

تقنية مبتكرة في تصميم مستقبل ضوئي - ذي تضخيم مسبق في الاتصالات الضوئية عبر الأقمار الصناعية

فادي غصنة *

(تاريخ الإيداع ٢٦ / ٣ / ٢٠١٩ . قبل للنشر ٢٩ / ٥ / ٢٠١٩)

□ الملخص □

يهتم هذا البحث بتحليل وصلات الأقمار البصرية في الفراغ الحر. فمننا بتوصيف التقنية الجديدة لتصميم المستقبلات البصرية التي تستخدم مع تلك الوصلات. تتألف هذه التقنية من كاشف ضوئي (P-I-N photodiode) PIN يستخدم كاشفاً ضوئياً ، ومضخم بصري نصف ناقل (Semiconductor optical amplifier (SOA) ومرشح Butterworth من المرتبة الثالثة مع دارة اتخاذ قرار مركزية. جرى تحليل هذه التقنية الجديدة من أجل فحص أداء ضجيج هذه المستقبلات البصرية، وبالتالي تحديد الحساسية وعدد الفوتونات المستقبلية عند معدل خطأ محدد. نُفِّدَ نموذج المحاكاة باستخدام (MCAD (Mathcad في هذه الوصلات على ثلاث طرق ترميز مختلفة اعتماداً على التعديل النبضي المرمز (Pulse Code Modulation) PCM بثلاث بتات وهي: التعديل النبضي متعدد المراكز Multiple Pulse Position Modulation MPPM، تعديل موقع النبضة الرقمي Digital Pulse Position Modulation DPPM، وتعديل موقع النبضة المرمز Dicode Pulse Position Modulation Dicode PPM.

الكلمات المفتاحية: الكواشف الضوئية، التعديل النبضي متعدد المراكز MPPM، تعديل موقع النبضة الرقمي DPPM، تعديل موقع النبضة المرمز Dicode PPM .

* أستاذ مساعد في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سورية.

Novel technique of an optically preamplified receiver for optical intersatellite links

Fadi Ghosna *

(Received 26 /3 / 2019 . Accepted 29 / 5 / 2019)

□ ABSTRACT □

This paper is concerned with an analysis of optical intersatellite links in free space. The novel technique of designing the optically preamplified receiver for use in such links is described. This technique consists of PIN photodiode as a photodetector, Semiconductor optical amplifier (SOA) as an amplifier and a 3rd order Butterworth filter with central decision detection.

An original analysis of this novel technique has been investigated to examine the noise performance of this optical receiver and hence determine its sensitivity and the number of photons received for a specified error rate. A computer simulation model (using MCAD) has been carried out in such links and with using three different coding schemes for 3 bits of PCM: Multiple Pulse Position Modulation (MPPM); Digital Pulse Position Modulation (DPPM); Dicode Pulse Position Modulation (Dicode PPM).

Key Words: Optical detectors, Multiple Pulse Position Modulation (MPPM); Digital Pulse Position Modulation (DPPM); Dicode Pulse Position Modulation (Dicode PPM).

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

مقدمة

تتألف البنية الأساسية للمستقبل البصري من: كاشف ضوئي، مضخم منخفض الضجيج، النهاية الأمامية، مراحل تضخيم إضافية، مضخم مسبق ومرشحات. يمكن اعتبار هذه البنية القاعدة الأساسية لتصميم المستقبلات في الفراغ الحر. تُدرس هذا الجانب من المستقبلات البصرية في العديد من الدراسات السابقة [1, 2]. يستخدم الكاشف الضوئي لتحويل إشارة الضوء المعدلة إلى إشارة كهربائية. وهناك نوعان من الكواشف المستخدمة حالياً: كاشف الانهيار APDs Avalanche photodiodes، وكاشف PIN. [1, 2]. يعتمد الاختيار الأمثل للكاشف على طول موجة العملية، والتي بدورها تعتمد على المصدر الضوئي المستخدم لتعديلها. في الاتصالات البصرية يتم تعديل الموجة المستمرة باستخدام الليزر Continuous Wave (CW) مع معدل ماك زيهيندر خارجي Mach-Zehnder interferometer. بما إن هذه الأجهزة تعمل على طول موجة $1.55 \mu\text{m}$ فيتم استخدام هذا الطول الموجي للعمل على تلك الوصلات.

