

دراسة و تحليل تأثير الضجيج على حساسية المستقبل في نظام الاتصال الضوئي الرقمي

كابي جورج*

(تاريخ الإيداع 8 / 9 / 2015. قُبل للنشر في 28 / 12 / 2015)

□ ملخص □

يتضمن البحث دراسة وتحليل تأثير كلاً من الضجيج الحراري، والضجيج الطلقي على حساسية المستقبل في نظام اتصال ضوئي رقمي، ويسلط الضوء على البارامترات التي تؤثر سلباً وإيجاباً على الحساسية، وقد تم استخدام اللغة البرمجية ماتلاب MATLAB لدراسة العلاقة بين حساسية المستقبل ومعدل المعطيات، وأوضحت مدى أفضلية حساسية المستقبل المحدود بالضجيج الطلقي من المستقبل المحدود بالضجيج الحراري؛ حيث تكون الحساسية أفضل بحدود 30dB. كما قدمت الدراسة توضيحاً لأفضلية الكاشف الضوئي APD من ناحية الحساسية مقارنة مع الكاشف الضوئي PIN بسبب ربحه الداخلي، وذلك عندما يكون الضجيج الحراري هو المهيمن، ولكن يفضل الـ PIN عندما يكون الضجيج الطلقي هو المهيمن.

وتبين لنا من الدراسة تحسن حساسية مستقبل محدود بالضجيج الطلقي من أجل كفاءة كم أعلى ومن أجل طول موجة أكبر، ولكنها تسوء للحصول على معدل خطأ أصغر. كما أظهرت تحسن حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري بزيادة الاستجابية وبزيادة مقاومة الحمل، ولكنها تسوء بزيادة رقم الضجيج وكذلك من أجل معدل خطأ أصغر.

الكلمات المفتاحية: الضجيج الحراري - ضجيج الطلقي - الكاشف الضوئي - الحساسية - معدل المعطيات - APD -

PIN

*مشرف على الأعمال - قسم الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Study and analysis of the impact of noise on the receiver sensitivity in the digital optical communication system

Gaby George*

(Received 8 / 9 / 2015. Accepted 28 / 12 / 2015)

□ ABSTRACT □

The effect of thermal noise and shot noise on the receiver sensitivity in a digital optical communication system will be studied and analyzed. Also, the positive and negative effects of Parameters on the receiver sensitivity will be highlighted. The programming tools (MATLAB) is used to study the relationship between the receiver sensitivity and bit rate. It showed that the shot-noise-limited receiver sensitivity is much better than the thermal -noise-limited receiver sensitivity with best 30dB. The study also provided an explanation for the preference of optical detector (APD) compared to that in (PIN) optical detector from sensitivity side due to its internal gain, this can be achieved when the thermal noise is dominant. However, the preference of optical detector(PIN) will be better in case of shot noise is dominant.

Analyzed results show that there is a significant improvement in the shot-noise-limited receiver sensitivity for high quantum efficiency and high wavelength. However, the sensitivity is deteriorated to get a lower error rate. The thermal -noise-limited receiver sensitivity showed an improving by increasing the responsivity and the load resistance. However, it decreases by increasing the number of noise and the error rate.

Key words: Thermal noise - shot noise - Photo detector– sensitivity– bit rate – APD - PIN.

*Work supervisor, Department of communication, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعد نظام الاتصال الضوئي Optical communication system من أهم أنواع نظم الاتصالات في وقتنا الحاضر، وذلك نظراً للميزات الكثيرة التي يتمتع بها ولاسيما الخسارة القليلة والوثوقية العالية وزيادة عرض الحزمة وبالنتيجة الكم الهائل من المعلومات التي يمكن إرسالها مقارنة مع أي نظام اتصال آخر. ولكن أثناء إنتقال الإشارة الضوئية من المرسل إلى المستقبل عبر الليف الضوئي تعاني من بعض الخسارات والضياعات، وهناك الكثير من العوامل التي تؤدي إلى تدني استطاعة الإشارة الضوئية ولاسيما الضجيج Noise بأنواعه المختلفة، لذا لابد من العمل على التقليل قدر الإمكان من هذه الخسارات بهدف إيصال الإشارة الضوئية إلى المستقبل بسوية استطاعة كافية ليتم كشفها بدقة. تعد حساسية المستقبل الضوئي Receiver sensitivity من المعايير الهامة في نظم الاتصالات الضوئية والتي تحدد جودة وكفاءة هذه النظم [1]، ومن هنا كان لابد من العمل على تحسين حساسية المستقبل الضوئي ليتمكن من كشف حتى الإشارات الصغيرة وذات الاستطاعات المنخفضة، ولكن الضجيج يؤثر على هذه الحساسية وقد يمنع المستقبل من كشف الإشارة بدقة، وهناك العديد من أنواع الضجيج وأهمها الضجيج الحراري والضجيج الطلقي اللذين لهما تأثير واضح ولا بد أن يؤخذ بعين الاعتبار في حين أن مصادر الضجيج الأخرى، يمكن إهمالها لقلة تأثيرها أو لإمكانية إغائها بالوسائل التقنية [2].

في نظام الاتصال الضوئي الرقمي المعتمد في بحثنا هذا وعند دراسة حساسية المستقبل لابد من أخذ معدل خطأ البت Bit error rate بالحسبان لما له من تأثير على جودة النظام، فعند كشف الإشارة لابد أن تكون نسبة الخطأ أقل ما يمكن، فأتناء تصميم نظام اتصال ضوئي تستخدم مواصفات فنية جيدة لجميع مكونات النظام بهدف تأمين وصول إشارة ذات استطاعة كافية، والأهم أن يصمم المستقبل؛ بحيث يكون ذو حساسية جيدة ليتمكن من كشف أدنى استطاعة إشارة واردة إليه ضمن معدل الخطأ المسموح به والذي بحدود 10^{-9} أو أقل [1].

تستخدم غالباً المكبرات الالكترونية لرفع سوية الإشارة ولكن هذا لا يفي بالغرض كثيراً، لأن المكبرات تكبر الإشارة المفيدة ولكنها تكبر أيضاً الضجيج المرافق لها، والذي لا يمكن التخلص منه بل وتسبب ضجيجاً إضافياً قد يؤدي إلى تدني في حساسية المستقبل، لذلك لا تعتبر المكبرات حلاً لتحسين أداء نظام الاتصالات.

دأبت العديد من الأبحاث المرجعية على دراسة نظام الاتصال الضوئي وتحسين أدائه؛ حيث بينت الدراسة [3] تأثيرات الضجيج الحراري والضجيج الطلقي على احتمال الخطأ ونسبة الإشارة إلى الضجيج في نظام اتصال ضوئي رقمي يعتمد تعديل PAM وأنه بزيادة الضجيج نحتاج لعدد الكترونات أكثر من أجل الحفاظ على نفس معدل الخطأ، فيما قارنت الدراسة [4] بين نوعين من المضخمات، والتي تستخدم كمرحلة أولى في المستقبل الضوئي وحددت الأفضل بينهما من ناحية حساسية الكشف من أجل نبضات قصيرة وأخرى طويلة، وأثبتت الدراسة [5] تطوير أنواع من الكاشف الضوئي الجرفي APD بربح داخلي عالي وسرعة كبيرة وأفضلية استخدامه لتطبيقات الاتصالات لمسافات طويلة مقارنة مع الكاشف PIN، ومن ناحية أفضلية الكشف المترابط مقارنة مع الكشف المباشر، والذي يقدم نسبة إشارة إلى ضجيج أفضل، ومعدل خطأ أقل في منظومة اتصال ضوئي قد تم بحثه في الدراسة [6]، ويهدف تحسين الأداء العام لنظام ضوئي مترابط بينت الدراسة [7] أن ذلك يحصل بزيادة المجال الديناميكي وبزيادة استطاعة الإشارة المستقبلية وبإنقاص الضجيج وباستخدام معدلات مصححة خطياً، وأثبتت الدراسة [8] أن استخدام المكبرات لا يعتبر أنجح الحلول لزيادة كفاءة اتصال ضوئي وأن كلاً من نظامي الكشف المباشر والمترابط يتأثران بعرض الحزمة الترددية للمستقبل، إلا إن النظام المترابط أكثر تضرراً من التشويه وبينت أيضاً أن الكشف المترابط أكثر حساسية من الكشف المباشر،

فيما اقترحت الدراسة [2] مخططاً صندوقياً جديداً لنظام اتصال ضوئي هيترو ديني باستخدام عدة هزازات ليزيرية محلية وبينت أنه أكثر حساسية من النظام التقليدي ويقدم نسبة إشارة إلى ضجيج أفضل وأنه أقل تأثراً بالضجيج الحراري والضجيج الطلقي.

