÜ), pp. 1361–1367, 2016.
- في حين أن رتبة التعديل الرقمي M لا تؤثر إطلاقاً على زيادة التعقيد الحسابي لتنفيذ الخوارزمية LC-QAM وفق العلاقة الرياضية $(6N_r + 2 + 7L)N_t$.
- ت- تم إجراء محاكاة لكلا الخوارزميتين ML، LC-QAM وتم اختبارهما على النظام 2*2MIMO-SM، بينت النتائج أن معدل الخطأ لكلا الخوارزميتين متطابق مما يقودنا إلى استخدام الخوارزمية LC-QAM في الكشف الأمثل لأنظمة التعديل الفراغي MIMO-SM ذات التعديل الرقمي M-QAM.
- ### 7. التوصيات
- بناءً على النتائج التي تم التوصل إليها توصي الدراسة بالآتي:
- أ- توصي مخابر البحث العلمي المتخصصة بتقييم أداء هذه الخوارزمية بشكل عملي.
- ب- تطبيق الخوارزمية على أنظمة Massive MIMO المستخدمة في أنظمة الجيل الخامس (5G).
- ### المصادر
- [1] BAKKAR M. "Optimum detection for Multiple Input - Multiple Output systems in spatial modulation systems with M-PSK constellation", Damascus University Journal for Engineering Science, Accepted for publication, pp. 1–12, October 2020.
- [2] CHAU Y., and YU S. "Space modulation on wireless fading channels", IEEE Veh. Technol. Conf.-Fall, pp. 1668–1671, 2001.
- [3] DATTA T., and CHOCKALINGAM A. "On Generalized Spatial Modulation", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC): PHY, pp. 2753–2758, 2013.
- [4] HANZO L., ALAMRI O., EL-HAJJAR M., and WU N. "Near-Capacity Multi-Functional MIMO Systems: Sphere-Packing, Iterative Detection and Cooperation", John Wiley & Sons Ltd, 718p, 2009.
- [5] JEGANATHAN J., GHAYEB A., SZCZECINSKI L., and CERON A. "Space shift keying modulation for MIMO channels", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 7, pp. 3692–3703, July 2009.
- [6] MESLEH R. Y., HAAS H., AHN C. W., and YUN S. "Spatial modulation - a new low complexity spectral efficiency enhancing technique", in First International Conference on Communications and Networking in China, (Beijing), pp. 1–5, Oct. 2006.
- [7] MESLEH R. Y., HAAS H., SINANOVIC S., AHN C.W., and YUN S. " Spatial Modulation",

Optimum detection for Multiple Input - Multiple Output systems in spatial modulation systems with M-QAM constellation

Mohammad Bakkar^{1,*}

¹ Department of Communication Engineering , Faculty of Informatics Engineering , Ittihad Private University (IPU) , Damascus , Syria, E-mail: bakkarmb968@gmail.com

*Corresponding author : Mohammad Bakkar , E-mail: bakkarmb968@gmail.com

Published online: 31 December 2021

Abstract— This paper proposes a low complexity detection algorithm for M-QAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation) in Spatial Modulation (SM) systems. Mathematically, we analyzed the formula for the Maximum Likelihood (ML). The mathematical analysis result was employed with features M-QAM constellation diagram to estimate values of the transmitted symbols. Simulation results showed that the proposed algorithm has the same performance (BER) as the ML- detector and significant reduces computational complexity. The results of the Low-Complexity (LC-QAM) algorithm is presented and validated by simulations with MATLAB.

Keywords— spatial modulation (SM), constellation diagram (M-QAM), maximum likelihood (ML) , Low-Complexity , (LC-QAM) algorithm.