

دراسة تأثير الضجيج على تحسس الطيف في تقنية كاشف الطاقة ضمن أنظمة الراديو الإدراكي (المعرفي)

* رنيم نبيه سليمان

(تاريخ الإيداع 2022/11/16 . قُبِلَ للنشر في 2023/1/23)

□ ملخص □

تتيح أنظمة الراديو الإدراكي عن طريق تحسس الطيف اكتشاف النطاقات الترددية الغير مستخدمة، ومن ثم السماح لمستخدمين ثانويين (غير مرخص لهم) بالاستفادة من الموارد الطيفية المتاحة، بشرط عدم التداخل مع المستخدمين الأساسيين (المرخص لهم) ، و تعد هذه المرحلة إحدى التحديات الرئيسية في تقنية الراديو الإدراكي. يتم عادةً تقييم أداء هذه المرحلة بقدرتها على اكتشاف المستخدمين الأساسيين بالإضافة إلى تجنب إي إندازر خاطئ. يعد " كاشف الطاقة " أحد التقانات الأكثر استخداماً لتحسس الطيف، نظراً لما يتمتع به من درجة تعقيد منخفضة، إضافة لعدم حاجته لمعلومات مسبقة حول خصائص إشارة المستخدم الأساسي، إلا إن هذه التقنية تعتمد على عتبة كشف ثابتة لتحديد فيما إذا كان هناك إشارة مستخدم أساسي أم لا، و نظراً لأن استطاعة الضجيج غير ثابتة الأمر الذي ينتج عنه حساسية هذه التقنية لما يسمى "عدم اليقين بالضجيج" الذي بدوره سينعكس على أداء الكاشف. تم في هذا العمل دراسة أداء كاشف الطاقة القائم على عتبة ثابتة والتحدي الناتج عن حساسيته لعدم اليقين في الضجيج نظراً لأهمية هذا الموضوع عند العمل في البيئات ذات القيم المنخفضة لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR. تم استخدام البيئة البرمجية Matlab لتحصيل النتائج.

الكلمات المفتاحية: الراديو الإدراكي ، كاشف الطاقة، عدم اليقين بالضجيج، احتمال الكشف، احتمال الإنذار الخاطئ.

Study of Effect of noise in Energy Detection Spectrum Sensing Technique for Cognitive Radio Systems

Raneem nabieh suliman*

(Received 16/11/2022 . Accepted 23/1/2023)

□ ABSTRACT

Cognitive radio systems , by sensing the spectrum ,enable the detection of unused spectrum holes, and allow secondary users (unauthorized) to use them while avoiding interferences to the primary user (PU) (authorized). this stage is one of the most important challenges in cognitive radio technology. The performance of this stage is evaluated by its ability to detect primary users as well as to avoiding any false alarm.

Energy detection is one of the most used techniques for spectrum sensing due to its simplicity and applicability, as well as does not require any prior information about the characteristics of the primary user signal. However, on the other hand, this technique is based upon a fixed detection threshold to determine whether there is a primary user signal or not, due to the fact that the noise power is not stable and therefore the sensitivity of this technique to noise uncertainty which in turn will be reflected on the performance of the detector

This research discuss the performance of fixed threshold Energy detection and the challenge of its sensitivity to noise uncertainty due to the importance of this topic when working in environments with low SNR values.

Key Words: Cognitive Radio, Energy Detection , Noise Uncertainty, Probability of detection, Probability of false alarm.

*An Engineer with a master's degree in Communication Technology Engineering , Department of communication Technology, college of Information and communication Technology Engineering , Tartous University, Syria

1- مقدمة

يعد الطيف الراديوي مورد ثمين للغاية، إلا أن الطلب المتزايد على التطبيقات اللاسلكية واستخدام سياسة توزيع الطيف الثابت تسبب في الاستخدام الغير فعال للطيف والذي بدوره كان سبب لندرة الطيف، لذلك كانت الجهود الرامية إلى حل هذه المشكلة هو الانتقال من سياسات تخصيص الطيف الترددي الثابت الى منهجيات النفاذ الديناميكي للطيف، من خلال استخدام تقنية الراديو الإدراكي (المعرفي) .

يعد الراديو الإدراكي من أهم التقنيات الواعدة في الترويج لمفهوم النفاذ الديناميكي للطيف، حيث أن فكرة الراديو الإدراكي تقوم على أساس السماح لمستخدمين ثانويين (غير مرخص لهم باستخدام الطيف) باستخدام المجال الترددي المخصص للمستخدمين الأساسيين (ذو الترخيص)، على أن يكون هذا الاستخدام مبني على أساس عدم حدوث تداخل أو تشويش إضافة إلى احترام أولية النفاذ للمستخدمين الأساسيين لمجالهم الترددي في أي لحظة. [1]

تتمثل دورة العمل النموذجية للراديو الإدراكي (CR) (Cognitive Radio) ، على كشف المساحات البيضاء للطيف عن طريق مراقبة الحزم الترددية المتاحة والتقاط معلوماتها، ومن ثم اختيار أفضل نطاقات التردد وفق خصائص الطيف التي تم تحليلها ، وتنسيق النفاذ إلى الطيف مع المستخدمين الآخرين و تحرير التردد عند ظهور المستخدم الأساسي PU، يتم دعم هذه الدورة الإدراكية من خلال الوظائف التالية الموضحة بالشكل (1): [2]



