

تحليل أداء نظام QPSK الضوئي المترابط

الباحث

م. رعد محمد فايز الألفي
طالبة دراسات عليا - دكتوراه
إشراف د.م. عبد الكريم السالم

مُلخَص:

تستخدم تقنيات التعديل المتقدم والكشف المترابط لفعاليتها ومقدرتها الكبيرة في تحسين أداء الشبكات والأنظمة الضوئية عموماً لمواجهة التزايد الكبير في حركة البيانات. تم في هذا البحث دراسة تحسين أداء نظام الاتصالات الضوئية من خلال الكشف المترابط ومعالجة الإشارة الرقمية. حيث تمت المقارنة بين نظام اتصال QPSK ضوئي مترابط بدون استخدام معالجة الإشارة الرقمية ونظام يعتمد على المعالجة الرقمية للإشارة Digital Signal Processing DSP، وذلك عند معدلات إرسال متشابهة للبيانات 50 Gb/s، ودون استخدام أية عناصر تضخيم حيث تمت المقارنة باعتماد محددات الأداء مثل معدل خطأ البت BER ومخططات التوضع الفراغي وعامل الجودة Q-factor ومخطط العين Eye Pattern. بينت المحاكاة باستخدام منصة المحاكاة OptiSystem 19 تفوقاً واضحاً في معظم معايير الأداء المدروسة للنظام الضوئي المترابط باستخدام معالجة الإشارة الرقمية DSP على ذلك الذي لا يستخدم أي آليات معالجة.

الكلمات المفتاحية: نظام اتصال ضوئي مترابط، معالجة الإشارة الرقمية، QPSK، مخطط العين، محاكاة OptiSystem.

- (1) طالبة دراسات عليا-قسم هندسة الاتصالات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة البعث.
- (2) أستاذ في قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة البعث.

Performance analysis of QPSK optical coherent communication system

Researcher

Eng. Raghad Mohammad Fayez Al.Alfi

Supervision

Dr.Eng. Abdulkarim Assalem

Abstract:

Advanced Modulation and Coherent Detection are the key technologies to meet the bandwidth requirements of optical fiber networks. This research included an analytical study for improving the performance of the optical communication system by using coherent detection and digital signal processing. In this work, a comparison was made between a coherent QPSK optical communication system without using any type of digital signal processing and a system based on DSP, both of which operate at the same data transmission rate of 50 Gb/s, and without the use of any amplification elements. Results were analysed and compared using metrics such as BER, Eye Pattern, Q-factor and the constellation diagram. Results using Optisystem platform showed good and clear improvement for all performance indicators such as BER and constellation diagram for coherent QPSK optical communication system with digital signal processing.

Keywords:

Coherent optical communication system, DSP, QPSK, Eye diagram, OptiSystem simulation.

(1) Doctora Student – Communications Engineering Dept. Faculty of Mech. and Elec. Eng-AlBaath Univ.

(2) Prof. in Electronics and Communications Engineering Dept. Faculty of Mech. and Elec. Eng-AlBaath Univ

1- مُقدّمة:

يتزايد الاهتمام والتحول نحو الأنظمة والشبكات الضوئية نظراً لفعاليتها ومقدرتها العالية في مواجهة الطلب المتزايد على عرض الحزمة لدعم متطلبات التطبيقات الجديدة من جودة خدمة وقيود ومعايير صارمة تفرضها أنظمة 5G، وتعتبر الأنظمة الضوئية المترابطة أكثر هذه الأنظمة مقدرةً على مواجهة هذه المتطلبات حيث لم تعد الأنظمة التقليدية التي تعتمد الكشف المباشر تلبّي حاجة اتصالات الألياف الضوئية لمسافة الإرسال وعرض المجال الترددي الكبيرين، ويعد الكشف المترابط الطريقة الرئيسية لتحقيق نقل البيانات بالمتطلبات الجديدة للسعة والسرعة باستخدام أنظمة الاتصال الضوئي المترابط [1].

تعد الأنظمة الضوئية المترابطة حلاً مناسباً للوصول لاستغلال عرض المجال الترددي بصورة أفضل، وزيادة مسافة الإرسال وتحسين حساسية المستقبل، وذلك لأن الاتصال الضوئي ذو الكشف المترابط يحقق حساسية أعلى من الكشف المباشر بالتالي معدلات نقل مع كفاءة طيفية عالية، حيث يستخدم تعديل الطور أو السعة أو الاستقطاب للحامل الضوئي لنقل البيانات.

2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة وتحسين أداء أنظمة الاتصالات الضوئية من خلال استخدام تقنية الكشف المترابط ومعالجة الإشارة الرقمية، باستخدام التعديل QPSK.

3- مواد وطرق البحث:

يعتمد البحث على الدراسة التحليلية للكشف المترابط في المجال الضوئي وكذلك دراسة المكونات الرئيسية لنظام الاتصالات الضوئي المترابط، باستخدام برنامج OptiSystem كبرنامج متخصص بمحاكاة أنظمة الاتصالات الضوئية وذو موثوقية عالية ومكتبات واسعة جعلته من أهم برمجيات المحاكاة المستخدمة في دراسة أنظمة الاتصالات الضوئية.