أهمية البحث وأهدافه

تتجلى أهمية البحث في تقييم أداء المستقبل الضوئي ومدى حساسيته لكشف الإشارة الضوئية واستخلاص الإشارة المفيدة منها ضمن معدل الخطأ المسموح به، ودراسة تأثير كلاً من الضجيج الحراري والضجيج الطلقي على حساسية المستقبل الضوئي، وتحديد الكاشف المناسب لتحقيق أفضل أداء وجودة لنظام الاتصال.

طرائق البحث وموارده

يتضمن البحث عرضاً للجزء الثالث من نظام اتصال ضوئي وهو المستقبل، ودراسة أهم أنواع المستقبلات الضوئية والمقارنة بينها وتأثير الضجيج عليها. كما سيوضح البحث من خلال المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية ماتلاب (MATLAB) العلاقة بين حساسية المستقبل ومعدل المعطيات ودراسة تأثير العديد من البارامترات على هذه العلاقة، وذلك من أجل نظام اتصال ضوئي رقمي.

الكواشف الضوئية

وظيفة الكاشف الضوئي Photo Detector الأساسية في أي نظام اتصال ضوئي هي تحويل الإشارة الضوئية optical signal الساقطة عليه إلى إشارة كهربائية؛ حيث يمكن استخلاص المعلومات المرسله عليها، وذلك باستخدام دوائر إلكترونية مناسبة. أي أن الكاشف الضوئي هو جهاز مزيل للتعديل (demodulator) في الاتصالات الضوئية. ويجب اختيار الكاشف؛ بحيث يتمتع بحساسية عالية واستجابة سريعة عند الطول الموجي المستخدم وبمدى ترددي (عرض النطاق bandwidth) كافٍ حتى يمكن استيعاب معدل إرسال المعلومات في النظام الضوئي، ويجب أن يكون للكاشف الضوئي مرونة كافية لتحمل التغير في درجات الحرارة والتيار التغذية لكي تكون الإشارة الكهربائية المستخلصة من الإشارة الضوئية الساقطة أكبر ما يمكن [9].

ومن خواص الكاشف الأساسية الاستجابية Responsivity ρ وكفاءة الكم quantum efficiency η وزمن الصعود t_r الذين يحددون جودة الكاشف.

1- الاستجابية (ρ): هي نسبة تيار خرج الكاشف إلى استطاعة دخله الضوئية و يعبر عنها بالعلاقة [10] :

$$\rho = \frac{I}{P} \dots \dots \dots (1)$$

2- كفاءة الكم (η): هي نسبة عدد الالكترونات الصادرة عن الديود الضوئي إلى عدد الفوتونات الواردة إليه.

3- زمن الصعود (t_r) : هو الزمن الذي يستغرقه تيار الكاشف لكي يتغير من 10% إلى 90% من قيمته

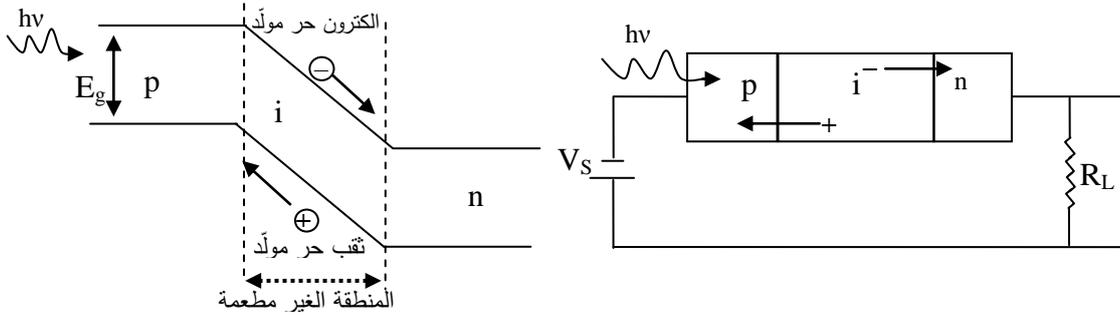
النهائية ويعبر عنه بدلالة عرض نطاق التعديل 3-dB للكاشف بالعلاقة [4]:

$$f_{3-dB} = \frac{0.35}{t_r} \dots \dots \dots (2)$$

ومن أهم الكواشف المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية الكاشف الضوئي PIN والكاشف الجري APD.

1- الكاشف الضوئي (PIN) :

يعد الثنائي الضوئي PIN من الكواشف الأكثر شيوعاً في الاتصالات الضوئية؛ حيث يتضمن طبقة نصف ناقلة نقية ضمنية (Intrinsic) i بين المنطقتين P و n كما في الشكل (1) والذي يبين أيضاً سوية القدرة.



الشكل (1) ثنائي ضوئي PIN وسوية القدرة.

وحيث أنّ هذه الطبقة عريضة فهذا يزيد فرصة امتصاص الفوتونات photons absorption الواردة، وبالتالي استجابية وكفاءة أفضل. فمن أجل إنتاج زوج (إلكترون - ثقب) يجب على الفوتون الوارد أن يملك طاقة كافية لكي يرفع إلكترونات ما عبر ثغرة النطاق band gap .

وبالتالي شرط تحرير الكترن هو $h\nu \geq E_g$ وهذا يقود إلى طول موجة قطع تساوي [11,10]:

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g} \quad \dots \dots \dots (3)$$

حيث λ : طول الموجة وتقدر عادة بالميكرو متر μm .

E_g : طاقة ثغرة النطاق band gap energy وتقدر بالإلكترون فولت (e V) .

$h\nu$: هي الطاقة لكل فوتون حيث h ثابت بلانك و ν التردد.

إن الموجات التي يزيد طولها عن هذا الحد لا يمكن كشفها بسبب عدم كفاية طاقة الفوتون، أما الفوتونات ذات طول الموجة الأقصر فيمكن كشفها إذ أنها ذات طاقة أكبر. ليس كل فوتون يملك طاقة أكبر من E_g سيحرر إلكترون، توصف هذه الخاصية بواسطة كفاءة الكم η .

يمكن بسهولة حساب استجابية الكاشف الضوئي ؛ حيث أن الاستطاعة الضوئية p هي الطاقة المسلّمة إلى الكاشف في كل ثانية، فإن $p / h\nu$ هو عدد الفوتونات التي تصدم الكاشف في الثانية. وباعتبار كفاءة الكم η فيكون عدد الإلكترونات الصادرة بالثانية هي $\eta p / h\nu$. وحيث أن كل إلكترون يحمل شحنة مقدارها e يكون مقدار الشحنة المنبعثة من المهبط بالثانية (التيار) كما يلي : (4)

$$i = \frac{\eta e p}{h\nu} = \frac{\eta e \lambda p}{hc} \quad \dots \dots \dots (4)$$

وهذا هو التيار الذي يتدفق خلال المقاومة في الدارة الخارجية؛ حيث يتصرف الكاشف كما لو كان منبعاً للتيار، وهذا التيار يتناسب مباشرة مع الاستطاعة الضوئية.

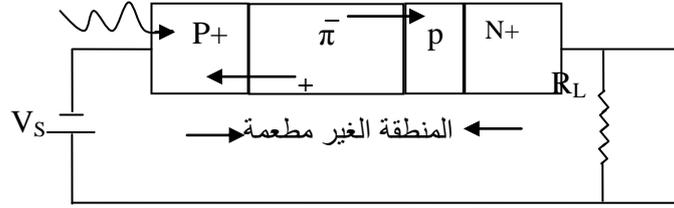
وبالتالي تكون الاستجابية كما يلي : (5)

$$\rho = \frac{i}{p} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad \dots \dots \dots (5)$$

2- الكاشف الضوئي الجرفي (APD) : Avalanche photodiode

بعد الثنائي الضوئي الجرفي هو كاشف ذو وصلة نصف ناقلة وبنيته شبيهة ببنية الـ PIN لكنه يتمتع بريح داخلي و استجابية تفوق استجابية الـ PIN . وبالتالي فإن الـ APD أكثر حساسية بكثير من ثنائيات الـ PIN؛ حيث الريح الداخلي يعطي نسب إشارة إلى ضجيج أفضل بكثير مما يمكن الحصول عليها بالتكبير الخارجي [12].