CR يمثل دورة عمل الراديو الإدراكي 1: الشكل

إن اكتشاف الطيف الترددي المتاح والمقصود به "تحسس الطيف" له أهمية قصوى في كونه الخطوة الأولى في تنفيذ الراديو الإدراكي [3]. يوجد عدة تقنيات لتحسس الطيف إلا أن أحد أكثر الطرق شيوعاً لتحسس الطيف هي تقنية كاشف الطاقة . تعد هذه التقنية الأكثر رواجاً نظراً لبساطتها وقابليتها للتنفيذ ، فضلاً عن عدم حاجتها لمعلومات مسبقة عن إشارات المستخدمين الأساسيين. في معظم حالات هذه التقنية لا يتم توقع تزويد مستخدم الراديو الإدراكي بمعلومات مسبقة عن طبيعة إشارة المستخدم الأساسي التي قد تكون موجودة في نطاق ترددي معين، عليه تعد تقنية كاشف الطاقة هي أفضل خيار لتحسس الطيف [4]. يقوم مبدأ كاشف الطاقة التقليدي على أساس تقدير الطاقة المستقبلية ومقارنتها بعتبة محددة ثابتة تعتمد على تباين الضجيج، لتحديد فيما إذا كان هناك إشارة مستخدم أساسي أم لا، وتستند معظم الدراسات الخاصة بتقنية كاشف الطاقة على اعتبار أن استطاعة الضجيج ثابتة، أي لا يوجد حالة عدم يقين في الضجيج، إلا إن الضجيج عبارة عن تجميع من مصادر مختلفة مثل الضجيج الحراري، و التشويش من مرشحات الواجهة الأمامية، و تسرب الإشارات من النطاقات الأخرى و ضجيج التكميم وغيرها، لذلك يعد استخدام استطاعة ضجيج ثابتة أثناء فترة الكشف يعتبر نهج غير عملي. [5]

أي أن التحدي الأساسي لكاشف الطاقة التقليدي القائم على عتبة ثابتة هي حساسيته لعدم اليقين في الضجيج، و يمكن أن تؤدي التغيرات الصغيرة في استطاعة الضجيج إلى تغيرات حادة في أداء الكشف بسبب ما يسمى حائط نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNRWall (Signal to Noise Ratio wall).

2- هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة و توضيح تأثير عامل عدم اليقين بالضجيج على أداء كاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة.

3- طرائق البحث و مواده:

اعتمد هذا البحث على العديد من المراجع الحديثة و ذات الصلة بالموضوع وفيما يلي عرض لهذه الطرائق:

3-1- نموذج نظام تحسس الطيف باستخدام كاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة :

يتيح تحسس الطيف للمستخدمين الثانويين تقرير وجود أو عدم وجود المستخدم الأساسي في القناة الترددية المعنية بغرض كشف أية إشارات لمستخدمين أساسيين لمنع التداخل، وتحديد إمكانات استغلال الطيف المتاح. تتم ترجمة هذه المسألة رياضياً باستخدام مبدأ اختبار الفرضية الثنائية (Binary hypothesis testing). حيث تمثل الفرضية الصفرية (Null hypothesis) المشار لها بـ H_0 ، حالة عدم وجود إشارة المستخدم الأساسية في القناة الترددية المعنية، وتكون الإشارة المستقبلية هي فقط إشارة الضجيج. في حين تمثل الفرضية البديلة (Alternative hypothesis) المشار لها بـ H_1 ، حالة وجود إشارة المستخدم الأساسي في تلك القناة أي أن الإشارة المستقبلية تحتوي على إشارة المستخدم الأساسي بالإضافة إلى الضجيج. يمكن التعبير عن نموذج الإشارة المستقبلية في إطار هذين الافتراضين H_0 ، H_1 ، على النحو التالي: [6]

$$H_0: y(n) = w(n) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$H_1: y(n) = x(n) + w(n) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

حيث تمثل $y(n)$ الإشارة المستقبلية لدى المستخدم الثانوي في اللحظة n ، و $x(n)$ إشارة المستخدم الأساسي التي نعمل على كشفها، على اعتبار الكاشف غير متماسكو فنفرض أن هذه الإشارة عملية عشوائية ذات تباين σ_x^2 ، و $w(n)$ إشارة الضجيج الأبيض الغاوسي الجمعي AWGN ذو متوسط معدوم وانحراف معياري يساوي σ_w^2 . حيث نفرض إن عينات الضجيج مستقلة مثلي مثلي (iid) Independent and identically distributed، وأنه لا يوجد ترابط بين عينات الإشارة والضجيج و N عدد العينات المأخوذة خلال فترة التحسس من المجال الترددي المعين. نهتم عند كشف الإشارة بأخذ القرار بأنه تم تحصيل الإشارة المستقبلية y ضمن الفرضية H_0 أو H_1 ، ويتم هذا عادة عبر حساب ما يدعى باختبار الإحصائية (Test statistic) من عينات الإشارة المستقبلية $y(n)$ ، حيث يرمز لها بـ T . و لتتم عملية الكشف يجب مقارنة T مع عتبة محددة مسبقاً λ كما في المعادلة (3):

$$\begin{aligned} & \text{if } T \geq \lambda, H_1 \\ & \text{if } T < \lambda, H_0 \end{aligned} \quad (3)$$

أي في حال تجاوز T العتبة λ ، يتم تبني الفرضية H_1 على أنها الفرضية الصحيحة. أما في الحالة الأخرى $T < \lambda$ ، فيتم اعتبار أن الفرضية H_0 هي الصحيحة.