3.1 - الكشف المترابط:

قدم DeLange أول نظام اتصال ضوئي مترابط يطبق تعديل الطور في أوائل السبعينيات ولكن لم يحظ هذا النظام بقدر كبير من الاهتمام بسبب عدم استقرار التردد وضجيج الطور المرافق لعمل المصادر الليزرية. إضافة إلى ذلك، كان نظام الاتصال الضوئي الذي يعتمد على تعديل الشدة Intensity Modulation (IM) لليزر والكشف المباشر Direct Detection (DD) باستخدام الكاشف الضوئي هو التقنية الرئيسية في ذلك الوقت. في أوائل الثمانينيات تم إجراء مقارنة بين نظام ضوئي بسيط مترابط يعتمد على الإقفال بإزاحة الطور PSK والأنظمة البصرية التي تعتمد على الكشف المباشر IM-DD حيث بينت الدراسة أن النظام المترابط يحسن حساسية المستقبل ويزيد مسافة الإرسال.

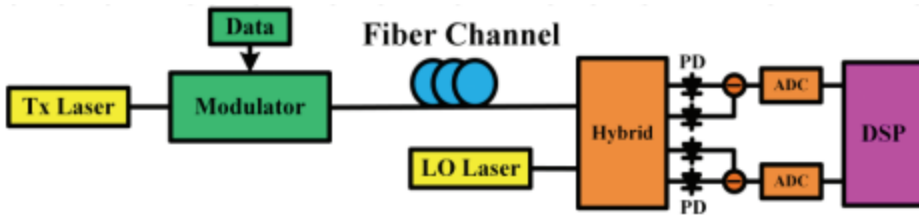
مع تزايد أهمية الشبكات الضوئية كناقل رئيسي لحركة البيانات المتزايدة حظي الإرسال الضوئي المترابط باهتمام واسع نظراً لقدرته العالية على نقل معدلات بيانات عالٍ وكفاءة طيفية عالية ومسافة إرسال طويلة، كما أنه يمكن أن يتم في الأنظمة المترابطة استخدام معالجة الإشارة الرقمية DSP للتقليل من القيود التي تعيق أداء الأنظمة الضوئية مثل التشتت اللوني Chromatic Dispersion (CD) وتشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion (PMD)، وذلك مقارنةً بأنظمة الكشف المباشر [3.6].

المبادئ الأساسية للكشف المترابط:

يعتبر الكشف المترابط أكثر مرونة ومقدرة للكشف وخاصة عند مستويات منخفضة للإشارات المستقبلية مع شفافية عالية لصيغ التعديل والترميز الرقمية المتقدمة. يستخدم نظام الاتصال الضوئي المترابط تعديلاً مترابطاً في المرسل وتقنية الكشف المترابط في

المستقبل. بالمقارنة مع نظام الاتصال التقليدي IM-DD، يتيح الاتصال الضوئي المترابط مسافة إرسال أطول وجودة اتصال أفضل.

يوضح الشكل (1) مخططاً لنظام اتصال ضوئي مترابط. حيث يتم في طرف الإرسال، تعديل إشارة الحامل الضوئي بإشارة المعلومات بأحد أشكال التعديل (تعديل السعة، تعديل الطور، أو تعديل التردد) ثم إرسالها. وفي طرف الاستقبال يتم ضرب الإشارة المستقبلية مع إشارة المهتز المحلي (أي مع إشارة الحامل) من خلال المازج ثم يتم الكشف عنها باستخدام كواشف ضوئية متوازنة Balanced photodiode. ومن ثم تتم معالجة الإشارة باستخدام آليات معالجة الإشارات الرقمية DSP واستعادة البيانات المرسل [1].



الشكل (1): مخطط نظام اتصال ضوئي مترابط [1].

3.2 - تكوين نظام اتصال ضوئي مترابط:

يتكون نظام الاتصال الضوئي المترابط من ثلاثة أجزاء أساسية: مرسل ضوئي مترابط، ووصلة ضوئية، ومستقبل ضوئي مترابط. مع ضرورة الحفاظ على استقطاب متمائل للحامل المرسل مع الحامل المهتز المحلي في طرف الاستقبال وذلك من أجل الحصول على حساسية استقبال عالية، وإلا فإن حساسية الكشف المترابط ستكون منخفضة إلى حد كبير. لذلك، ومن أجل الاستفادة الكاملة من فوائد الاستقبال المترابط، يتم اتخاذ تدابير مناسبة لتثبيت الاستقطاب، حيث يمكن أن تستخدم في الوصلة الضوئية

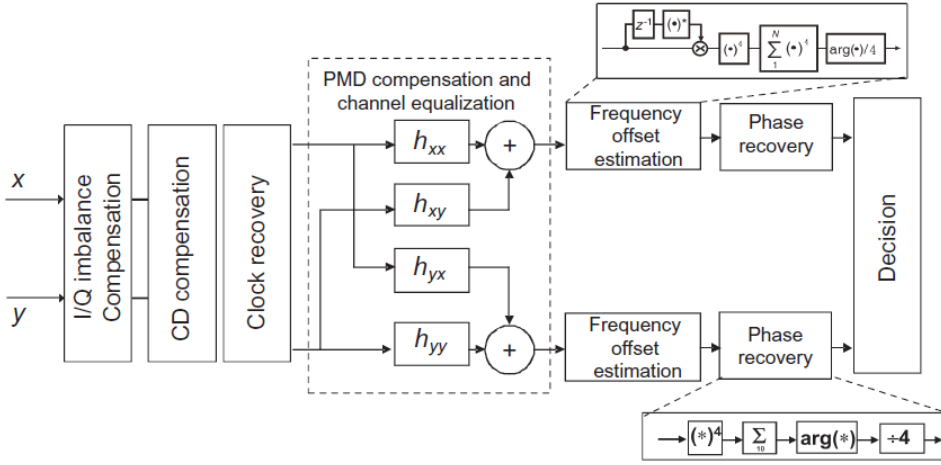
الألياف التي تحافظ على الاستقطاب من أجل المحافظة على حالة استقطاب الحامل الضوئي دون تغيير .