يمتص فوتون في المنطقة غير المطعمة فينتج إلكترون حرّ و ثقب حرّ، وتسبب القوى الكهربائية الكبيرة في المنطقة الغير مطعمة في تسارع هذه الشحنات مكسبة إياها طاقة حركية، فعندما تصطم الشحنات السريعة بالذرات المحايدة تنتج أزواج إضافية (إلكترون - ثقب)، و ذلك عن طريق استعمال جزء من طاقتها الحركية لكي ترفع الإلكترونات عبر ثغرة نطاق الطاقة ويمكن لشحنة متسارعة واحدة أن تولد عدّة شحنات ثانوية جديدة، ويمكن للشحنات الثانوية ذاتها أن تتسارع وتنتج المزيد من الأزواج فنكون قد حصلنا على عملية التضاعف الجرفي يجب أن تكون قوى التسارع قوية لتنتقل طاقات حركية كبيرة، ويمكن تحقيق ذلك بجهود استقطاب عكسية كبيرة تبلغ في بعض الأحيان بضعة مئات من الفولتات. و يتزايد الريح تبعاً لجهود الاستقطاب العكسي V_s .



الشكل (2) ثنائي ضوئي جرفي.

ويعطى التيار المتولد بواسطة APD ذي ربح M بالعلاقة [1]:

$$i = \rho p \implies i = \frac{M\eta e p}{h\nu} = \frac{M\eta e \lambda p}{hc} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho = \frac{M\eta e}{h\nu} = \frac{M\eta e \lambda}{hc} \quad \dots\dots\dots (7) \quad \text{وتكون الاستجابية كما يلي :}$$

بمقارنة العلاقتين (5) و(7) نلاحظ أن استجابية الـ APD أكبر بمقدار M مرة من استجابية الـ PIN؛ حيث تتراوح الاستجابية ρ بين $(0.5 \div 0.7) A/W$ لثنائيات PIN وتزداد لتصل حتى بضعة مئات لـ APD، ولكن الـ PIN أرخص وأقل حساسية لدرجة الحرارة، و يتطلب جهد استقطاب عكسي أقلّ من الـ APD [13].

الضجيج NOISE

يؤثر الضجيج على جودة الإشارة خلال الاستقبال وهو موجود دائماً، وكلما كان كبيراً كلما ساءت الإشارة المكشوفة، لأن تيار هذا الضجيج سوف يجمع مع تيار الإشارة المولدة من قبل الكاشف فيؤدي أحياناً إلى إنقاص التيار الكلي لدرجة يصعب عندها الوضوح المرغوب في الاستقبال. ولا يستطيع المكبر أن يحسن نسبة الإشارة إلى الضجيج

لأن المكبر يسبب أيضاً ضجيجاً إضافياً. وأهم أنواع الضجيج هو الضجيج الحراري و الضجيج الطلقي حيث لديهما تأثير واضح على أنظمة الاتصالات الضوئية، وهما موجودان دائماً، ولا يمكن التخلص منهما بشكل نهائي في حين يمكن إهمال تأثير باقي أنواع الضجيج لإمكانية إلغائها بالوسائل التقنية.

1- الضجيج الحراري : Thermal Noise :

يسمى أيضاً بضجيج جونسون وهو ينشأ داخل مقاومة الحمل R_L للكاشف الضوئي، حتى في حال عدم تطبيق أي جهد ومن دون وجود أي استطاعة ضوئية واردة إلى الكاشف الضوئي فإنه يوجد حركة عشوائية للإلكترونات وذلك بسبب طاقتها الحرارية، وبالتالي فإنه سيمر في مقاومة الحمل للكاشف تيار متغير عشوائي يسمى تيار الضجيج الحراري (i_{NT}). يضاف هذا التيار إلى تيار الإشارة الذي يولده الكاشف الضوئي، وعندما تكون الاستطاعة الضوئية الواردة صغيرة سيكون تيار الإشارة صغيراً أيضاً، وقد يكون تيار الإشارة والضجيج قريبين من بعضهما البعض في السوية ومختلفين في القطبية، وعندها سيحجب الضجيج وجود الإشارة ولن تتحقق عملية الكشف الجيد للإشارة المرغوب بها. يمكن تمثيل الضجيج الحراري بمنبع تيار ينتج تياراً متوسط مربعه هو [13,14] :

$$\bar{i}_{NT}^2 = \frac{4KT\Delta\nu}{R_L} \dots\dots\dots(8)$$

حيث: K : ثابت بولتزمان، T : درجة الحرارة المطلقة (K°)، $\Delta\nu$: عرض نطاق المستقبل.

نلاحظ أنّ قيمة الضجيج الحراري تتناسب طردياً مع عرض النطاق و يعني ذلك أنه بزيادة عرض النطاق تزداد قيمة الضجيج الحراري لذلك نلجأ إلى أن يكون عرض النطاق مساوي لمعدل إرسال المعلومات (معدل المعطيات) Bit rate حتى نحصل على أقل ضجيج حراري ممكن [14].

2- الضجيج الطلقي (ضجيج الكم) : Shot Noise , Quantum Noise

في الكواشف الضوئية تولد الإشارات الضوئية الواردة حوامل شحنة متقطعة تسبب ضجيجاً يسمى الضجيج الطلقي، حيث الإشارة الضوئية الواردة إلى الثنائي الضوئي تحتوي على عدد من الفوتونات التي من شأنها توليد أزواج من الإلكترونات والثقوب تحت تأثير الحقل الكهروضوئي ، أزواج الإلكترونات والثقوب هذه تفصل بشكل فعال من خلال جهد الانحياز العكسي لتوليد التيار الضوئي.

لنفرض ورود استطاعة ضوئية ثابتة نتوقع أن يكون التيار الضوئي ثابت، ولكن هذا التيار مكوّن من عدد كبير من النبضات ومع أنّ جميع النبضات متماثلة فإنها تتولّد عند لحظات عشوائية، إن إضافة نبضات متماثلة متأخرة عشوائياً لا ينتج سوية ثابتة، و بدلاً عن ذلك ينتج تياراً متغيراً متوسط قيمته تعادل قيمة التيار المتوقع في حالة عدم الضجيج ($\eta e p/h\nu$).

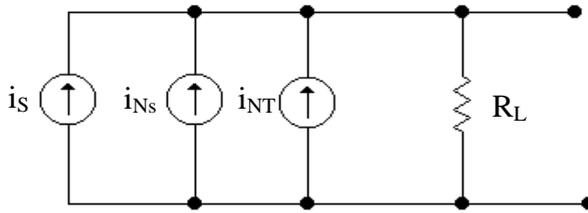
ينشأ في الكواشف الضوئية نصف الناقلية الضجيج الطلقي من التوليد و التركيب العشوائي للثقوب و الإلكترونات الحرة. ويمكن تمثيل الضجيج الطلقي بمنبع تيار ينتج تياراً متوسط مربعه يعطى بالعلاقة [13]:

$$\bar{i}_{NS}^2 = 2eI\Delta\nu \dots\dots\dots(9)$$

حيث I متوسط تيار الكاشف ويساوي $I_D + I_S$ وأن I_D هو تيار الظلام، I_S : متوسط التيار الذي تولده الاستطاعة الضوئية الواردة، e : شحنة الالكترون، Δv : عرض نطاق المستقبل.
يزداد تيار الضجيج الطلقي بزيادة عرض نطاق المستقبل، وبزيادة التيار وبالتالي بزيادة الاستطاعة الضوئية الواردة.

نسبة الإشارة إلى الضجيج : Signal – to – Noise Ratio :

تعرف نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) بأنها متوسط استطاعة الإشارة مقسوماً على متوسط استطاعة منابع الضجيج جميعاً. ويمكن أن نجد الآن الدارة المكافئة المبسطة للثنائي و لمنبعي الضجيج الحراري والضجيج الطلقي معاً كما في الشكل (3) ومن هذه الدارة يمكن إيجاد نسبة الإشارة إلى الضجيج.