3-2- مقاييس الأداء في تقييم أداء كاشف الطاقة:

يوجد عاملين أساسيين يمكن استخدامهما لتقييم أداء كاشف الطاقة هما:

1. احتمال الكشف (Probability of detection): وهو احتمال أن يتم اختيار الفرضية البديلة H_1 ، أي أن

يكون $T > \lambda$ ، وذلك عندما تكون الفرضية الصحيحة هي الفرضية البديلة H_1 .

$$P_d = P(T > \lambda; H_1) \quad (4)$$

القيم العالية من احتمالات الكشف تعني أننا نحقق أحد أهداف الراديو الإدراكي (الوثوقية العالية) كونه سيتم في معظم الأوقات كشف تواجد المستخدمين الأساسيين في مجالاتهم الطيفية، وبالتالي نادرا ما سيقوم المستخدمون الثانويين بارتكاب خطأ و إعلان القناة فارغة بدلا من كونها مشغولة، ليقوموا بالتشويش على المستخدمين الأولين في قنواتهم الطيفية وبالتالي الحفاظ على مستوى حماية عال من التشويش.[7]

2. احتمال الإنذار الخاطئ (Probability of false alarm) وهو احتمال أن يتم اختيار الفرضية H_1 في

حين أن الفرضية الصحيحة هي الفرضية الصفرية H_0 .

$$P_{fa} = P(T > \lambda; H_0) \quad (5)$$

تشير القيم المنخفضة من احتمال إنذار خاطئ على الكفاءة العالية في استثمار الطيف، والذي هو الهدف الآخر لتقنية الراديو الإدراكي. أي أنه سيتم في أغلب الأحوال كشف تواجد الثقب الطيفية وبالتالي استثمار أغلب الفرص دون حدوث ضياعات كبيرة.[8]

بناء على ما سبق هناك مقايضة (Tradeoff) ما بين الكفاءة و الوثوقية. فمن المعادلة (4) لكي نحصل على احتمالية كشف عالية (وثوقية عالية) بحاجة لتخفيض قيمة العتبة λ ، بينما توضح المعادلة (5) أننا بحاجة لزيادة قيمة العتبة λ من أجل قيمة منخفضة لاحتمالية الإنذار الخاطئ (كفاءة عالية).

بالمحصلة، فإن عملية تصميم تقانات تحسس الطيف تأخذ دوما على عاتقها مهمة التوفيق ما بين الكفاءة و الوثوقية، أي اختيار القيمة الملائمة للعتبة، وذلك بناء على نوعية التطبيق المرغوب.[9]

3-3- معايير تصميم كاشف الطاقة:

تقوم عملية تصميم الكاشف على اختبار الإحصائية T وتحديد عتبة اتخاذ القرار λ . يقوم كاشف الطاقة في جوهره على مبدأ نيومان بيرسن [10] حيث يتخذ القرار بالفرضية H_1 في حال كان اختبار نسبة الأرجحية (Likelihood Ratio Test) يتجاوز عتبة معينة λ أي:

$$\frac{P(y|H_1)}{P(y|H_0)} > \lambda \quad (6)$$

وعلى اعتبار التوزيع الاحصائي للإشارة المستقبلية تحت الفرضية H_0 هو توزيع غاوسي بمتوسط صفري وتغاير σ_w^2 $y \sim N(0, \sigma_w^2)$ ، بينما تحت الفرضية H_1 سيكون كالتالي: $y \sim N(0, \sigma_w^2 + \sigma_x^2)$ ، حيث أن I مصفوفة واحدة، ومنه نستطيع أن نكتب:

$$\frac{P(y|H_1)}{P(y|H_0)} = \frac{\frac{1}{(2\pi(\sigma_w^2 + \sigma_x^2))^{\frac{N}{2}}} \exp[-\frac{1}{2(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)} \sum_{n=1}^N y^2[n]]}{\frac{1}{(2\pi\sigma_w^2)^{\frac{N}{2}}} \exp[-\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=1}^N y^2[n]}}$$

بأخذ اللوغاريتم:

$$\begin{aligned} &= \frac{N}{2} \ln \left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_x^2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_w^2 + \sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_w^2} \right) \sum_{n=1}^N y^2[n] \\ &= \frac{N}{2} \ln \left(\frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_x^2} \right) + \frac{1}{2} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)} \sum_{n=1}^N y^2[n] \end{aligned} \quad (7)$$

ومنه نجد بعد إجراءات بسيطة كما في [10] تبين أن الفرضية H_1 تكون محققة في حال تحقق الشرط التالي:

$$\sum_{n=1}^N y^2[n] > \lambda \quad (8)$$

بناء على ذلك يكون إحصائية القرار لكاشف الطاقة هي بحساب طاقة الإشارة المستقبلية ومقارنتها مع العتبة λ ، ويتوسط المعادلة (8) على عدد العينات N ، نحصل على الآتي:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y^2[n] > \lambda \quad (9)$$

ويمكن تقريب T وفقا لنظرية النهاية المركزية (CLT (central limitation Theorem) إلى التوزيع

الغاوسي، حيث يمكن كتابة التوزيع الاحصائي لها تحت كل من الفرضيات H_0 و H_1 كالاتي:

$$T \sim \text{Normal}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4) \quad \text{under } H_0 \quad (10)$$

$$T \sim \text{Normal}(N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), 2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2) \quad \text{under } H_1 \quad (11)$$

وكما ذكرنا يتم تقييم أداء الكشف لتقنية كاشف الطاقة من خلال احتمال الكشف P_d و احتمال الإنذار الخاطئ

P_{fa} ، وتُعطى العلاقة لكل منهما كالتالي: [11]

$$P_{fa} = P(T > \lambda | H_0) = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) = Q\left(\frac{\lambda - \sigma_w^2}{\sqrt{\frac{2}{N}}\sigma_w^2}\right) \quad (12)$$

$$P_d = P(T > \lambda | H_1) = Q\left(\frac{\lambda - N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}\right) = Q\left(\frac{\lambda - (\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{\frac{2}{N}}(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}\right)$$

$$= Q\left(\frac{\lambda - \sigma_w^2(1 + snr)}{\sqrt{\frac{2}{N}}\sigma_w^2(1 + snr)}\right) \quad (13)$$

حيث أن: σ_w^2 : تغاير إشارة الضجيج الأبيض الغوسي الجمعي AWGN.
 σ_x^2 : تغاير إشارة المستخدم الأساسي.
 λ : عتبة اتخاذ القرار.