هدف البحث

يهدف هذا البحث إلى استعمال المضخمات البصرية من أجل هكذا وصلات. ويُجرى مقارنة مرجعية شاملة مع تحليل عميق بين كواشف PIN و APD. وهذا يساعد على اختيار الكاشف المناسب للمستقبل من خلال اختبار احتمال استخدام PIN أو APD مع مضخم SOA في وصلات الفراغ الحر ومعدل نقل 1Gbit/s. بالإضافة إلى إجراء نموذج محاكاة باستخدام MCAD من أجل فحص أداء ضجيج هذه المستقبلات البصرية، وبالتالي تحديد الحساسية وعدد الفوتونات المستقبلية عند معدل خطأ محدد.

طرائق البحث ومواده

١- مقارنة مرجعية

١-١ مقارنة بين المضخم المشاب بالاربيوم DFA ومضخم SOA

يوجد اهتمام كبير حالياً بالمضخمات البصرية من أجل تطبيقات إعادة توليد الإشارة والمستقبلات المضخمة. وأجريت العديد من الدراسات حول هذا المجال [4-1]. تظهر الدراسات أن المضخم SOA هو أفضل المضخمات، وأكثر استخداماً من المضخمات البصرية المستخدمة في الوقت الحالي مثل active-fibre doped-fibre amplifiers DFAs. ويعود ذلك إلى المزايا التي يتفوق بها مضخم SOA مقارنة مع مضخم DFA: فهو يملك مكونات أقل، استهلاك طاقة أقل، يُعد أكثر إحكاماً، ذو استجابة ربحية سريعة، بالإضافة إلى أداء عالٍ، ووظيفية أعلى واحتمالية العمل عند طولي الموجة (1300-1550 nm) مع هامش تخميد منخفض. لذلك يفضل استخدام مضخمات SOA مع هذه التطبيقات.

٢-١ مقارنة بين كاشف APDs وكاشف PIN

تظهر الدراسات أن استخدام كواشف PIN مع مضخم SOA تُعد الأنسب في تصميم المستقبلات في نظم الاتصالات البصرية المستخدمة في الفراغ الحر، وذلك لأن كواشف APD تمتلك مضاعفات تسبب ضجيجاً إضافياً، dark and signal noise بالإضافة الى عرض حزمة صغير. وبخلاف ذلك، تمتلك كواشف PIN عرض حزمة جيد، وضجيجاً إضافياً أقل من كواشف APD؛ بسبب عدم وجود مضاعفات [1-2, 5-8] وبالتالي يحقق استخدام كواشف PIN مع SOA، عرض حزمة جيد وتُعد سهلة

الاستخدام. لكن استخدام كواشف APD مع مضخمات SOA يسبب تضخيم للإشارة مع الضجيج، لذلك لا يفضل استخدامه[7].

أجرى سييلي [1] مقارنة بين PIN و APD من خلال حساب حساسية المستقبل التماثلي والرقمي باستخدام الكاشف الضوئي APD ومقارنته مع المستقبل نفسه باستخدام الكاشف الضوئي PIN. تظهر النتائج زيادة كبيرة في الحساسية الناتجة عن استخدام APD مع جهاز استقبال رقمي مصحوب بالضجيج، مقارنة مع تلك الناتجة عن استخدام كاشف PIN. وبما أن ضجيج المستقبل الكلي الإجمالي يهيمن عليه ضجيج APD ، وبالتالي فإن أي تخفيض في ضجيج المضخم لن يولد تغييراً كبيراً في الحساسية، إن ميزة استخدام APD تقل كثيراً من أجل مستقبل ذي ضجيج منخفض. بينما يهيمن ضجيج المضخم على الضجيج الإجمالي للمستقبل عند استخدام كاشف PIN، وبالتالي يحدث تغير مهم في الحساسية ينتج عن انخفاض في ضجيج المضخم. تظهر النتائج أن كاشف APD هو أفضل من PIN مع مستقبلات ضجيج تماثلية. ولكن ميزة استخدام APD تقل بشكل كبير عند استخدام مستقبل تماثلي ذي ضجيج منخفض، وبالتالي يصبح استخدامه غير مرغوب. ويعود ذلك إلى ظهور مستوى عالٍ من الضجيج الطلقي المضاعف multiplied shot noise يتولد من تيار ضوئي ناتج عن متوسط الطاقة المستقبلية. وبالتالي يمكن أن نستنتج أن حساسية المضخم الأولي المصحوب بالضجيج تزداد باستخدام كاشف APD.