الشكل(3) دارة استقبال بكاشف ضوئي و تتضمن المنابع المكافئة للضجيج الحراري و للضجيج الطلقي.

$$i_s = \frac{\eta e P}{h \nu}$$

وجدنا أن تيار الإشارة الضوئية يعطى بالعلاقة

$$\bar{P}_{ES} = \bar{i}_s^2 R_L = \left(\frac{\eta e P}{h \nu}\right)^2 R_L \dots \dots \dots (10)$$

وبالتالي يسلم الثنائي استطاعة إشارة إلى مقاومة الحمل:

إن استطاعة الضجيج الطلقي المسلمة إلى الحمل $\bar{P}_{NS} = \bar{i}_{NS}^2 R_L$ وبالتعويض عن تيار الضجيج الطلقي من العلاقة (9) ينتج:

$$\bar{P}_{NS} = 2e \Delta v \left(\frac{\eta e P}{h \nu} + I_D\right) R_L \dots \dots \dots (11)$$

إن استطاعة الضجيج الحراري المسلمة إلى الحمل هي $\bar{P}_{NT} = \bar{i}_{NT}^2 R_L$ و التي يمكن كتابتها باستخدام معادلة تيار الضجيج الحراري من العلاقة (8) كما يلي:

$$\bar{P}_{NT} = 4 K T \Delta v \dots \dots \dots (12)$$

وبتوحيد المعادلات (10) و (11) و (12) نحصل على العلاقة العامة لـ SNR:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{(\eta e P / h \nu)^2 R_L}{2 e R_L \Delta v (I_D + \eta e P / h \nu) + 4 K T \Delta v} \dots \dots \dots (13)$$

لنبحث بعض الحالات الخاصة، ولنفترض أن تيار الإشارة $(\eta e P / h \nu)$ أكبر بكثير من تيار الظلام I_D ، يمكن عندئذ إهمال I_D من العلاقة (13)، وتحدث هذه الحالة إذا كان تيار الظلام صغيراً و كانت الاستطاعة الضوئية ليست صغيرة. نفترض أيضاً أن استطاعة الضجيج الطلقي تتجاوز استطاعة الضجيج الحراري كثيراً، عندئذ يمكن

تجاهل الحد ($4KT\Delta v$) ويجب أن تكون الاستطاعة الضوئية كبيرة نسبياً لكي يحدث هذا وتختصر نسبة الإشارة إلى الضجيج حينئذٍ إلى ما يلي:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P}{2h f \Delta v} \dots\dots\dots (14)$$

في هذه الحالة تكون الـ SNR محددة بالضجيج الطلقي (و تدعى أيضاً محددة بالكَم). وهذه أفضل نتيجة يمكن الحصول عليها. ولسوء الحظ ليس لدينا دائماً استطاعة ضوئية كبيرة، فعندما تكون الاستطاعة صغيرة يغلب الضجيج الحراري عادةً على الضجيج الطلقي [15] فتؤول العلاقة (13) إلى:

$$\frac{S}{N} = \frac{R_L (\eta e P / h\nu)^2}{4K T \Delta v} \dots\dots\dots (15)$$

في هذه الحالة تكون SNR محددة بالضجيج الحراري، وهي عادةً أصغر بكثير من SNR المحددة بالكَم. نلاحظ أن SNR لهذه الحالة يمكن أن تتحسن بزيادة مقاومة الحمل، وتتناسب مع مربع الاستطاعة الضوئية الواردة وبالتالي فإنّ تغيرات صغيرة نسبياً في كفاءة النظام تنتج تغيرات كبيرة في نوعية الإشارة المستقبلية. **ملاحظة:** إن العلاقة العامة لنسبة الإشارة إلى الضجيج تستخدم عندما لا يكون هناك ربحاً داخلياً للكاشف المستخدم كما هو الحال للكاشف الضوئي PIN. ولكن عند استخدام كاشف ضوئي يتمتع بربح داخلي M كما هو الحال للكاشف APD، سيؤثر هذا الربح على الإشارة الضوئية المفيدة ويكبر استطاعتها بمقدار M^2 وهذا شيء جيد ولكنه سيكبر أيضاً الضجيج الطلقي بنفس النسبة M^2 ، وكذلك يسبب ضجيجاً إضافياً يعبر عنه بعامل الضجيج الزائد (F_A) Excess noise factor، ويزداد هذا العامل بزيادة الربح الداخلي ولكن قيمته أقل من قيمة الربح الداخلي وفي أسوأ الحالات يكونا متساويان [16]، ولا يؤثر الربح الداخلي على الضجيج الحراري لأنه لا يتولد داخل الكاشف الضوئي وبالتالي تؤول العلاقة العامة لنسبة الإشارة إلى الضجيج إلى [1]:

$$SNR = \frac{S}{N} = \frac{(\eta e P / h\nu)^2 R_L M^2}{2 e R_L \Delta v (I_D + \eta e P / h\nu) M^2 F_A + 4K T \Delta v} \dots\dots\dots (16)$$

إذا استخدم هذه المعادلة من أجل كاشف ضوئي ذي ربح داخلي M. ويمكننا الاستنتاج ببساطة أن الـ SNR لكاشف ذي ربح داخلي APD هي أفضل بكثير مقارنة مع كاشف بدون ربح داخلي PIN، وذلك عندما يكون الضجيج الحراري هو المهيمن وذلك بفضل الربح الداخلي وهنا يفضل الـ APD على الـ PIN، ولكن تكون قيمتها أقل عندما يكون الضجيج الطلقي هو المهيمن، وذلك بسبب الضجيج الزائد وهنا يفضل الـ PIN على الـ APD.

معدل الخطأ: BER

يعرّف معدل خطأ البت bit-error rate (BER) بأنه عدد بيتات الخطأ المستقبلية كنسبة من عدد البيئات الصحيحة المستقبلية، وفي نظام الاتصالات الرقمية يعتبر معدل الخطأ مقياس لجودة النظام، وعادة ما يحدث الخطأ نتيجة وجود الضجيج لذلك من الضروري معرفته وأن يكون ضمن الحدود المقبولة لكشف جيد للإشارة. ويعتبر معدل الخطأ 10^{-9} ملائم لأجل تطبيقات عديدة في نظم الاتصالات الضوئية.

فمن أجل مستقبل محدود بالضجيج الحراري يعطى معدل الخطأ بالعلاقة [11,1]:

$$BER = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[0.354 \sqrt{\frac{S}{N}} \right] \dots\dots\dots (17)$$

حيث : erf : هو تابع الخطأ (و هو كمية معروفة جداً و مجدولة). يعتمد معدل الخطأ على نسبة الإشارة إلى الضجيج وهي القيمة المحدودة بالضجيج الحراري .

ومن أجل مستقبل محدود بالضجيج الطلقي يعطى معدل الخطأ بالعلاقة [11,1]:

$$BER = e^{-n_s} \dots\dots\dots (18)$$

يعتمد معدل الخطأ على متوسط عدد الإلكترونات الضوئية n_s المتولدة بواسطة الإشارة خلال فترة البتة τ ،

وتعطى n_s بدلالة الاستطاعة الضوئية بالعلاقة التالية :

$$n_s = \frac{\eta P \tau}{h \nu} = \frac{i_s \tau}{e} \dots\dots\dots \text{Receiver Sensitivity: حساسية المستقبل}$$

هي أقل استطاعة ضوئية يمكن للمستقبل استقبالها، وبالتالي كشفها بشكل صحيح واستخلاص الإشارة

المفيدة منها وذلك ضمن معدل الخطأ المسموح به ومن أجل معدل المعطيات Bit rate المطلوب؛ حيث في نظم الاتصالات الرقمية من المهم معرفة معدل الخطأ عند حساب حساسية المستقبل، وتحسب وفق التالي :

حساسية المستقبل = استطاعة المرسل - خسارات النظام - الاحتياطي

لذلك يجب أن تكون خسارات النظام أقل ما يمكن للحصول على حساسية أفضل فإذا كانت حساسية المستقبل

معطاة فإنه يجب معرفة خسارات النظام، و من ثم تحديد استطاعة المرسل المناسبة لتحقيق الحساسية المعطاة و لكن

غالباً ما يتوجب عند التصميم أن نحدد سويات الاستطاعة المتوفرة عند المستقبل، و التي على أساسها يتم اختيارنا

للمستقبل المناسب بالإضافة إلى ذلك سندرس كيف تتغير حساسية المستقبل مع معدل المعطيات بالنسبة لمستقبل

محدود بضجيج الكم(الطلقى) و بالنسبة لمستقبل محدود بالضجيج الحراري .

1- حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم: Quantum-Noise-Limited Receiver Sensitivity

عندما تكون الاستطاعة الضوئية الواردة كبيرة نسبياً يصبح ضجيج الكم هو المهيمن، وبالتالي يقدم المستقبل

المحدود بضجيج الكم حدود الكشف القصوى، ولحساب حساسية المستقبل ننتقل من علاقة الـ SNR لمستقبل محدود

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P}{2 h \nu \Delta \nu} \quad \text{بضجيج الكم}$$

$$P = \frac{2 h \nu \Delta \nu}{\eta} \frac{S}{N} \quad \text{يكمننا كتابة علاقة الاستطاعة الضوئية عندئذ كما يلي:}$$

$$\frac{h \nu i_s}{\eta e} \quad \text{ويعبر عن التيار بدلالة عدد} \quad \frac{S}{N} = \frac{i_s}{2 e \Delta \nu} \quad \text{بالتعويض ينتج}$$

الإلكترونات الضوئية n_s خلال فترة البت τ بالعلاقة $i_s = \frac{n_s}{\tau e}$ وبالتالي تصبح الاستطاعة الضوئية:

$$P = \frac{h \nu n_s}{\eta \tau} = \frac{h c n_s}{\eta \lambda \tau}$$

ومن أجل نظام اتصال رقمي يستخدم ترميز NRZ تكون $\tau = 1/R$ [13,14] وبالتالي تصبح العلاقة:

$$P = \frac{h c n_s R}{\eta \lambda} \dots\dots\dots(20)$$

تستخدم هذه العلاقة لحساب حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم،

ملاحظة: عند حساب حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم لابد من معرفة متوسط عدد الالكترونات خلال البت وهي متعلقة بمعدل خطأ البت لمستقبل محدود بضجيج الكم، لذلك تم دراسة العلاقة $BER = \exp(-n_s)$ وتبين أن $n_s = 21$ يقابل معدل خطأ مقداره 10^{-9} ، وكذلك $n_s = 10$ من أجل معدل خطأ مقداره 10^{-4} .

ملاحظة: إن العلاقة (20) التي تحدد حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم هي من أجل مستقبل لايمتلك ربح داخلي كما هو الحال في الكاشف الضوئي PIN. ولكن عندما يستخدم كاشف ضوئي ذو ربح داخلي M كما هو الحال في الكاشف الضوئي الجرفي APD والذي يسبب ضجيجاً زائداً فإن العلاقة تصبح كما يلي:

$$P = \frac{h c n_s R F_A}{\eta \lambda} \dots\dots\dots(21)$$

حيث F_A : عامل الضجيج الزائد.

وبالنتيجة تستخدم هذه العلاقة لحساب حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري يستخدم كاشفاً ضوئياً ذي ربح داخلي M ، ومن الواضح التأثير السلبي للضجيج الزائد على حساسية المستقبل، ولكن يمكننا التقليل من تأثير الضجيج الزائد بضبط الريح M والتحكم بقيمته وبالتالي تصغير قيمة عامل الضجيج الزائد.

2- حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري: Thermal-Noise-Limited Receiver Sensitivity

يمكن إعادة كتابة علاقة الـ SNR المحددة بالضجيج الحراري بدلالة استجابة الكاشف، إضافة لذلك فإذا عبرنا عن ضجيج المكبر باستعمال درجة حرارة ضجيج النظام المكافئة T_e تكون النتيجة كما يلي :

$$\frac{S}{N} = \frac{R_L (\rho P)^2}{4K T_e \Delta v}$$

$$P = \frac{\sqrt{4KFT(\Delta v/R_L)(S/N)}}{\rho} \dots\dots\dots(22)$$

حيث F : رقم الضجيج، T_e : درجة الحرارة المكافئة للنظام و تساوي FT.

تستخدم هذه المعادلة لحساب حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري، ومن الواضح أنه يمكن تحسين الحساسية من خلال زيادة مقاومة الحمل ولكن هناك محدودية لهذه الزيادة لأنها تؤدي إلى إنقاص عرض نطاق المستقبل [16,17].

سنأخذ عرض نطاق المستقبل Δv مساوٍ إلى مقلوب مدة النبضة، ومن أجل سلسلة نبضات NRZ فإن $\Delta v = 1/T=R$ أي سيكون عرض نطاق المستقبل مساوٍ إلى معدل المعطيات من أجل ترميز NRZ [14,13].

ملاحظة: عند حساب حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري لابد من معرفة قيمة نسبة الإشارة إلى الضجيج وهي متعلقة بمعدل خطأ البت لمستقبل محدود بالضجيج الحراري، لذلك تم دراسة العلاقة (16):

$$BER = P_e = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[0.354 \sqrt{\frac{S}{N}} \right]$$

وتبين أن SNR=142 من أجل معدل خطأ مقداره 10^{-9} ، و SNR=56 من أجل معدل خطأ مقداره 10^{-4} .
ملاحظة: إن العلاقة (22) التي تحدد حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري هي من أجل مستقبل لا يمتلك ربح داخلي كما هو الحال في الكاشف الضوئي PIN. ولكن عندما يستخدم كاشف ضوئي ذو ربح داخلي M كما هو الحال في الكاشف الجرفي APD فإن علاقة الحساسية تصبح كما يلي:

$$P = \frac{\sqrt{4KFT(\Delta v / R_L)(S/N)}}{\rho M} \dots\dots\dots(23)$$

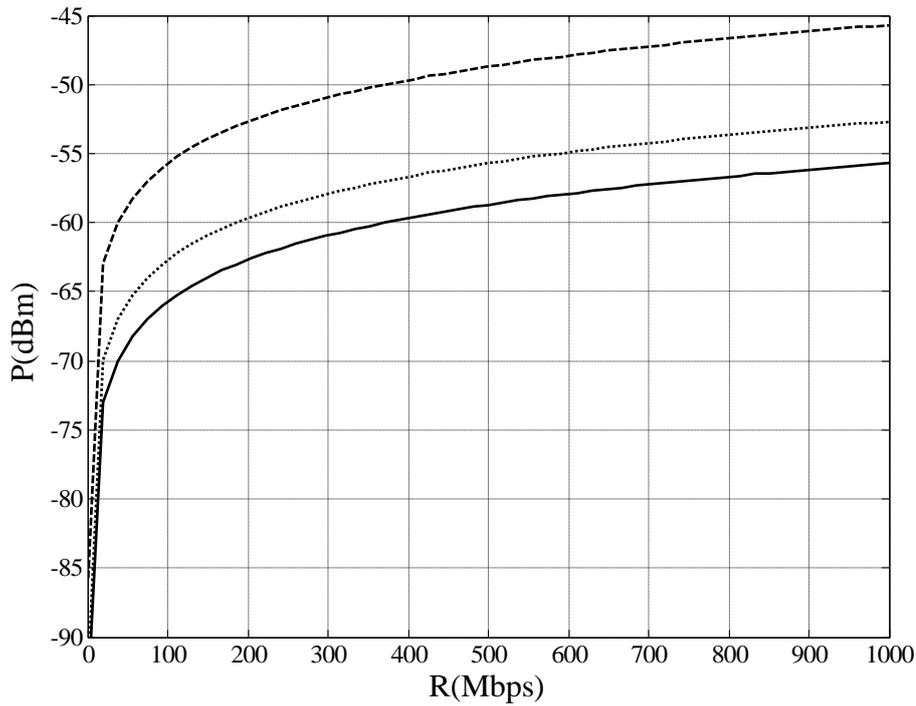
وبالنتيجة تستخدم هذه العلاقة لحساب حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري يستخدم كاشفاً ضوئياً ذي ربح داخلي M كالكاشف APD، ومن الواضح أن حساسية المستقبل تتحسن في مثل هذه الحالة مع زيادة الربح الداخلي وهذا يمكنه من كشف حتى الإشارات الضعيفة وذات سويات الاستطاعة الصغيرة وبالتالي إمكانية استخدام أطوال ألياف كبيرة دون الحاجة إلى مكررات الإشارة.

النتائج والمناقشة:

أولاً: حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم :

1 - نلاحظ من الشكل (4) ومن أجل نفس الشروط (البارامترات) المفروضة أنه كلما ازداد معدل المعطيات R كلما زادت الاستطاعة الضوئية التي يجب على النظام أن يسلمها إلى المستقبل لكي يتمكن من كشف الإشارة ضمن معدل الخطأ المرغوب به، وبالتالي تسوء حساسية المستقبل .
 ونلاحظ من الشكل أيضاً أن حساسية المستقبل تسوء من أجل كاشف ذو ربح داخلي APD مقارنة مع كاشف بدون ربح PIN وذلك بسبب الضجيج الإضافي؛ حيث تتدنى الحساسية بمقدار 3dB عندما $F_A=2$ وتساء أكثر عندما يرتفع عامل الضجيج الزائد إلى $F_A=10$.