N : عدد العينات المأخوذة خلال فترة التحسس من المجال الترددي المعين. Q - function $Q(x) =$

$$\text{SNR(dB)} = 10 \log(\text{snr}) ; \text{snr} = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2} ; \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] dy$$

بالنظر إلى متغيرات تحليل الأداء (أي احتمال الكشف P_d واحتمال الإنذار الخاطئ P_{fa}) يمكن استنتاج العلاقة بين

هذه المتغيرات ونسبة الإشارة إلى الضجيج SNR. ففي حال قمنا باستنتاج أقل عدد من العينات المطلوبة من قبل

الكاشف من المعادلتين (12)(13)، وعبر استنتاج قيمة العتبة من كلا المعادلتين و المساواة، فنستطيع أن نكتب: [11]

$$N_{min} = 2[Q^{-1}(P_{fa}) - Q^{-1}(P_d)(1 + snr)]^2 snr^{-2} \quad (14)$$

حيث أن $Q^{-1}(\cdot)$ هي Inverse Q function. ونجد أن N تابع لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR.

■ أيضا في عملية التصميم للكاشف بعد تحديد اختبار الإحصائية T ، يأتي العامل الأهم وهو تحديد عتبة

الكشف λ .

يُعد تحديد العتبة المثلى- أي القيمة المطلوبة لتلبية متطلبات أداء الكشف- أحد أهم التحديات التي تواجه تنفيذ تقنيات الكشف. ففي الظروف المثالية، يجب أن تكون قيمة احتمال الإنذار الخاطئ P_{fa} أقل ما يمكن، بينما قيمة احتمال الكشف أعلى ما يمكن.

يمكن استخدام مبدئين لتعيين عتبة كشف ثابتة [12] ، التصميم الأول يدعى معدل الإنذار الخاطئ الثابت constant detection rate ، والتصميم الثاني: معدل الكشف الثابت constant false alarm rate (CFAR) (CDR). يعتمد التصميم الأول على اختيار قيمة مرغوبة من احتمال الإنذار الخاطئ P_{fa} ومن ثم تعيين عتبة الكشف لتلبية P_{fa} المرغوبة واستخدام هذه العتبة لحساب احتمال الكشف P_d المقابل. بينما في التصميم الثاني يتم استخدام احتمال الكشف P_d لتعيين العتبة. يمكن حساب العتبة بناءً على هذين المبدئين كالتالي:

$$\lambda_f = Q^{-1}(P_{fa}) \sqrt{\frac{2}{N} \sigma_w^2 + \sigma_s^2} \quad \text{for (CFAR)} \quad (15)$$

$$\lambda_d = Q^{-1}(P_d) \sqrt{\frac{2}{N} (\sigma_w^2 + \sigma_s^2) + (\sigma_w^2 + \sigma_s^2)} \quad \text{for (CDR)} \quad (16)$$

من المعادلتين (15)(16) نجد أن التصميم CFAR على عكس CDR، لا يحتاج إلى معرفة باستطاعة إشارة المستخدم الأساسي PU لتعيين قيمة العتبة، لذلك يتم استخدام CFAR بشكل أكثر شيوعاً.

3-4- عدم اليقين بالضجيج و جدار نسبة الإشارة إلى الضجيج SNRWall:

يفترض كاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة أن المستقبل الثانوي يعلم قيمة استطاعة الضجيج σ_w^2 بشكل مثالي، حيث يتم فرض أنها ذات قيمة واحدة $\sigma_w^2 = 1$ بدون الأخذ بعين الاعتبار حالة عدم اليقين بالضجيج. إلا أننا بحاجة إلى دمج عامل عدم اليقين بالضجيج في النظام للحصول على أداء موثوق، حيث أن أخطاء التقدير أو التداخل أو عدم خطية المكونات هي من المسببات الممكنة لعدم اليقين في استطاعة الضجيج ،و لذلك فإنه من الضروري في الأنظمة العملية أخذ عامل عدم اليقين بالضجيج بعين الاعتبار، لنقادي التشويش على المستخدم الأساسي، وضمان مستوى خدمة جيد للمستخدم الثانوي. وتتمثل الصعوبة الناتجة عن عدم اليقين بالضجيج في أن الكاشف لا يمكنه معرفة تباين الضجيج بدقة. إنما يتوزع تباين الضجيج عندما يتواجد عدم يقين بالضجيج ضمن المجال:

$$\sigma^2 \in \left[\frac{\sigma_w^2}{\rho}, \rho \sigma_w^2 \right] \quad \text{حيث } \rho \text{ عامل عدم اليقين من الضجيج و } \rho > 1. [11]$$

تم دراسة أثر عدم اليقين بالضجيج في الأدبيات باعتبار الحالة التي تسبب أكبر تدهور في أداء الكاشف وهي تكون عندما تساوي استطاعة الضجيج $\rho \sigma_w^2$ تحت الفرضية H_0 و $\frac{\sigma_w^2}{\rho}$ تحت الفرضية H_1 .