٢- طرق ترميز تعديل موقع النبضات

لقد تم اقتراح العديد من طرق تعديل موقع النبضة (PPM) في الماضي لاستخدامها في وصلات الاتصالات البصرية [9-16]. وعلى الرغم من أن أنظمة الترميز هذه تعمل بمعدلات بيانات أعلى من نظيراتها الخاصة بتعديل رمز النبضة (PCM)، فإنها توفر حساسية أفضل. ويمكن استخدامها كأداة لاستفادة من عرض النطاق الترددي المتوفر في وصلات الألياف البصرية.

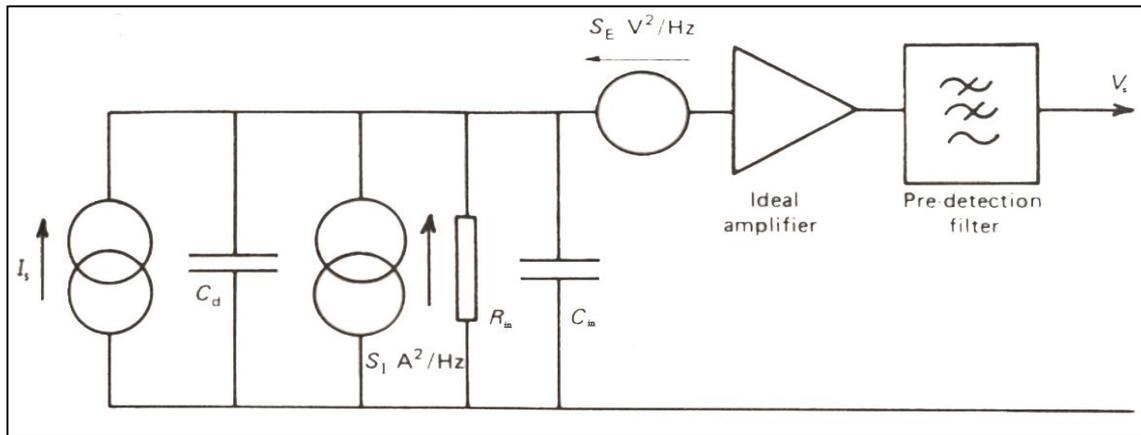
توجد طرق ترميز مختلفة يمكن استخدامها في الوصلات البصرية المشتركة بين السوائل في الفضاء مثل: تعديل موقع النبضة المتعدد (MPPM) ، تعديل موقع النبضة الرقمي (DPPM) ، تعديل موقع النبضة (Dicode) Dicode (PPM).

إن طريقة الترميز المشهورة حالياً هي تعديل موقع النبضة الرقمي Digital Pulse Position Modulation . يمثل Digital PPM الصيغة الأولى لتعديل الإشارة و يتم فيه تشفير n بت من PCM عن طريق إرسال نبضة واحدة في واحدة من 2^n حيز زمني ممكن. يتكرر هذا كل ثانية T، بحيث يكون معدل البت المرسل n / T بت في الثانية. وبالإضافة إلى ذلك، تقع أحياناً فترة حراسة (تتألف من عدد معين من الفترات الزمنية الفارغة) في نهاية الرتل للحد من تأثيرات التداخل بين الرموز inter-symbol interference (ISI) والتداخل بين الإطارات (IFI) inter-frame interference الناتج عن تشتت النبضة في الألياف الضوئية. تعطي هذه الطريقة زيادة في حساسية المستقبل تتراوح بين (5-11)dB بالمقارنة مع PCM القياسي. ومع ذلك، يؤدي توسيع النطاق الترددي إلى زيادة معدل الخط بحيث يمكن أن يكون معدل البيانات النهائي مساو 10.7 مرة من معدل PCM الأصلي إذا تم ترميز ست بتات في 64 حيز بيانات بدون بتات حراسة. هذا التوسع في عرض النطاق الترددي يؤدي إلى مطالب كبيرة على معالجة الإلكترونيات وبالتالي نعد هذه التقنية محدودة [10]. وقد اقترح العديد من طرق التعديل البديلة التي تعمل مع توسيع عرض نطاق ترددي أصغر مثل تعديل موقع النبضة التفاضلي differential PPM ، تعديل موقع النبضة المتراب