فمثلاً من أجل معدل معطيات 300 Mbps "وبالنسبة لكاشف بدون ربح PIN " على النظام أن يسلم استطاعة ضوئية مقدارها (تقريباً) 61 dBm - على الأقل إلى المستقبل لكي يتمكن من كشف الإشارة ضمن معدل الخطأ المرغوب به 10^{-9} أي أن حساسية المستقبل هي 61 dbm - وأي إشارة ترد إلى المستقبل قدرتها أقل من 61 dbm - مثلاً (-65 dBm) لن يتمكن المستقبل من كشفها ضمن معدل الخطأ المرغوب . وعند نفس معدل المعطيات وبالنسبة لكاشف ذي ربح داخلي APD وعندما $F_A=10$ فعلى النظام أن يسلم استطاعة ضوئية مقدارها (تقريباً) 51 dBm - على الأقل إلى المستقبل لكي يتمكن من كشف الإشارة ضمن معدل الخطأ المرغوب به 10^{-9} أي تسوء حساسية المستقبل بمقدار 10dB. لنفرض أنه كانت الاستطاعة الضوئية الواردة هي 55dBm - فإن كاشف الـ PIN سينكم من كشفها ولكن لن يستطع كاشف الـ APD من كشفها وذلك من أجل معدل الخطأ نفسه.



الشكل (4) حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم P بدلالة معدل المعطيات R، من أجل $BER=10^{-9}$ ، $\lambda=1.55 \mu m$ ، $\eta=1$.

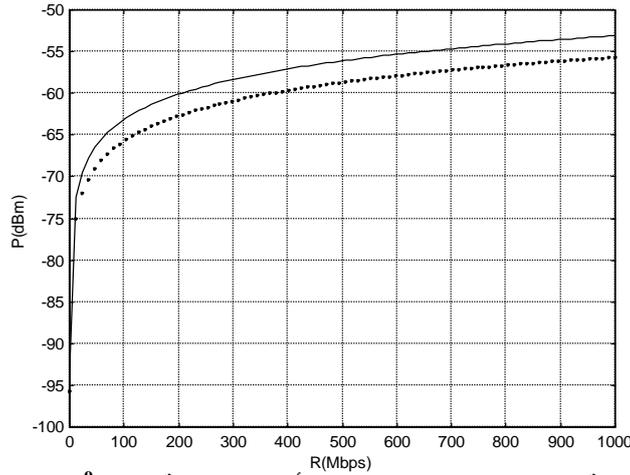
..... من أجل كاشف PIN.

..... من أجل كاشف APD ، حيث $FA=2$.

..... من أجل كاشف APD . حيث $FA=10$.

2- من أجل طولي موجه: نلاحظ من الشكل (5) أن حساسية المستقبل تتحسن بزيادة طول الموجه عند نفس

معدل المعطيات وبثبات بقية البارامترات وضمن نفس معدل الخطأ المرغوب به، حيث أنه على النظام أن يسلم استطاعة ضوئية أقل إلى المستقبل كلما زاد طول الموجه وبالتالي فإن الإشارات ذات أطوال الموجه الأقصر تتطلب استطاعة إرسال أكبر مما تتطلبه الإشارات ذات أطوال الموجه الأطول لتحقيق الكشف ضمن نفس معدل الخطأ المرغوب به .

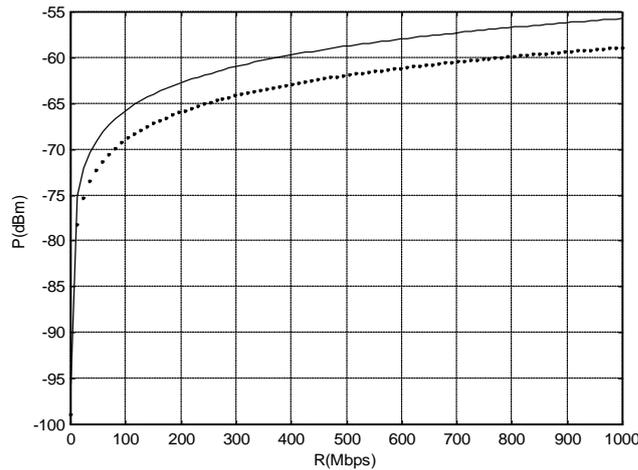


الشكل (5) حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم من أجل طولي موجة حيث $BER=10^{-9}$ ، $\eta=1$.

— من أجل طول $\lambda=0.85 \mu m$.

..... من أجل طول $\lambda=1.55 \mu m$.

3- من أجل معدلي خطأ : نلاحظ من الشكل (6) أن حساسية المستقبل تتحسن من أجل معدل خطأ أكبر بثبات بقية البارامترات وعند نفس معدل المعطيات، حيث على النظام أن يسلم استطاعة ضوئية أكبر إلى المستقبل من أجل معدل خطأ أصغر، أي يمكن أن تتحسن حساسية المستقبل ولكن على حساب معدل الخطأ. وتفسير ذلك بأنه من أجل معدل خطأ 10^{-9} يلزمنا 21 إلكترون لكل بت وبالتالي يلزمنا عدد فوتونات واردة 21، بينما يلزمنا 10 فوتونات من أجل معدل خطأ 10^{-4} أي نحتاج لعدد فوتونات أكبر من أجل معدل خطأ أصغر وبالتالي لاستطاعة ضوئية واردة أكبر ليتم الكشف وبالنتيجة حساسية أضعف "أسوأ" لتحقيق معدل خطأ أصغر.

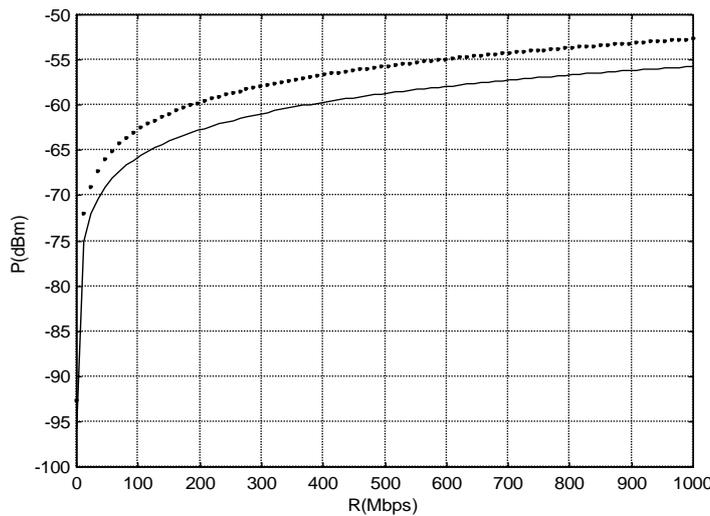


الشكل (6) حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم من أجل معدلي خطأ حيث $\lambda=1.55 \mu m$ ، $\eta=1$.

— من أجل $BER=10^{-9}$.

..... من أجل $BER=10^{-4}$.

4- من أجل كفاةتي كم: نلاحظ من الشكل (7) أن حساسية المستقبل تتحسن بزيادة كفاءة الكم عند نفس معدل المعطيات وبثبات بقية البارامترات، فعندما تزداد الكفاءة بمقدار الضعف تتحسن الحساسية بمقدار 3dB وتفسير ذلك بأنه من أجل معدل خطأ 10^{-9} وعند كفاءة كم تساوي 1 يلزمنا 21 إلكترون لكل بت وبالتالي يلزمنا عدد فوتونات واردة 21، بينما يلزمنا 42 فوتون من أجل كفاءة كم تساوي 0.5 ضمن نفس الشروط وبالتالي يمكن الاستنتاج أن المستقبل يحتاج إلى عدد فوتونات أقل كلما زادت كفاءة الكم وبالتالي يحتاج إلى استطاعة ضوئية واردة أقل من أجل الكشف ضمن نفس معدل الخطأ المرغوب به وهذا يعني أن الحساسية أفضل.



الشكل (7) حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم من أجل كفاةتي كم

حيث $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, $\text{BER}=10^{-9}$.

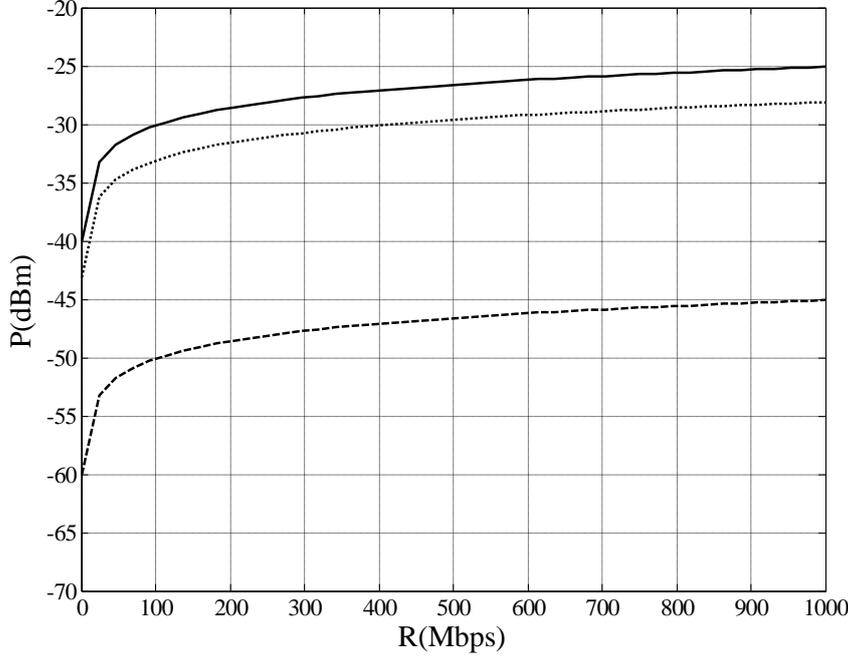
_____ من أجل كفاءة كم 1 .