وبالتالي يمكن تعديل المعادلتين (12)،(13) لتصبح كالآتي:

$$P_d = Q \left(\frac{\lambda - (\sigma_w^2/\rho + \sigma_x^2)}{\sqrt{\frac{2}{N} (\sigma_w^2/\rho + \sigma_x^2)}} \right) \quad (17)$$

$$P_{fa} = Q \left(\frac{\lambda - \rho \sigma_w^2}{\sqrt{\frac{2}{N} \rho \sigma_w^2}} \right) \quad (18)$$

من (17)، (18) نجد:

من المعادلة (17) نحصل على:

$$Q^{-1}(P_{fa}) = \frac{\lambda - \rho \sigma_w^2}{\sqrt{\frac{2}{N}} \rho \sigma_w^2} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{2}{N}} \rho \sigma_w^2} - \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{N}}} \quad (19)$$

من المعادلة (18) نحصل على:

$$Q^{-1}(P_d) = \frac{\lambda - (\sigma_w^2/\rho + \sigma_x^2)}{\sqrt{\frac{2}{N}} (\sigma_w^2/\rho + \sigma_x^2)} = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{2}{N}} (\sigma_w^2/\rho + \sigma_x^2)} - \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{N}}} \quad (20)$$

يمكن من المعادلتين (19),(20) كتابتهما بالشكل:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\rho} + snr\right) * \left(\sqrt{\frac{N}{2}} + Q^{-1}(P_d)\right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{2}{N}} \sigma_w^2} \\ \rho * \left(\sqrt{\frac{N}{2}} + Q^{-1}(P_{fa})\right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{2}{N}} \sigma_w^2} \\ \left(\frac{1}{\rho} + snr\right) * \left(\sqrt{\frac{N}{2}} + Q^{-1}(P_d)\right) &= \rho * \left(\sqrt{\frac{N}{2}} + Q^{-1}(P_{fa})\right) \\ \sqrt{\frac{N}{2}} \left(snr - \left(\rho - \frac{1}{\rho}\right)\right) &= \rho Q^{-1}(P_{fa}) - \left(\frac{1}{\rho} + snr\right) Q^{-1}(P_d) \end{aligned}$$

وأخيرا يمكن الحصول على N:

$$N = 2 \left[\rho Q^{-1}(P_{fa}) - \left(\frac{1}{\rho} + snr\right) Q^{-1}(P_d) \right]^2 * \left(snr - \left(\rho - \frac{1}{\rho}\right) \right)^{-2} \quad (21)$$

بمقارنة المعادلتين N و N_{min}، نجد أنه لا يوجد تقريبا مساهمة كبيرة في قيمة النتائج إذا كان هناك تغير طفيف في قيمة ρ. إلا إن الجزء الأهم في المعادلة (21) هو حد المقام وهو ما يجب مناقشته ومقارنته، فعندما ρ≈1 تكون القيم العددية لكلا المعادلتين هو نفسه، أم عندما تكون ρ>1 (و على فرض قيمة ρ=1.05)، عندها تكون قيمة 0.1≈(ρ-1/ρ)=0.0976، وعلى فرض snr=0.1 عندها بالتعويض في المعادلة نجد أن قيمة (snr-(ρ-1/ρ))⁻²=0 ومنه، فإن المعادلة تؤول إلى اللانهاية أي ∞→N. بعبارة أخرى، لا يمكن اكمال الكشف إلا من أجل زمن تحسس غير محدود، وهو أمر غير عملي. أي أن عدد العينات سيؤول إلى اللانهاية عندما تقترب نسبة الإشارة إلى الضجيج من القيمة (ρ - 1/ρ)، وهذا ما يدعى بجدار نسبة الإشارة إلى الضجيج SNRWall. بالتالي كاشف الطاقة سوف يؤول عديم الفائدة مع اقتراب قيمة SNR المستقبلية من قيمة حائط نسبة الإشارة للضجيج.

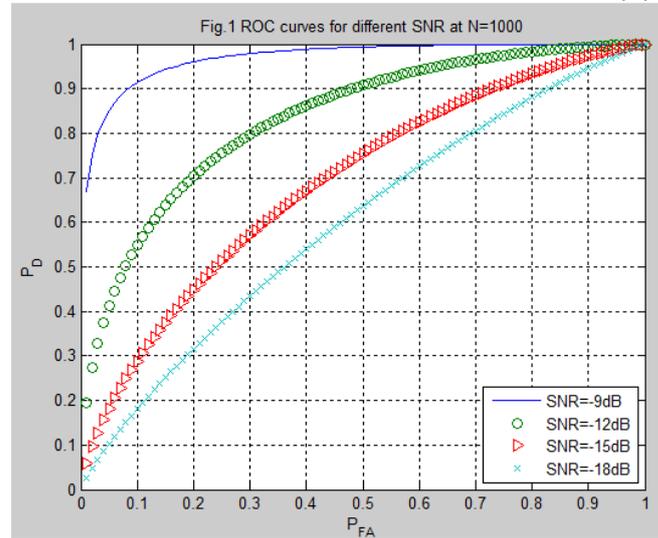
4- النتائج والمناقشة:

تم توضيح أداء كاشف الطاقة برسم منحني يعبر عن تغيرات احتمال الكشف من أجل تغيرات احتمال الإنذار الخاطئ.