overlapping PPM، dicode PPM و تعديل موقع النبضة المتعدد multiple PPM. أكثر عرض نطاق ترددي فعال لهذه تاطرق هو dicode PPM و multiple PPM كما أنها تقدم أقل توسع في عرض النطاق [9, 16]. يمكن أن يوفر multiple PPM حساسية PPM الرقمي بدون توسيع النطاق الترددي الكبير. على سبيل المثال، فإن طريقة multiple PPM (12/2) يمكنها تحويل 6 بتات من PCM إلى نبضتي بيانات تستخدمان في 12 حيزاً ضمن الإطار slot-frame، وله معدل خط يساوي ضعف معدل خط PCM. ويمكن لطريقة (15/4) multiple PPM تحويل 10 بتات من PCM إلى ثلاث نبضات بيانات يستخدمون في 15 حيزاً ضمن الإطار، وله معدل خط أكبر من معدل خط PCM بمقدار مرة ونصف [10].

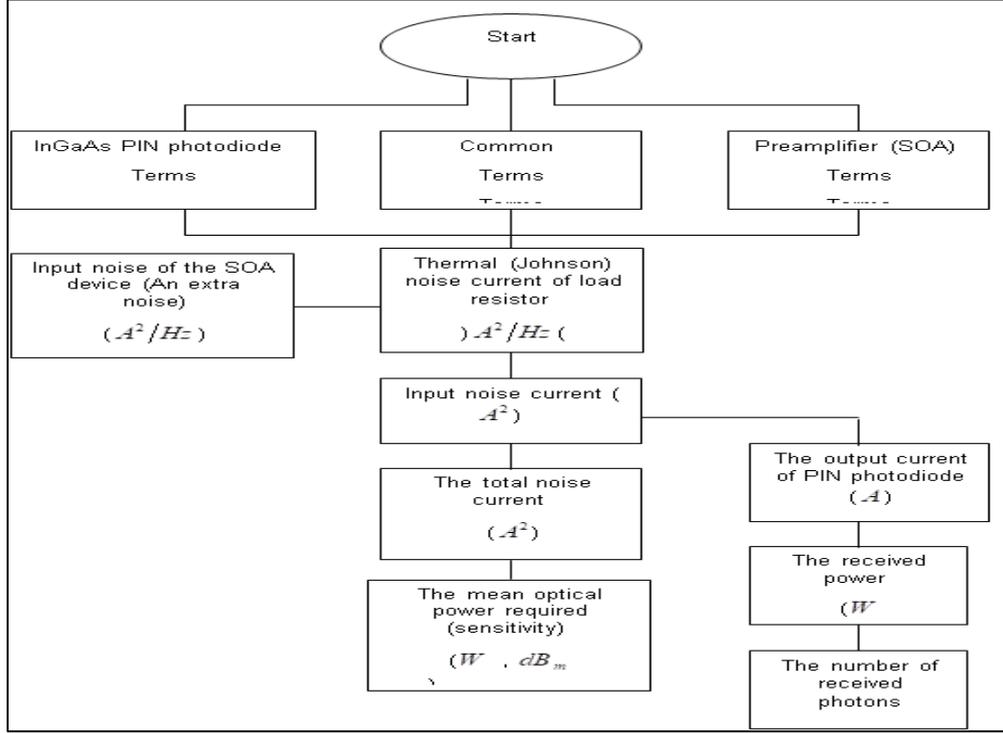
٣- نموذج المحاكاة

تم إجراء هذه المحاكاة باستخدام ثلاثة أنظمة: MPPM, DPPM, Dicode PPM على التوالي. تعمل هذه الأنظمة في الفراغ الحر بطول موجة $1.55\mu\text{m}$ ، ونظام تعديل نبضي مرمز PCM بثلاث بتات، من أجل معدل نقل 1Gbit/s. تم استخدام كواشف InGaAs PIN عالية السرعة ومضخم SOA مع عمليات عالية الطاقة-SOA High Power Operation ككاشف بصري ومضخم على التوالي. يُعدّ المستقبل قناة خطية، ويبين الشكل (١) الدارة المكافئة لمعادل مستقبل بصري.