..... من أجل كفاءة كم 0.5 .

ثانياً: حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري :

1- نلاحظ من الشكل (8) ومن أجل نفس الشروط (البارامترات) المفروضة أنه كلما ازداد معدل المعطيات R تزداد الاستطاعة الضوئية التي يجب على النظام أن يسلمها إلى المستقبل لكي يتمكن من كشف الإشارة ضمن معدل الخطأ المرغوب به وبالتالي تسوء حساسية المستقبل. ونلاحظ أيضاً أن حساسية المستقبل تتحسن من أجل كاشف ذو ربح داخلي (APD) مقارنة مع كاشف بدون ربح (PIN) . فمثلاً من أجل معدل معطيات 400 Mbps "وبالنسبة لكاشف بدون ربح PIN " على النظام أن يسلم استطاعة ضوئية مقدارها (تقريباً) -27 dBm - على الأقل إلى المستقبل لكي يتمكن من كشف الإشارة ضمن معدل الخطأ المرغوب به 10^{-9} أي أن حساسية المستقبل هي -27 dbm وأي إشارة ترد إلى المستقبل قدرتها أقل من -27 dbm مثلاً (29 dBm) لن يتمكن المستقبل من كشفها ضمن معدل الخطأ المرغوب. وعند نفس معدل المعطيات وبالنسبة لكاشف ذي ربح داخلي APD وعندما $M=2$ نلاحظ تحسن حساسية المستقبل بمقدار 3dB وبالتالي يمكن لمستقبل يستخدم الكاشف الضوئي APD أن يتحسس

ويكشف الإشارة ذات الاستطاعة (29 dBm) والتي لم يتمكن من كشفها المستقبل الذي يستخدم الكاشف الضوئي PIN. وعندما $M=100$ ستتحسن حساسية المستقبل بشكل كبير وبمقدار 20dB .

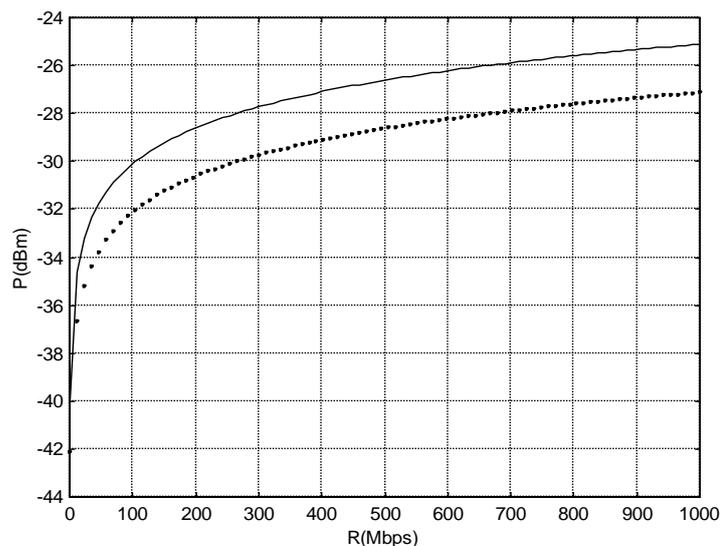


الشكل (8) حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري P بدلالة معدل المطيات R، من أجل $\rho=1$, $F=2$, $BER=10^{-9}$

- _____ من أجل كاشف PIN .
- من أجل كاشف APD , حيث $M=2$.
- من أجل كاشف APD , حيث $M=100$.

2- من أجل معدلي خطأ : نلاحظ من الشكل (9) أن حساسية المستقبل تتحسن من أجل معدل خطأ

أكبر ، بثبات بقية البارامترات وعند نفس معدل المعطيات حيث أنه من أجل معدل خطأ أكبر تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج أصغر وبالتالي التيار الناتج أصغر وهذا التيار ناتج عن الاستطاعة الضوئية الواردة أي أن الاستطاعة الضوئية التي يجب تسليمها إلى المستقبل لتحقيق معدل الخطأ الأكبر تكون أصغر وبالتالي الحساسية أفضل .



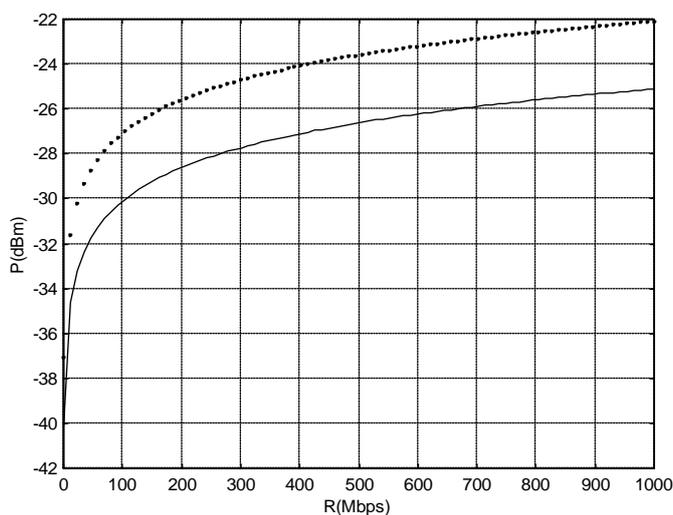
الشكل (9) حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري من أجل معدلي خطأ

حيث $R_L = 500\Omega$, $F = 2$, $\rho = 1$.

..... من أجل $BER=10^{-4}$.

———— من أجل $BER=10^{-9}$.

3- من أجل قيمتين للاستجابة: نلاحظ من الشكل (10) أن حساسية المستقبل تتحسن بزيادة الاستجابة، بثبات بقية البارامترات و عند نفس معدل المعطيات و من أجل معدل خطأ واحد، ونلاحظ أن الحساسية تتحسن بمقدار 3dB عند زيادة الاستجابة بمقدار الضعف.



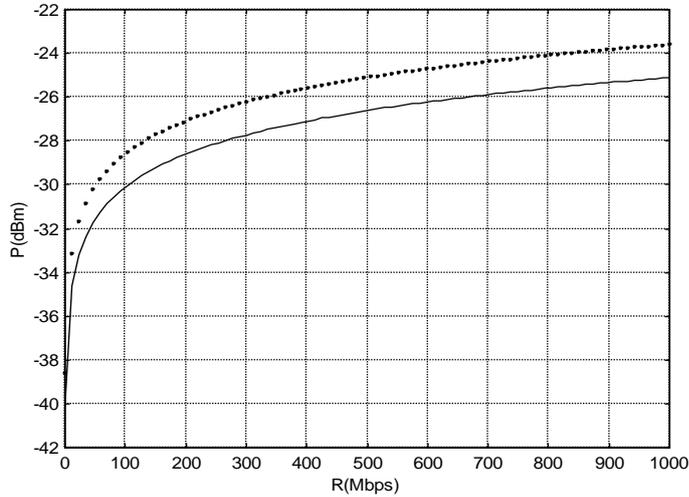
الشكل (10) حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري من أجل قيمتين للاستجابة

حيث $BER=10^{-9}$, $F=2$, $R_L=500\Omega$.

..... من أجل $\rho = 0.5$.

———— من أجل $\rho = 1$.

4- من أجل قيمتين لمقاومة الحمل: نلاحظ من الشكل (11) أن حساسية المستقبل تتحسن بزيادة مقاومة الحمل، بثبات بقية البارامترات وعند نفس معدل المعطيات ومن أجل نفس معدل الخطأ، ولكن هذا يسبب نقصان عرض نطاق المستقبل لذلك هناك محدودية في زيادة مقاومة الحمل.