1-4- الحالة الأولى:

معروفة لدى المستقبل الثانوي لكاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة و تتم افتراض قيمة استطاعة الضجيج σ_w^2 من 0 إلى 1. (تتراوح من P_f ، أي تم اختيار قيم مرغوبة لاحتمال الإنذار الخاطئ CFAR عملية التصميم على مبدأ 13. من المعادلة (P_d) و تم بعدها حساب احتمال الكشف 15 تم اختيار عتبة الكشف وفق المعادلة)

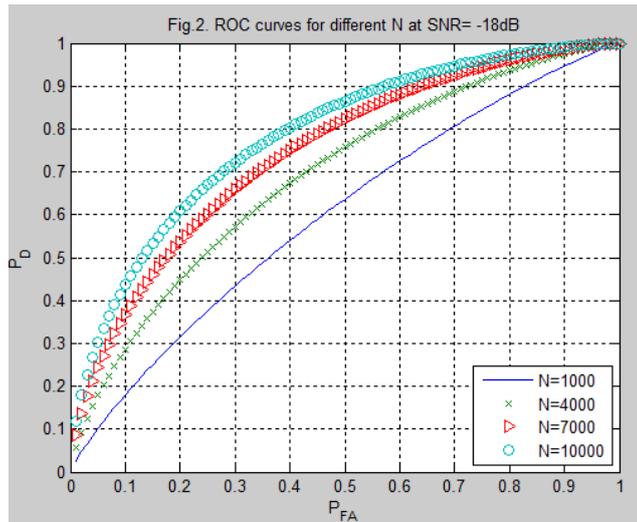
في ضوء هذه الفرضيات تم إيجاد أنه مع استخدام العتبة الثابتة كانت البارامترات المتغيرة الممكن ضبطها SNR، ونسبة الإشارة إلى الضجيج N المرغوبة، عدد العينات P_f لدراسة تأثيرها هي قيم تم ضبط عدد العينات من أجل $N=1000$ و $P_f \in \{0,1\}$ ، ومن أجل قيم منخفضة و مختلفة لـ SNR كالتالي: $\{-9,-12,-15,-18\}$ dB لتوضيح تأثير العمل في مثل هذه البيئات ذات القيم المنخفضة من الـ SNR على أداء الكاشف ، وتم الحصول على الشكل (2):



الشكل(2): يمثل منحني ROC من أجل قيم مختلفة لـ SNR

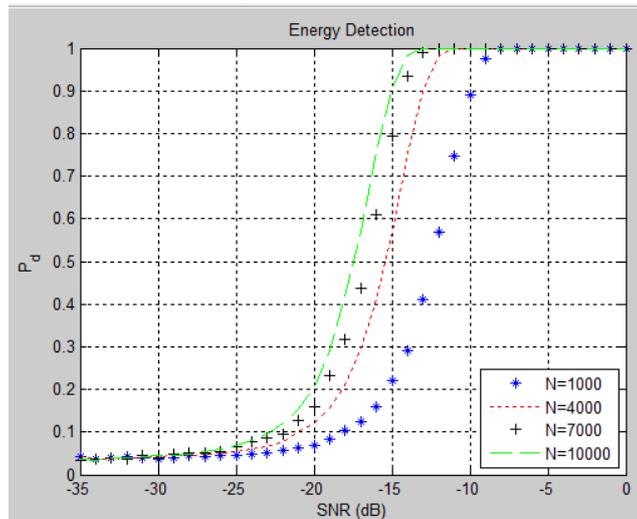
يبين الشكل (2) كيف أن أداء كاشف الطاقة ينخفض من أجل القيم المنخفضة لنسبة الإشارة إلى الضجيج، وهذا ما يجعله غير مناسب في اكتشاف الإشارات الضعيفة.

من أجل عملية التحسين تم الاستعانة بالمعادلة (14) و تم اختيار عدد العينات بشكل يتناسب عكساً مع مربع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، فمن أجل $SNR=-18$ dB و مجموعة قيم لعدد العينات $N \in [1000,10000]$ ، تم الحصول على الشكل (3):



الشكل (3): يمثل منحنى ROC من أجل قيم مختلفة لـ N

نلاحظ أننا احتجنا لإجراء زيادة كبيرة في عدد العينات بهدف التحسين من دقة الأداء عند القيم المنخفضة لـ SNR ويعود ذلك للتناسب العكسي بين عدد العينات و مربع نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR الموضح بالمعادلة (14). تم توضيح تأثير كل من عدد العينات ونسبة الإشارة إلى الضجيج، و ذلك برسم منحنى يعبر عن تغير احتمال الكشف كتابع لـ SNR، وذلك من أجل قيمة $P_f=0.1$ ، وقيم N تتراوح بين 1000,10000:



الشكل (4): يمثل تغير احتمال الكشف بالنسبة لـ SNR من أجل قيم مختلفة لـ N

نلاحظ من الشكل (4) أن أداء كاشف الطاقة عند القيم المرتفعة لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR سيكون متقارب إلى حد كبير من أجل أيًا كانت عدد العينات، لكن أدائه سيتغير مع انخفاض قيم الـ SNR و بالتالي فإن عدد العينات المطلوب لأداء كشف دقيق سيتزايد.