يتم في المستقبل تمرير الإشارة الضوئية الناتجة عن المازج على كواشف ضوئية متوازنة (Balanced photodiode(PD) لنحصل بعدها على إشارات تشابهية، تحول إلى إشارات رقمية، ويتم استعادة البيانات في معالج الإشارة الرقمية DSP [8.11].

3.3 - وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP:

يمكن أن يتم الكشف المترابط من خلال المازج لضرب الإشارة المستقبلية مع إشارة المهتز المحلي، بعد ذلك يقوم الكاشف الضوئي بتحويل الإشارات الضوئية إلى إشارات كهربائية (I/Q) في استقطابي X و Y [8].

يتم بعد ذلك تحويل الإشارة الكهربائية إلى إشارة رقمية يمكن معالجتها باستخدام آليات معالجة الإشارة الرقمية DSP. يبين الشكل (2) وحدة معالجة الإشارة الرقمية الأساسية (DSP) لاستعادة البيانات. يعتبر عموماً إرسال الإشارة بمعدلات عالية على مسافات طويلة من أهم التحديات التي تواجه تصميم الشبكات الضوئية، لذلك تستخدم معالجة الإشارة الرقمية DSP ضمن المستقبل، يمكن تقسيم DSP إلى عدة أنظمة أو وحدات فرعية، تستخدم للمعالجة والتعويض عن الآثار غير الخطية التي تسبب تشوه الإشارة أثناء النقل مثل التشتت اللوني CD، وتشتت نمط الاستقطاب PMD، وضجيج الطور (Phase Noise (PN). مما يساهم في تقليل معدل خطأ البت والوصول لأنظمة ضوئية ذات جودة وموثوقية عالية في نقل البيانات [6].



الشكل (2): المخطط الصندوقي لوحدة DSP الأساسية في المستقبل الضوئي المترابط [7.8].

من الناحية النظرية، يجب أن تكون إشارات I و Q المستقبلية متعامدة مع بعضها البعض. ولكن عملياً قد لا تكون هذه الإشارات متعامدة مع بعضها بسبب بعض الاختلالات التي يمكن أن تكون ناتجة عن خلل في المُعدلات أو PDs. لذلك من أجل استعادة الإشارة بشكل صحيح، يجب تطبيق تعويض عدم التوازن I / Q أولاً على الإشارات الرقمية ويمكن تنفيذ هذه العملية باستخدام خوارزمية Gram-Schmidt Orthogonalization Process (GSOP)، وتعد خوارزمية GSOP طريقة فعالة لتحويل عينات البيانات غير المتوازنة أو غير المتعامدة إلى عينات بيانات متوازنة ومتعامدة.

بدوره يعتبر التشنت اللوني CD يعتبر أحد العوامل الأساسية التي تسبب تراجع أداء نظام الاتصالات الضوئية لذلك يتم في وحدة معالجة الإشارة DSP تعويض التشنت اللوني CD compensation. وبما أنه يمكن تمثيل استجابة القناة للألياف المزودة بالتشنت اللوني كدالة خطية، يمكن تحقيق تعويض التشنت اللوني في المجال الترددي

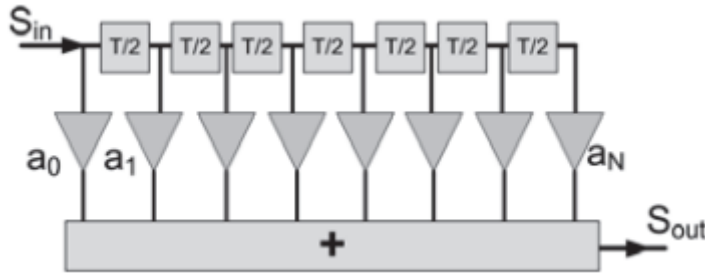
بناءً على تابع النقل أو في المجال الزمني باستخدام مرشح استجابة نبضية محدودة [8].FIR

في المجال الزمني، يمكن الحصول على معاملات المرشح المطلوبة FIR بواسطة تابع نقل التشتت اللوني لليف الضوئي باستخدام طريقة تقسيم المجال الزمني. ويبين الشكل (3) بنية مرشح FIR لتعويض التشتت اللوني، ويمكن حساب معامل FIR لكل ذراع أو فرع a_k بالمعادلات التالية:

$$a_k = \sqrt{\frac{j c T^2}{D \lambda^2 z}} \exp\left(-j \frac{\pi c T^2}{D \lambda^2 z} k^2\right), \quad -\left[\frac{N}{2}\right] \leq k \leq \left[\frac{N}{2}\right] \quad (1)$$

$$N = 2 \times \left\lceil \frac{|D| \lambda^2 z}{2 c T^2} \right\rceil + 1 \quad (2)$$

حيث D هو معامل التشتت، λ الطول الموجي، z طول الليف، c سرعة الضوء، T فترة الرمز، k ترتيب الفرع للمرشح، و N هو العدد الإجمالي لأفرع FIR. [2].