الشكل (١): الدارة المكافئة لمعادل المستقبل البصري.

ويبين الشكل (٢) المخطط التدفقي للمحاكاة المذكورة أعلاه لكل من MPPM و DPPM و Dicode PPM، على التوالي، اعتماداً على ترميز PCM بثلاث بتات. يوضح الرسم البياني عملية المحاكاة وكيفية الحصول على النتائج:



الشكل (٢): طريقة تدفق المحاكاة من أجل فحص أداء المستقبل البصري المستخدم مع ترميز MPPM و DPPM و Dicode PPM و PCM اعتماداً على ترميز PCM بثلاث بتات.

تم تعديل الكاشف الضوئي بواسطة تيار منبع مثالي I_S ، وسعة الكاشف C_d . يغذى المكون التفرعي من R_{in} و C_{in} ، ويشكل ممانعة الدخل للمضخم. يشكل مضخم جهد، مع تابع نقل $A(\omega)$ ، مضخمات المرحلة السابقة واللاحقة والخرج الذي يغذي مرشح الكشف المسبق. بينما في البداية يتم إهمال ضجيج الكاشف الضوئي وهو الضجيج الوحيد في المستقبل الذي يكون مؤثراً في المضخم. المتوسط التربيعي لتيار ضجيج الدخل (A^2) يعطى بالعلاقة (1) :

$$\langle i_n^2 \rangle_c = \left(S_I + \frac{S_E}{R_{in}^2} \right) B I_2 + (2\pi C_T)^2 S_E B^3 I_3 \quad (1)$$

بينما S_I هي مولد ضجيج المحولة shunt noise generator (A^2/Hz) ، تشكل تيار الضجيج وفقاً لمضخم المرحلة السابقة، ثم مقاومة حمل الكاشف الضوئي S_E . يشكل مولد الضجيج المتسلسل (V^2/Hz) مضخم منبع الضجيج المتسلسل. B هي معدل البت لترميز PCM وتساوي 10^9 بت في الوصلة. C_T هي سعة الدخل الكلية والتي تساوي $(C_d + C_{in})$. I_2 و I_3 هي ثوابت عرض الحزمة والتي تعتمد اعتماداً أساسياً على شكل نبضات الدخل والخرج.

$\alpha = 1$ (حيث α هي الجزء من الحيز الزمني الشغول بواسطة النبضات المستطيلة)، وهكذا تملأ النبضات كامل الحيز وتملك نبضات مستطيلة بعرض كامل NRZ, having full-width or non-return-to zero. قيم $I_2 = 0.564$ و $I_3 = 0.087$ [1]. يمكن ملاحظة أن مضخم ضجيج المرحلة السابقة preamplifier يتألف من ترددات مستقلة frequency-independent term من حجم $S_I (A^2/Hz)$ وضجيج noise term f^2 من حجم $S_E (V^2/Hz)$.

أيًا يكن مولد الضجيج المتسلسل (S_E) فإن له تأثيراً معدوماً في ضجيج المستقبل في الفراغ الحر من أجل معدل معطيات 1Gbit/s بالنسبة إلى PCM لأنها قليلة الأهمية مقارنة بـ S_I و الضجيج الطلقي ل SOA، والتي هي أكبر من S_E . لذلك، متوسط القيمة التربيعية لتيار ضجيج الدخل يعطى بالعلاقة:

$$\langle i_n^2 \rangle_c = S_I B I_2 \quad (2)$$

كما ذكر سابقاً، S_I قمنا بنمذجة تيار الضجيج وفقاً لمضخم أول مرحلة ومقاومة حمل الكاشف الضوئي. بفرض إن مقاومة الحمل للكاشف ($R_L = 50\Omega$) هي أصغر بكثير من ممانعة الدخل للمضخم $R_f = 50 \times 21 = 1050\Omega$ و ربح مضخم SOA $G = 20dB$. بالتالي، فإن الضجيج الحراري لممانعة حمل الكاشف الضوئي تكون أكبر بكثير من مقاومة دخل المضخم. لذلك، مولد الضجيج الطلقي shunt noise S_I generator والذي يُعدّ كمحول الضجيج إلى دخل المضخم SOA من المنبع N_I . ويعطى المتوسط التربيعي لتيار الضجيج الحراري (جونسون) كما يلي:

$$S_I = N_I = \frac{4K_B T}{R_L} = 3.312 \times 10^{-22} \quad (A^2/Hz) \quad (3)$$