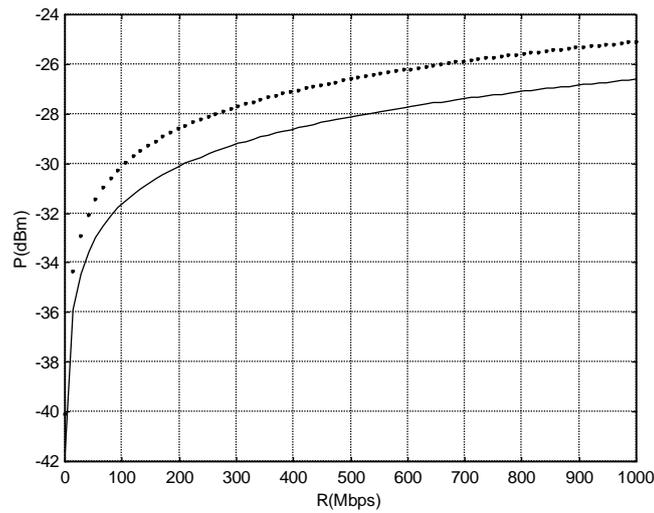
الشكل (11) حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري من أجل قيمتين لمقاومة الحمل

حيث $\rho = 1$, $F = 2$, $BER = 10^{-9}$.

..... من أجل $R_L = 250 \Omega$.

———— من أجل $R_L = 500 \Omega$.

5- من أجل رقمي ضجيج : نلاحظ من الشكل (12) أن حساسية المستقبل تتحسن كلما نقص رقم الضجيج، بثبات بقية البارامترات وعند نفس معدل المعطيات ومن أجل نفس معدل الخطأ ونلاحظ أن الحساسية تتحسن حوالي 1.5 dB عند نقصان رقم الضجيج بمقدار النصف .



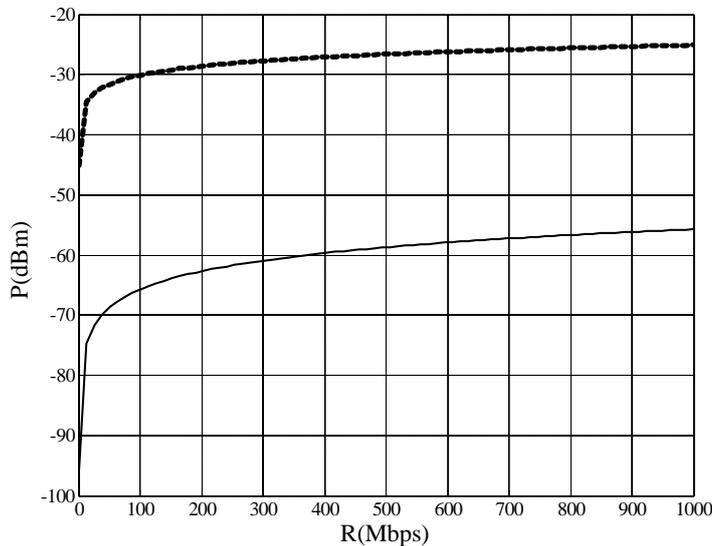
الشكل (12) حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري من أجل رقمي ضجيج

حيث $\rho = 1$, $R_L = 500\Omega$, $BER = 10^{-9}$.

..... من أجل $F = 2$.

_____ من أجل $F = 1$.

6- نلاحظ من الشكل (13) أن حساسية مستقبل محدود بضجيج الكم أفضل بكثير من حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري، و يمكن لمستقبل محدود بضجيج الكم أن يكشف إشارة أضعف بحوالي 30dB من الإشارة التي يمكن لمستقبل محدود بالضجيج الحراري أن يكشفها.



الشكل (13) يبين مقارنة بين مستقبل محدود بضجيج الكم وآخر محدود بالضجيج الحراري

من ناحية الحساسية من أجل معدل خطأ 10^{-9} .

..... من أجل مستقبل محدود بالضجيج الحراري .

_____ من أجل مستقبل محدود بضجيج الكم .

الاستنتاجات والتوصيات

عرضنا في هذا البحث تأثير كفاءة الكم وطول الموجة ومعدل الخطأ على حساسية مستقبل محدود بالضجيج الطلقي " الكم "، حيث لاحظنا:

- 1- أفضلية الإشارة ذات الموجة الأطول من ناحية كشفها ضمن معدل الخطأ المرغوب.
 - 2- الحاجة لعدد فوتونات أكبر من أجل معدل خطأ أصغر وعندها تسوء حساسية المستقبل.
 - 3- تحسن الحساسية بمقدار 3dB بمضاعفة كفاءة الكم.
 - 4- أفضلية الكاشف PIN من الكاشف الضوئي APD.
- كما بيّننا تأثير الاستجابية ومقاومة الحمل ورقم الضجيج ومعدل الخطأ على حساسية مستقبل محدود بالضجيج الحراري حيث لاحظنا:

- 1- تحسن الحساسية بمقدار 3dB بمضاعفة الاستجابية.
 - 2- تحسن الحساسية بزيادة مقاومة الحمل.
 - 3- تحسن الحساسية بمقدار 1.5dB بإنقاص رقم الضجيج إلى النصف.
 - 4- الحاجة إلى نسبة إشارة إلى ضجيج أكبر من أجل معدل خطأ أصغر وعندها تسوء حساسية المستقبل.
 - 5- أفضلية الكاشف APD من الكاشف الضوئي PIN.
- المستقبل المحدود بضجيج الكم يقدم الحالة المثلى للحساسية حيث حساسيته أفضل بحوالي 30dB من مستقبل محدود بالضجيج الحراري. ووجدنا أنه باستخدام الكاشف الضوئي APD عندما يكون المستقبل محدود بالضجيج الحراري، تتحسن الحساسية بمقدار 20dB عند ربح داخلي $M=100$. والتحدي بهدف الوصول إلى الحالة المثلى للكم يجب العمل على إيجاد كواشف ضوئية APD ذات ربح داخلي كبير جداً وعامل ضجيج زائد صغير وذلك من خلال تطوير المواد التي تصنع منها هذه الكواشف.

المراجع

- 1- GOVIND,P.A.*Fiber-Optic Communication Systems*. 3th ed,John Wiley & Sons, Inc, New York,2002,561.
- 2- مخول، مخائيل، تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج في أنظمة الاتصالات ذات تجميع التقسيم الترددي البصري. مجلة جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية،المجلد 32،العدد6، 2010، 65-84.
- 3- أحمد،علي؛ صفور،عفيف؛ الأزكي،عمران، حساب احتمال الخطأ في نظام الاتصال الضوئي الليفي الرقمي. مجلة جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، 2009، 159-177.
- 4- موسى، ظافر؛ البدوية، عبدالرزاق؛ الشريدة،محمد. تحليل حساسية الكشف في مضخم أولي. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الثامن والعشرون -العدد الأول 313،2012-323.
- 5- OTHMAN, A؛ TAIB, N ؛ HUSAIN, N ؛ NAPIAH ,A. *Reviews on valanche photodiode for opticalcommunication technology*. ARPN Journal, Malaysia , vol. 9, no. 1, 2014, 35-44.

6- KBASHI, H. J; Al-DABAG,S.Y;HAMEED, H.A. *Comparison between Direct and Coherent Optical Communication System*. Baghdad Science Journal, Vol.8(2)2011,479-483.

7- مخول، مخائيل، *المجال الديناميكي لنظام الاتصال الضوئي CATV AM/VSB المصحح خطياً*. مجلة

جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 29، العدد 1، 2007، 113-131.

8- مخول، مخائيل، *تحسين أداء الاتصالات الضوئية المترابطة باستخدام الهزازات الليزرية*. مجلة جامعة تشرين

للدراستات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 29، العدد 2، 2007، 139-158.

9-STEVE,H.*Wireless Optical Communication Systems*.1th ed, Springer, United States,2005,193.

10-BARRY, J.R. *Wireless Infrared Communications*.1th ed, Kluwer Academic Pulpishers, Boston, 1994, 653.

11-HARRY, J. R.*Understanding Optical Communications*.1th ed,International Technical Support Organization,U.S,1998,638.

12- EMMANUEL,R;BORGE,V.*Optoelectronics*. 2nd ed,Cambridge University Press, New York, 2004,745.

13-JOHN, M.*Optical Fiber Communications Principles and Practice*. 3rd ed, Pearson Education Limited, London,2009,1127.

14-SEMENOVA,Y. *Optical Communication Systems- Optical receivers*. 1th ed ,Dublin Institute of technology,2003.236.

15-DAVID,W.*Optoelectronic Semiconductor Devices*.1th ed,Prentice Hall International, London,1994,564.

16-JOHN,G. *Optical Communication Systems*.2nd ed,Prentice Hall International ,London,1993,696.

17-GERD,K. *Optical Fiber Communication*.2nd ed , Mcgraw- Hill,Inc,NewYork, 1991,244.