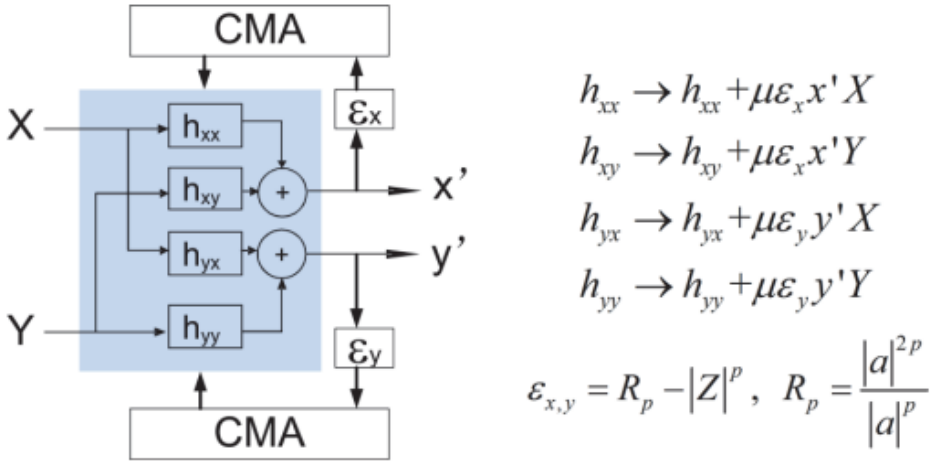


الشكل (3): بنية مرشح FIR لتعويض التشتت اللوني [8].

يتم بعد ذلك في وحدة معالجة الإشارة الرقمية تخمين الخطأ الزمني وتصحيحه (clock recovery) الناتج عن إزاحة الزمن التي قد تسببها المبدلات التشابكية الرقمية

وذلك باستخدام خوارزميات استعادة الزمن مثل خوارزمية square-timing وخوارزمية Gardner-timing وهي مستخدمة بشكل واسع في الأنظمة المترابطة الرقمية [8].

المرحلة التالية في وحدة DSP هي تعويض تشتت نمط الاستقطاب PMD، ويتم فيها استخدام معادلات الفراشة التكيفية الأربعة إضافةً إلى خوارزمية المعامل الثابت Constant Modula Algorithm (CMA) لإزالة الاستقطاب وتعويض PMD. ويوضح الشكل (4) مبدأ استعادة الإشارة بواسطة المعادلات التكيفية بناءً على خوارزمية CMA [8].



الشكل (4): المخطط الصندوقي لخوارزمية CMA [8].

وتعتبر خوارزمية CMA نوع من الخوارزميات المعدلة العمياء تستخدم لتحديث معاملات أوزان المرشح FIR وذلك من أجل التقليل من قيمة خطأ تابع الخرج. يعتبر الدخلان X و Y إشارات منحازة الاستقطاب، وإشارات الخرج X' و Y' إشارتين مستقطبتين متعامدتين يتم تمثيلهم بالمعادلات التالية:

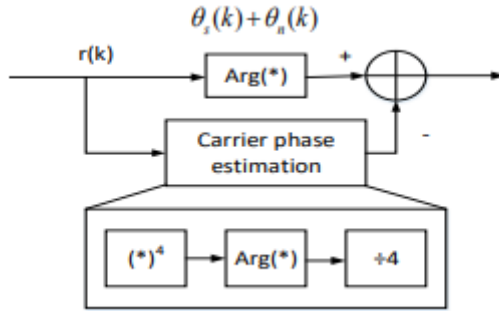
$$X' = h_{xx} \otimes X + h_{xy} \otimes Y \quad (3)$$

$$Y' = h_{yx} \otimes X + h_{yy} \otimes Y \quad (4)$$

أخيراً يتم في وحدة معالجة الإشارة الرقمية استعادة الموجة الحاملة من خلال خطوتين وهما تعويض انزياح التردد ثم استعادة طور الحامل. ويجب أن تتم عملية تعويض انزياح التردد بين ليزر المرسل والهزاز المحلي في المستقبل قبل استعادة طور الحامل. توجد خوارزمتان رئيسيتان لتعويض انزياح التردد تعتمد الأولى على طرق الطور التفاضلي، وتعتمد الثانية على الطرق الطيفية باستخدام تحليل فورييه. أما بالنسبة لاستعادة طور الحامل فهناك العديد من خوارزميات استعادة طور الحامل Carrier Phase Recovery (CPR) نذكر منها خوارزمية فيتري-فيتري V-V وخوارزمية البحث الأعمى عن الطور Blind Phase Search (BPS). يبين الشكل (5) المخطط الصندوقي لخوارزمية فيتري-فيتري، وهي الخوارزمية الأكثر استخداماً لاستعادة الطور من أجل تعديل QPSK. ويمكن أن نعرف إشارة QPSK المستلمة من خلال المعادلة (5):