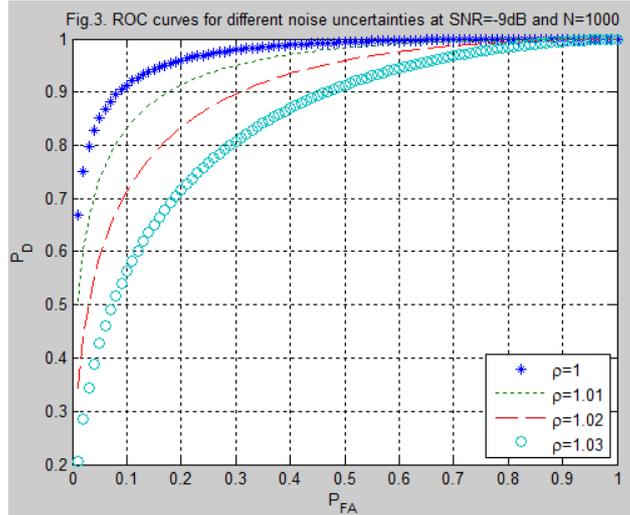
تظهر النتائج التي تم الحصول عليها إن الأداء تم تحسينه تدريجياً مع زيادة N، أي طالما N كبيرة بدرجة كافية (دون الأخذ بعين الاعتبار حالة عدم اليقين في الضجيج)، سيكون من الممكن الحصول على احتمال كشف دقيق حتى إذا كانت نسبة الإشارة إلى الضجيج منخفضة.

إلا أن التآرجح البسيط في استطاعة الضجيج سيؤدي إلى تدهور أداء الكاشف بشكل كبير، خاصة من أجل القيم المنخفضة لـ SNR . حيث يمكن أن نلاحظ من المعادلة (15) إن عتبة الكشف لا تعتمد فقط على قيمة الاحتمال المرغوب P_f وعدد العينات N ، إنما أيضاً تتأثر بتباين الضجيج σ_w^2 ، والذي ليس ثابتاً في الحالات العملية. لذا فإن التقلبات الصغيرة في قيمة σ_w^2 سيؤثر بشكل كبير على قيمة عتبة الكشف λ الذي بدوره سيؤدي إلى اكتشاف غير موثوق به للمستخدمين الأساسيين PU حتى ولو تم زيادة عدد العينات N بشكل كبير وذلك بسبب ما يعرف بـ "جدار نسبة لإشارة إلى الضجيج". كما إن عدد العينات المطلوب يتعلق بمعدل أخذ العينات للنظام، وبزمن التحسس المقبول، حيث إن زمن التحسس يجب أن لا يكون كبيراً للغاية، وإلا سيتم تقليل كفاءة النظام. ومن هنا نجد إن كاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة لن يقدم أداء كشف جيد وذلك نظراً للتأثير الكبير لعامل عدم اليقين بالضجيج.

4-2- الحالة الثانية:

• تم في هذه الحالة اختيار القيم الآتية:

• $P_{fa} \in (0,1)$ ، $SNR = -9$ db ، عدد عينات $N = 1000$ ، ρ تأخذ القيم المختلفة {1-1.01-1.02-1.03}، على اعتبار كما ذكرنا قيمة معامل عدم اليقين تأخذ قيم $\rho \geq 1$ ، حيث $\rho = 1$ أي الحالة بدون وجود عدم يقين بالضجيج (متوسط طاقة الضجيج يبقى ثابتاً) بينما القيم الأخرى تمثل التآرجح البسيط في متوسط طاقة الضجيج . وذلك لدراسة أهمية تأثير تغير معامل عدم اليقين بالضجيج على أداء الكاشف.

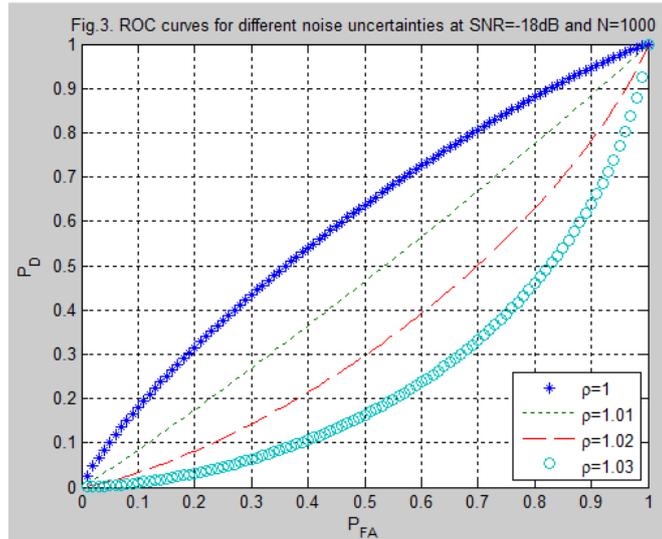


الشكل (5): يمثل منحنى ROC من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم اليقين بالضجيج ρ و $SNR = -9$ dB و $N = 1000$

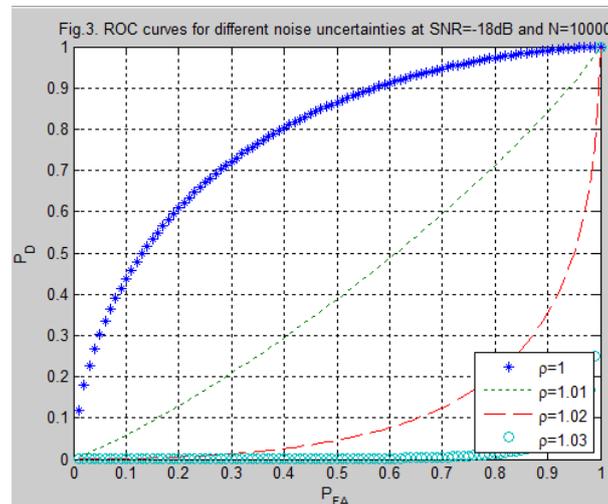
تبين من الشكل (5) يكون أداء كاشف الطاقة جيد عند القيم المقبولة لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR، إلا أن الزيادة الطفيفة في عامل عدم اليقين بالضجيج سيؤدي إلى هبوط كبير بأداء الكاشف.