حيث ($K_B = 1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$) ثابت بولتزمان ($Kelvin T = 300$) وهي درجة الحرارة المطلقة. يجب الانتباه إلى أن استخدام عدة طرق ترميز مختلفة تتطلب استخدام معدل بت مختلف. بما أن ضجيج الكاشف الضوئي PIN الممثل بواسطة ضجيج تيار الظلام dark current له تأثير معدوم، حيث إن قيمة تيار الظلام تكون صغيرة جداً ($I_D = 1 \times 10^{-9} A$) ، وبذلك تصبح علاقة تيار الضجيج كما يلي:

$$\langle i_n^2 \rangle_T = \langle i_n^2 \rangle_c = \frac{4K_B T}{R_L} B_C I_2 \quad (A^2) \quad (4)$$

حيث B_C هي معدل البت والتي تأخذ قيماً مختلفة ، من أجل ثلاث بتات اعتماداً على PCM وهي $\frac{5}{3}B$ و $\frac{2^3}{3}B$ و $2B$ من أجل MPPM(5,2) و DPPM و Dicode PPM على التوالي.

يوجد ضجيج إضافي من مضخم SOA ويمثل ضجيج الدخل للجهاز نفسه N_A ، ويعطى بالعلاقة:

$$N_A = N_I (F - 1) = 2.3 \times 10^{-21} \quad (A^2/Hz) \quad (5)$$

F هي عامل ضجيج المضخم، ($NF = 10 \log(F) = 9(dB)$) هي معامل ضجيج المضخم (SOA). ومن أجل تحديد حساسية المستقبل البصري المستخدم في الوصلة فإن الاستطاعة البصرية الوسطية المطلوبة تعطى بالعلاقة [1]:

$$P = \frac{Q}{R_o} (\sqrt{\langle i_n^2 \rangle_T} + q B_C I_2 Q) \quad (W, dB_m) \quad (6)$$

Q هو معامل نسبة الإشارة إلى الضجيج ، $Q = 6$ من أجل معدل خطأ 1 في كل 10^9 نبضة. R_o هي حساسية الكاشف الضوئي PIN ($R_o = 0.95$) PIN photodiode (InGaAs) (A/W) يعطى معامل نسبة الإشارة إلى الضجيج بالعلاقة:

$$Q = \frac{I}{\sqrt{\langle i_n^2 \rangle_c}} = \frac{I}{\sqrt{\frac{4K_B T}{R_L} B_C I_2}} \quad (7)$$

حيث $Q = 6$ من أجل معدل خطأ 1 في كل 10^9 نبضة. و $\langle i_n^2 \rangle_c$ معرفة مسبقاً. I هي تيار الخرج للكاشف PIN و يعطى بالعلاقة الآتية:

$$I = Q \sqrt{\frac{4K_B T}{R_L} B_C I_2} \quad (A) \quad (8)$$

تعطى الاستطاعة المستقبلية بالعلاقة:

$$P_o = \frac{I}{R_o} \quad (W) \quad (9)$$

يعطى عدد الفوتونات المستقبلية بالعلاقة:

$$NP = P_o \lambda \frac{T_s}{h.c} \quad (10)$$

λ هي طول الموجة ($\lambda = 1550 \text{ nm}$). h هي ثابت بلانك ($h = 6.624 \times 10^{-34} \text{ JS}$)
 c سرعة الضوء في الخلاء ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) ، T_s الحيز الزمني الذي يأخذ قيم مختلفة من أجل ثلاث بتات من PCM وهي $\frac{T_b}{2}$ ، $\frac{3.T_b}{2^3}$ ، $\frac{3.T_b}{5}$ لأجل MPPM(5,2) و DPPM و Dicode PPM على التوالي.