$$r(k) = Ae^{j(\theta_s(k)+\theta_c(k))} \quad (5)$$

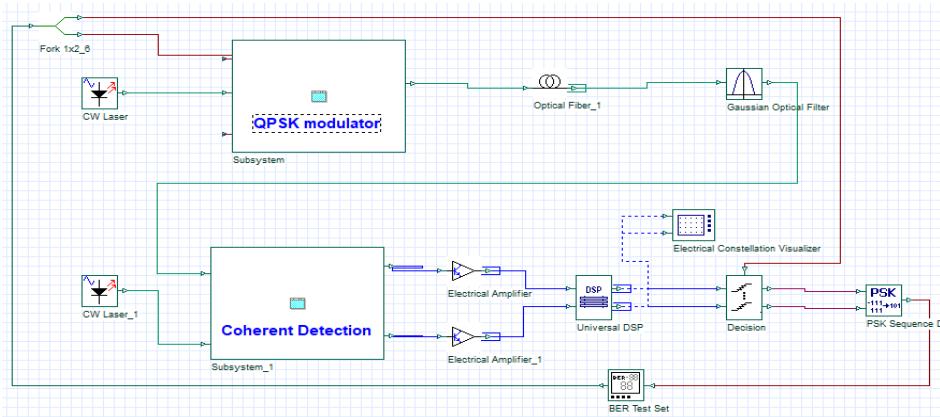
حيث θ_c تمثل طور الحامل، θ_s تمثل فرق الطور [9].



الشكل (5): المخطط الصندوقي لخوارزمية فيتري-فيتري [9].

4- نموذج المحاكاة:

تم نمذجة النظام الضوئي المترابط وتحليل أدائه باستخدام برمجية OptiSystem حيث يبين الشكل (6) المخطط العام للنموذج المدروس والذي يمثل نظام اتصالات ضوئي مترابط بمعدل إرسال 50Gb/s، باستخدام تعديل QPSK في الحالة الأولى وباستخدام تعديل QPSK وبالاعتماد على تقنية معالجة الإشارة الرقمية في الحالة الثانية. يلاحظ من الشكل (6) أن الأجزاء الرئيسية للمخطط هي المرسل، الليف الضوئي أحادي النمط، المستقبل المترابط، وحدة معالجة الإشارة الرقمية (التي ستم إضافتها في الحالة الثانية من المحاكاة) وفاق التعديل والكشف.



الشكل (6): المخطط العام لنظام QPSK.

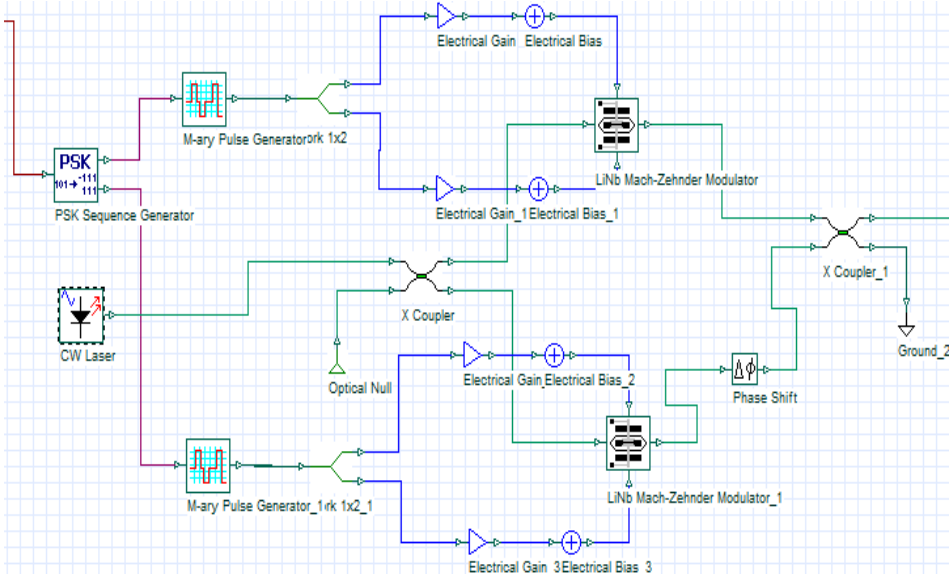
4-1 مرسل QPSK الضوئي:

يبين الجدول (1) أهم بارامترات المنبع الليزري المستخدم في المحاكاة حيث تم اختيار طول موجة الحامل 1550 nm بما يتوافق مع أقل تخامد لانتشار للأمواج الضوئية ضمن الليف، وكذلك تم تحديد قيمة الطاقة 10dBm وتم اختيار العرض الطيفي للمنبع [11] 0.1 MHz .

الجدول (1): بارامترات المنبع الليزري.

المحدد	القيمة
التردد	193.1 THz
الطاقة	10 dBm
عرض الخط	0.1 MHz

يمثل الشكل (7) معدل QPSK المكون من مولد سلسلة PSK لتوليد سلسلتي رمز M-ary متوازيتين من الإشارات الثنائية اعتماداً على تعديل إزاحة الطور PSK باستخدام 2 bit لتمثيل كل رمز. بعد ذلك، تمر الإشارات من خلال مولد نبضي M-ary لتوليد نبضات متعددة المستويات وفقاً لمصفوفة إشارة الدخل M-ary، ثم يتم تعديل كل إشارة من قبل معدل Mach-Zehnder وتجمع الإشارتين معاً لتشكيل إشارة QPSK.



الشكل (7): معدل QPSK.