• تم دراسة تأثير ρ وذلك من أجل القيم الآتية:

$N = 1000$; $SNR = -18$ dB, $\rho \in \{1-1.01-1.02-1.03\}$



الشكل(6): يمثل منحني ROC من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم اليقين بالضجيج ρ و $N=10000$; $SNR= -18$ dB, $\rho \in \{1-1.01-1.02-1.03\}$ وكذلك من أجل القيم الأتية : \bullet



الشكل(7): يمثل منحني ROC من أجل قيم مختلفة لمعامل عدم اليقين بالضجيج ρ و $N=10000$ & $SNR=-18$ dB

تبين من الشكل (6) و الشكل (7) أن أداء الكاشف سيندهور بشكل حاد، حتى بعد العمل على تحسين اداءه بزيادة عدد العينات N ، حيث سيبقى لمعامل عدم اليقين بالضجيج ρ تأثير كبير على حساسية الكشف ودقة الأداء لكاشف الطاقة.

بالتالي تبين من الأشكال أعلاه أن الأداء ينخفض تدريجياً مع زيادة عامل عدم اليقين بالضجيج ، وهذا يدل أن كاشف الطاقة حساس للغاية لعدم اليقين بالضجيج. أي أن المستخدمين الإدراكيين يتوقعون أن يكون الطيف شاغراً بغض النظر عما إذا كان هناك مستخدمون أساسيون حاضرون أو غائبون. وبالتالي ، فإن المستخدمين الإدراكيين يضررون بالمستخدمين المرخصين عند تواجدهم، لا سيما في البيئات ذات النسبة المنخفضة للإشارة إلى الضجيج. من أجل ضمان أداء جيد ، يعد اختيار عتبة مناسبة أمراً مهماً للغاية. تعتمد خوارزميات كاشف الطاقة التقليدية على عتبة ثابتة ، وقد تم التحقق من أن الأداء ينخفض في ظل بيانات عدم اليقين من الضجيج. يشير هذا إلى أن اختيار عتبة ثابتة لم يعد صالحاً في ظل عدم اليقين من الضجيج ويجب اختيار العتبة بشكل مرناً بناءً على الضرورات.

5 - الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية:

تم في هذه الدراسة التحقق من أن كاشف الطاقة ذو العتبة الثابتة على الرغم من بساطته وسهولة تنفيذه، إلا أنه لا يناسب البيئات ذات القيم المنخفضة من نسب الإشارة إلى الضجيج SNR ، نتيجة حساسيته لعدم اليقين بالضجيج، وهذا أمر لا مفر منه في الحالات العملية، والذي بدوره ينعكس على أداء تحسس الطيف في أنظمة عمل الراديو الإدراكي (المعرفي). نستنتج من ذلك إن الاستخدام الثابت لعتبة الكشف أمر غير عملي ما لم يتم ربطه بآليات تتنبأ بقيمة الضجيج عند المستقبل أو العمل على حل المشكلة بالاعتماد على عتبة متغيرة يتم تقديرها بناء على عامل عدم اليقين بالضجيج . وبالنتيجة يقترح البحث التوصيات التالية:

- العمل على تعزيز دراسة كاشف الطاقة يعتمد على عتبة ديناميكية ذات خوارزميات قياس فعالة و موثوقية عالية في عمليات تقدير الضجيج المستخدمة لحساب عامل عدم اليقين بالضجيج.
- الدمج بين عدة تقنيات من أجل الحصول على عدة مراحل للكشف، كدمج كاشف الطاقة مع كاشف الدورية الساكنة.

6- المراجع:

- [1] Wang, Beibei, and KJ Ray Liu. "Advances in cognitive radio networks: A survey." IEEE Journal of selected topics in signal processing 5.1 (2010): 5-23.
- [2] Akyildiz, Ian F., et al. "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey." Computer networks 50.13 (2006): 2127-2159.
- [3] Gautam, Ajay Kumar. Cognitive Radio Networks. Diss. Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology Surat, 2009.
- [4] Bagwari, Ashish, et al. "Spectrum sensing techniques for cognitive radio: A re-examination." 2020 IEEE 9th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). IEEE, 2020.
- [5] Arjoun, Youness, and Naima Kaabouch. "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions." +
- [6] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [7] Eerla, V. V. Performance analysis of energy detection algorithm in cognitive radio. Diss. 2011.
- [8] Paisana, F. D. C. "Spectrum sensing algorithms for cognitive radio networks." Universidade Tecnica de Lisboa (2012).
- [9] Ali, Abdelmohsen, and Walaa Hamouda. "Advances on spectrum sensing for cognitive radio networks: Theory and applications." IEEE communications surveys & tutorials 19.2 (2016): 1277-1304.
- [10] S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory, Prentice-Hall, 1998..
- [11] Tandra, Rahul, and Anant Sahai. "SNR walls for signal detection." IEEE Journal of selected topics in Signal Processing 2.1 (2008): 4-17.
- [12] Pandit, Shweta, and Ghanshyam Singh. "Spectrum sensing in cognitive radio networks: potential challenges and future perspective." Spectrum sharing in cognitive radio networks. Springer, Cham, 2017. 35-75.