النتائج والمناقشة

تم إجراء محاكاة من أجل الحصول على النتائج لطرق الترميز الثلاث هذه، ومن أجل معدل خطأ محدد (1) في كل 10^9 نبضة في هذه المحاكاة) كما يتبين من الجدول (1)، ويلخص الجدول (1) نتائج المحاكاة المذكورة. فنلاحظ أن معدل الخط لطريقة MPPM(5,2) هو 1.7 من معدل خط PCM مقارنة مع DPPM والذي يملك معدل خط نهائي هو 2.7 من معدل خط PCM. بينما يملك Dicode PPM معدل خط نهائي ثابت ويساوي ضعف معدل PCM.

الجدول(1):ملخص نتائج المحاكاة من أجل اختبار أداء استخدام المستقبلات البصرية من أجل كل من MPPM, DPPM ,Dicode PPM على التوالي، بترميز ثلاث بتات من PCM.

3 Bits PCM	MPPM	DPPM	Dicode PPM
Final Line Rate	$1.7 \times \text{PCM Data Rate}$ (3 Bits)	$2.7 \times \text{PCM Data Rate}$ (3 Bits)	$2 \times \text{PCM Data Rate}$ (Fixed)
The Total Noise $\langle i_n^2 \rangle_T, (A^2)$	3.113×10^{-13}	4.981×10^{-13}	3.736×10^{-13}
The mean optical power required (sensitivity) (W , dB _m)	$(W) 3.53 \times 10^{-6}$ $(dB_m) - 24.523$	$(W) 4.467 \times 10^{-6}$ $(dB_m) - 23.5$	$(W) 3.867 \times 10^{-6}$ $(dB_m) - 24.126$
Slot Time (S)	6×10^{-10}	3.75×10^{-10}	5×10^{-10}
The number of received photons, NP	1.649×10^4	1.304×10^4	1.506×10^4

ويبين الجدول (1) أن المستقبل البصري يقدم أدنى ضجيج كلي (A^2) 3.113×10^{-13} عند استخدام طريقة ترميز MPPM لأنه يملك أقل سرعة وكذلك يتطلب عرض حزمة أقل.

يملك المستقبل البصري المستخدم مع DPPM ضجيج كلي أعلى (A^2) 4.981×10^{-13} مقارنة مع الضجيج الناتج عن استخدام Dicode PPM المساوي للقيمة (A^2) 3.736×10^{-13} . لأن Dicode PPM يملك سرعة وعرض حزمة أقل مقارنة مع DPPM.

يقدم المستقبل البصري المستخدم مع MPPM أفضل حساسية لأنه يحتاج أقل استطاعة وسطية مطلوبة ($3.53 \times 10^{-6} W$, $-24.523 dBm$) بالإضافة إلى ذلك يملك المضخم المستخدم مع Dicode PPM حساسية أفضل من المستخدم مع DPPM لأنه يحتاج استطاعة بصرية ($3.867 \times 10^{-6} W$, $-24.126 dBm$)، بينما تطلب DPPM استطاعة بصرية بقيمة ($3.867 \times 10^{-6} W$, $-24.126 dBm$).

المستقبل البصري المستخدم مع طريقة ترميز MPPM يملك أكبر عدد من الفوتونات المستقبلية وتساوي 1.649×10^4 فوتون لان MPPM تملك أكبر عرض حيز زمني وقيمه 0.6 (ns)، بينما يملك PPM عرض حيز زمني وقيمه 0.5 (ns)، وبالتالي المستقبل البصري المستخدم مع Dicode PPM يملك عدد فوتونات مستقبلية 1.506×10^4 فوتون، وهي أكثر من تلك المستخدمة مع DPPM والتي تقدر بـ 1.304×10^4 فوتون.

الاستنتاجات والتوصيات المستقبلية

من أجل فحص أداء ضجيج المستقبل البصري المختار قمنا بتحديد حساسيته وعدد الفوتونات المستقبلية، تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية باستخدام MCAD والتي نفذت على ثلاث طرق ترميز مختلفة اعتماداً على التعديل النبضي المرمز PCM بثلاث بتات وهي: تعديل موقع النبضة المتعدد MPPM، تعديل موقع النبضة الرقمي DPPM، و Dicode PPM.

تظهر النتائج أن MPPM هي الطريقة الأفضل لأنها تملك أقل سرعة وبالتالي متطلبات عرض حزمة أقل. وتستخدم ضمن المستقبلات البصرية التي تحتوي كاشف PIN كاشفاً ضوئياً، وتستخدم SOA مضخماً، ومرشح Butterworth من المرتبة الثالثة مع دائرة كشف قرار مركزية، يمكن استخدام MPPM في الوصلات بين المستقبلات البصرية من أجل معدل نقل PCM يساوي 1Gbit/s.