4-2 قناة الاتصال الضوئية:

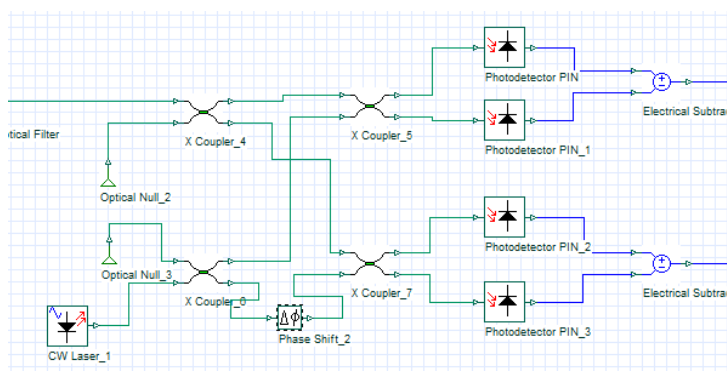
يتم إرسال الإشارة في ليف ضوئي أحادي النمط SMF يمثل قناة الاتصال، يوضح الجدول (2) أهم بارامترات المحاكاة لقناة الألياف الضوئية. مع ملاحظة أنه لم تستخدم المضخمات الضوئية لتعويض التخماد.

الجدول (2): بارامترات الليف الضوئي.

المحدد	القيمة
ثابت التخماد	0.2 dB/km
معامل التشتت اللوني	16.75 ps/(nm.km)
معامل الانحدار	0.075 ps/(km.nm ²)
معامل تشتت نمط الاستقطاب	0.004 ps/√km

4-3 المستقبل المترابط:

يشتمل المستقبل الضوئي المتماسك على منبع ليزري CW، يتم فك تعديل الإشارة المستقبلية باستخدام مستقبل QPSK الموضح في الشكل (8).



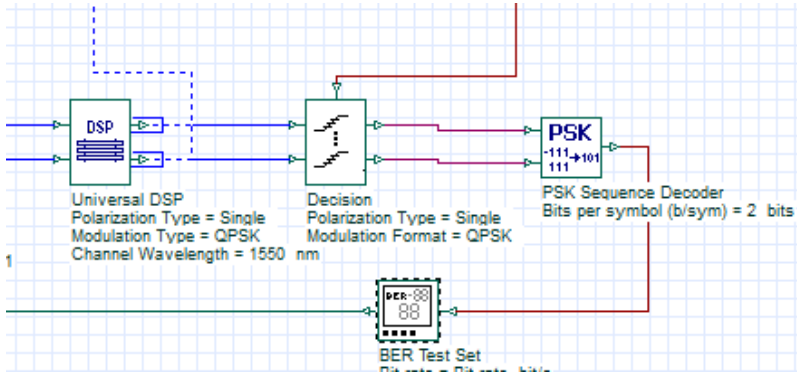
الشكل (8): مستقبل QPSK المترابط.

4-4 معالجة الإشارة الرقمية:

بعد عملية الكشف المترابط تتم معالجة الإشارة الناتجة من خلال وحدة معالجة الإشارة DSP من أجل تعويض الآثار غير الخطية في المجال الرقمي، ومما يساعد في استعادة أفضل للإشارة المرسله بعد الكشف المترابط.

4-5 الكشف وفك الترميز:

تصل الإشارة إلى وحدة اتخاذ القرار حيث يقوم بمعالجة الإشارة القادمة من مرحلة DSP، بعد ذلك يقوم فاك الترميز بفك ترميز سلسلتي الرموز إلى إشارات ثنائية، كما هو موضح في الشكل (9).

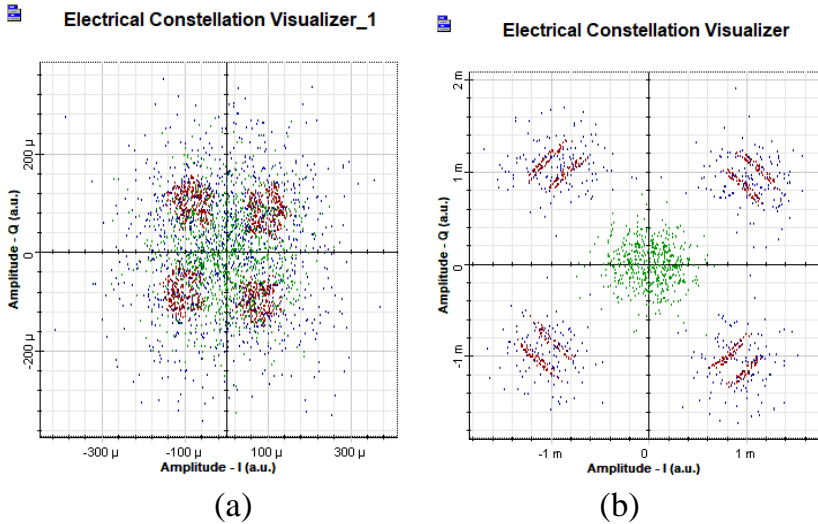


الشكل (9): الكشف وفك الترميز.

5. النتائج والمناقشة:

تم في هذا البحث، محاكاة نظام الاتصال الضوئي المترابط QPSK ودراسة أداء النظام واختباره في حالة استخدام وحدة معالجة الإشارة الرقمية وبدونها وتقييم أداء النظام من خلال معدل الخطأ في البت BER، ومخطط التوضع الفراغي للإشارة المستقبلية ومخطط العين.

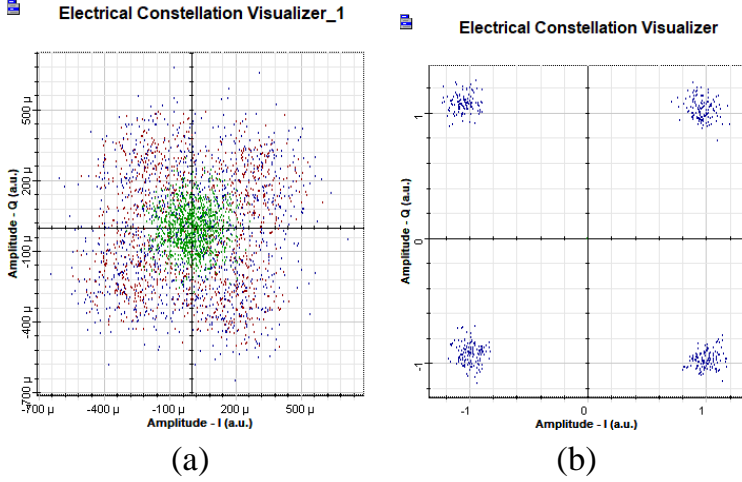
يبين الشكل (10) مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK بدون استخدام DSP، حيث يوضح الشكل (10-a) إشارة QPSK المستقبلية قبل ترشيحها أو معالجتها بينما يبين الشكل (10-b) مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK بعد عملية الترشيح ويمكن ملاحظة أن مخطط التوضع الفراغي هذا مازال متأثراً بالضجيج الواضح في منتصف مخطط التوضع الفراغي، إضافة إلى وجود انحرافاً واضحاً للإشارة وذلك عند أطراف مخطط التوضع الأربعة لإشارة QPSK.



الشكل (10): مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK بدون استخدام DSP (a) بعد مستقبل QPSK (b) بعد تكبير الإشارة وترشيحها.

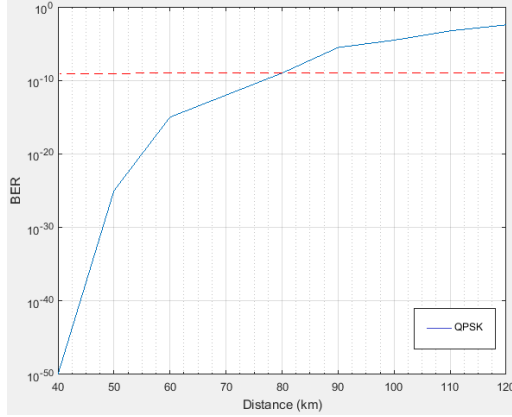
تم بعد ذلك استخدام وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP ودراسة أداء النظام حيث يبين الشكل (11) مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK المستقبلية وذلك في حالة استخدام وحدة معالجة الإشارة الرقمية في نظام الاتصال الضوئي. حيث يوضح الشكل (11-a) إشارة QPSK المستقبلية قبل معالجتها بينما يبين الشكل (11-b) مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK بعد وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP، حيث يلاحظ أن التوزيع العام لنقاط التوضع في المخطط أصبح أكثر وضوحاً وتركيزاً، تعمل وحدة

DSP على معالجة الضجيج وتقليل آثاره كما يظهر واضحاً أثر ذلك في وضوح المخطط في الشكل (11-b).



الشكل (11): مخطط التوضع الفراغي لإشارة QPSK (a) بعد مستقبل QPSK (b) بعد وحدة DSP.

بالمقارنة بين مخططي التوضع الفراغي يمكن أن نلاحظ أنه في الشكل (10-b) الإشارة تتأثر بشدة بالضجيج وستكون ذات معدل خطأ مرتفع، في المقابل في الشكل (11-b) يصبح توزيع الإشارة الفعلي العام أكثر تركيزاً، وينخفض الضجيج بشكل كبير ومنه يكون معدل خطأ البت منخفض. بالتالي نستنتج أن وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP تقلل من معدل خطأ البت في نظام تعديل QPSK وتحسن كفاءة الإرسال للاتصال الضوئي المترابط، مقارنة مع الحالة السابقة بدون استخدام وحدة DSP. تم أيضاً اختبار أداء النظام في حالة استخدام وحدة DSP لمعرفة مسافة الإرسال الممكنة التي تضمن جودة عالية ومعدلات خطأ منخفضة، حيث تم إرسال الإشارة في قناة الاتصال ذات البارامترات الموضحة في الجدول (2) ولكن مع طول متغير (40-120 Km)، ويوضح الشكل (12) معدل خطأ البت BER مع طول الليف الضوئي.