المراجع

- [1] Sibley, M. J. N. (1995). *Optical Communications* (2nd Ed). Houndmills, Basingstoke, Hampshire RG21 2XS, and London: The Macmillan Press LTD.
- [2] Keiser, G. (2000). *Optical Fibre Communications* (3rd Ed). McGraw-Hill Higher Education: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] Ducellier, T., Goix, M., Hebert, J.P., Legouezigou, O., N"Go, R., Pommereau, F., Tschertner, N., Pasquier, J., Gaborit, F., Pagnod, P., Gard, E., Artigaud, S., Blanconnier, P. and Giraudet, L. (2007). *Compact high sensitivity 10 Gbit/s SOA-filter-pin receiver module*. Electronics Letters, vol. 33, No.6, 509-510.

- [4] INPHENIX, Inc., Application Instruction (2004, September). *The Enhanced Functionalities of Semiconductor Optical Amplifiers and their Role in Advanced Optical Networking*.
- [5] Legros, E., Barrou, Th., Vuye, S., Giraudet, L., Joly, C., Blache, F., Ducellier, T. & Goix, M. (1998, 20-24 September). *High-sensitivity high-gain SOA-filter-PIN-PHEMT 40-Gb/s photoreceiver*. Optical communication, *European Conference*. Volume 1, Issue, 20-24 Sep 1998 Page(s) 69-70 vol.1
- [6] Xia, F., Wei, J., Menon, V. & Forrest, S.R. (2003). *Monolithic integration of a semiconductor optical amplifier and a high bandwidth p-i-n photodiode using asymmetric twin-waveguide technology*. *Photonics Technology Letters, IEEE*. Volume 15, Issue 3,
- [7] Sysak, M.N., Barton, J.S., Johansson, L.A., Raring, J.W., Skogen, E.J., Masanovic, M.L., Blumenthal, D.J. & Coldren L.A. (2004, September). *Single-chip wavelength conversion using a photocurrent-driven EAM integrated with a widely tunable sampled-grating DBR laser*. *Photonics Technology Letters, IEEE*. Volume 16, Issue 9, Page(s):2093 – 2095.
- [8] Shiu, K.-T., Agashe, S.S. & Forrest, S.R. (2006, April). *A simple monolithically integrated optical receiver consisting of an optical preamplifier and a p-i-n photodiode*. *Photonics Technology Letters, IEEE*. Volume 18, Issue 8, April 2006 Page(s):956 – 958
- [9] Sibley, M. (2004, December). *Analysis of multiple pulse position modulation when operating over graded-index plastic optical fiber*. *IEEE proc –Optoelectron.*, Vol. 151 , No. 6.
- [10] Ghosna, F. J, and Sibley, M. (2010, February). *Pulse position modulation coding schemes for optical intersatellite links*. *IET- Electronics letters.*, Vol. 46, No.4, pp. 290-291.
- [11] Sibley, M.J.N.(2004) 'Sub-optimal filtering in a zero guard, dicode PPM system operating over dispersive optical channels', *IEE Proc., Optoelectron.*, **151**, pp. 237-243.
- [12] A. M. Buhafa, B. M. Al-Nedawe, M. J. Sibley, and P. J. Mather.(2014), "VLC system performance using Dicode Pulse Position Modulation over an indoor diffuse link," *Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, , pp. 605-608. in
- [13] N. Chi, H. Haas, M. Kavehrad, and T. D. Little(2015), "Visible light communications: demand factors, benefits and opportunities [Guest Editorial]," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 22, pp. 5-7.
- [14] S. Arnon(2015);, *Visible light communication*: Cambridge University Press.
- [15] Shalaby, H.M.H.: 'A performance analysis of optical overlapping PPM-CDMA communication systems', *IEEE J. Lightw. Technol.*, 1999, **17**, (3), pp. 426-434.
- [16] I. Ray, M. J. Sibley, and P. J. Mather(2015), "Spectral characterisation of offset pulse position modulation," *IET optoelectronics*, vol. 9, pp. 300-306.