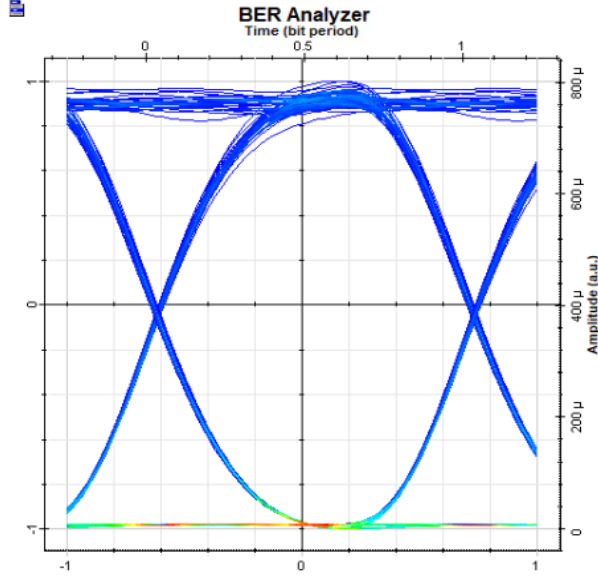


الشكل (12): تغيرات معدل BER مع طول الليف الضوئي.

يلاحظ من الشكل (12) أن النظام يقدم أداءً جيداً لمسافة تصل حتى 70 Km تقريباً حيث كان معدل خطأ البت مساوياً تقريباً لـ 10^{-12} ، بينما نلاحظ زيادة في قيمة BER وبالتالي تناقص مستوى أداء النظام للمسافات التي تتجاوز 80 Km وذلك بدون استخدام أي عناصر تضخيم على طول الوصلة الضوئية. ويوضح الشكل (13) مخطط العين إضافة لقيمة عامل الجودة Q-factor وذلك من أجل ليف ضوئي بطول 70 Km، حيث بلغت قيمة عامل الجودة $Q\text{-factor}=6.8$ عند قيمة BER مساوية لـ 5.19×10^{-12} .

12

Max. Q Factor	6.80067
Min. BER	5.19801e-012



الشكل (11): مخطط العين لنظام QPSK عند مسافة 70Km.

6. الاستنتاجات:

تم في هذا البحث دراسة أداء نظام QPSK الضوئي المترابط واختباره في حالة استخدام وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP وبدونها، وقد بينت نتائج الدراسة:

- تساعد وحدة معالجة الإشارة الرقمية في أنظمة الاتصال الضوئية المترابطة في تعويض الآثار الخطية وغير الخطية مثل التشوهات اللونية وتشتت نمط الاستقطاب وانزياح التردد والضجيج الطوري مما يساعد في استعادة أفضل للبيانات المرسلة ومعدلات خطأ BER منخفضة بحدود 10^{-12} وبالتالي أنظمة اتصال ذات جودة وموثوقية عالية.

- تمت المقارنة بين أداء نظام QPSK في حالة استخدام DSP وبدونها، وبالمقارنة بين مخططي التوضع الفراغي يلاحظ تفوق النظام باستخدام DSP حيث تم معالجة الضجيج وتقليل آثاره بشكل واضح.
- تم اختبار أداء نظام QPSK باستخدام DSP لمعرفة المسافة التي يمكن أن تسلكها الإشارة بجودة عالية، حيث تم تحقيق قيمة جيدة لمعدل BER مساوية لـ 10^{-12} وذلك حتى مسافة 70 km وذلك بدون استخدام أي عناصر تضخيم على طول مسار الليف الضوئي.

المراجع:

- [1] ATianhua Xu, 2017- **Digital Signal Processing for Optical Communications and Networks**. Licensee InTech.
- [2] Ambreen Niaz, Farhan Qamar, Khawar Islam, Asim Shahzad, Romana Shahzadi, Mudassar Ali, 2018- **Performance Analysis and Comparison of QPSK and DP-QPSK Based Optical Fiber Communication Systems**. ITEE Journal.
- [3] Darli Augusto de Arruda Mello, Fabio Aparecido Barbosa, 2021- **Digital Coherent Optical Systems**. Springer.
- [4] Dr. Shehab A. Kadhim, Dr. Zeyad A. Saleh, Asmaa M. Raof, Alaa T. Lateef, 2016- **Design Study and Simulation of a Digital Fiber Communication System Using (Optisystem.10)**. IJESRT.
- [5] Ioannis Roudas, 2012- **Coherent Optical Communication Systems** Springer Science.
- [6] Jian Zhao, Yaping Liu and Tianhua Xu, 2019- **Advanced DSP for Coherent Optical Fiber Communication**. Applied sciences.
- [7] Jianjun Yu, Junwen Zhang, 2016 - **Recent progress on high-speed optical transmission**. Elsevier.
- [8] Jianjun Yu, Xinying Li and Junwen Zhang, 2022.- **Digital Signal Processing for Optical Coherent Long-Haul Transmission System**. World Scientific.
- [9] Jiaoyang Liu, 2019- **Research on Carrier Recovery Algorithm in Coherent Optical Communication System**. IOP Conf. Ser.: Earth Environ.
- [10] Kazuro Kikuchi, 2008- **Coherent optical communication systems**. Elsevier Inc.
- [11] Mingyang, Li Man Feng, Pengyuan Chen, Zhenping Lan, Ping Li, 2021- **The simulation of coherent optical communication technology**. University Dalian.
- [12] Piaokun Zhang, Zhongwei Tan, Zhichao Ding, Lijun Guo, 2021- **Simulation Analysis of Balance Detection Technique in Coherent Optical Receiver**. Optics and Photonics Journal.
- [13] Piaokun Zhang, Zhongwei Tan, Zhichao Ding, Lijun Guo, 2021- **Simulation Analysis of Balance Detection Technique in Coherent Optical Receiver**. Optics and Photonics Journal.