

## استخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية لتحسين أداء نظم الاتصالات الضوئية المتماسكة عالية السرعة

علي أحمد \*

محمد نصر \*\*

ريم أحمد أسعد \*\*\*

(تاريخ الإيداع 13 / 9 / 2018 . قُبل للنشر 18 / 12 / 2018)

### □ الملخص □

تضمنت هذه المقالة تحسين أداء نظام اتصالات ضوئي متماسك يعمل وفق معدل ارسال للبيانات يصل إلى 112 Gbit/s بالاعتماد على تقنيات معالجة الإشارة الرقمية وذلك بهدف تعويض المعوقات الخطية التي تتعرض لها الإشارة أثناء انتشارها ضمن الليف الضوئي.

تم خلال هذا العمل المقارنة بين صيغ تعديل مختلفة متعددة المستويات (DP-QPSK و DP-8PSK و DP-16PSK و DP-16-QAM) وذلك من أجل نفس معدل ارسال البيانات وعلى مسافات مختلفة من المرسل دون استخدام أية عناصر تضخيم وتمت المقارنة بين النتائج من خلال معدل خطأ البت BER .

استخدمنا تقنيات معالجة الإشارة الرقمية للتعويض عن التأثيرات الخطية. حيث تم تعويض التشتت اللوني باستعمال مرشح رقمي بسيط، وتعويض تشتت نمط الاستقطاب بتطبيق خوارزمية المعامل الثابت (CMA)، أما عدم تطابق الطور والتردد بين المرسل والمذبذب المحلي المستخدم في المستقبل فقد استخدمنا لتعويضه خوارزمية تقدير الطور Viterbi- Viterbi المعدلة.

تمت المحاكاة باستخدام المحاكي الضوئي optisystem الذي تم ربطه مع MATLAB R2011a من أجل تنفيذ خوارزميات DSP وتحليل النتائج المستنبطة عن الدراسة.

**الكلمات المفتاحية:** الأنظمة الضوئية، الكشف المتماسك، معالجة الإشارة الرقمية، التأثيرات الخطية، التشتت اللوني، تشتت نمط الاستقطاب، ضجيج الطور، معدل خطأ البت BER

\* أستاذ في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

\*\* مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

\*\*\* طالبة ماجستير - قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا

## Using digital signal processing techniques for enhancing the performance of high speed optical coherent communication systems

Dr. Ali Ahmad\*

Dr.Mohammad Nassr \*\*

Reem Ahmad Asaad \*\*\*

(Received 13 / 9 / 2018 . Accepted 18 / 12 / 2018 )

### □ ABSTRACT □

This paper presents Improving performance of 112 Gbit/s optical coherent communications systems using digital signal processing techniques to compensate linear impairments that are exposed to the signal during its propagation in optical fiber.

In this paper, different multi-level modulation formats (DP-QPSK, DP-8PSK, DP-16PSK and DP-16-QAM) were compared for the same data rate at different distances from the transmitter without amplification. the comparison was done by measuring bit error rate value .

We used digital signal processing techniques for linear effects compensation. where chromatic dispersion was compensated using a simple digital filter, and Polarization mod dispersion was realized by applying the constant-modulus algorithm (CMA). The phase and frequency mismatch between the transmitter and the local oscillator in the receiver was compensated using the modified Viterbi-Viterbi algorithm.

We used the Optical simulator Optisystem, which was linked with MATLAB R2011 in order to implementation DSP algorithms and analyze obtained results .

**Key Words:** Optical systems, Coherent detection, Digital Signal Processing , Linear effect Chromatic Dispersion, Polarization mod dispersion, Phase noise, Bit Error Rate

---

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

\*\*Teacher, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering , Tartous University, Syria .

\*\*\* Student Master, Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering , Tartous University, Syria .

## 1- مقدمة

تُعاني الإشارة الضوئية أثناء انتشارها ضمن الألياف من عدة معوقات منها الضياعات التي تنتج عن امتصاص المادة المكونة للليف والانتثار scattering وعيوب الدليل الموجي [10] [13]. يمكن استخدام المضخات الضوئية من أجل تعويض هذه الضياعات. هناك معوق آخر يحد بدرجة كبيرة من عرض المجال Bandwidth المستخدم من أجل إرسال الإشارات الضوئية وهو التشتت. يمكن أن نميز نوعين من التشتت، الأول: التشتت اللوني Chromatic Dispersion و الثاني : تشتت نمط الاستقطاب Polarization mod . dispersion يرجع سبب التشتت اللوني إلى إن دليل انكسار الألياف تابع لتردد الإشارة، وتحوي الإشارة الضوئية ترددات مختلفة تنقل بسرعات مختلفة وتصل في أوقات مختلفة إلى المستقبل، في حين يعزى PMD إلى الاستقطابات المختلفة للضوء والتي تسير بسرعات مختلفة، مما يؤدي إلى انتشار عشوائي للنبضات الضوئية . ينتج عن التشتت تداخل بين الرموز inter-symbol interference بسبب توسع النبضات بطريقة يتداخل فيها رمز واحد مع الرموز اللاحقة، وبالتالي حدوث خطأ في القرار الذي تتخذه دارة المستقبل . أدى العمل مع سرعات عالية لمعدلات إرسال الإشارة ضمن النظم الضوئية إلى ضرورة مراقبة وتعويض الإشارة بشكل صحيح وذلك للحد من الأخطاء قدر الإمكان. يمكن تعويض التشتت اللوني سواء في المجال الضوئي أو عن طريق المعدلات في المجال الإلكتروني. يتم تنفيذ التعويض ضمن المجال الضوئي عادة عن طريق استخدام الألياف المعوّضة للتشتت Dispersion Compensation Fiber DCF، أو معوّضات ضوئية أخرى. وبالرغم من أهمية هذه المعوّضات لتقليل أخطاء النظام إلا أنها تعاني من عدة سلبيات مثل: الخسارة الكبيرة للطاقة والتكلفة العالية بالإضافة إلى حجمها الكبير [1] .

قامت الدراسات السابقة بتوضيح فكرة الكشف المتماسك المستخدم في جهاز الاستقبال مع وجود استخدام تقنيات معالجة الإشارة وذلك من أجل صيغ تعديل DP-QPSK و DP-16-QAM , بالإضافة إلى دراسة تعويض التشتت باستخدام DSP باستخدام الألياف الضوئية من أجل معدل بيانات 100 Gbit/s [9][8] تم ضمن هذا البحث دراسة تعويض التأثيرات الخطية مثل التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب وضجيج الطور phase noise باستخدام تقنيات معالجة الإشارات الرقمية Digital Processing Signal DSP , وذلك من أجل عدة صيغ تعديل متعددة المستويات يمكن استخدامها مع الكشف المتماسك من أجل معدل بيانات 112 Gbit/s دون استخدام أية عناصر تضخيم، وقمنا بمقارنة أدائها بناءً على قياس معدل خطأ البت. تقلل تقنية DSP الحاجة إلى مكونات ضخمة ومكلفة وذات ضياعات عالية و توفر طرق ترشيح متكيفة مع وظيفية عالية ، وإمكانية أسهل للتطبيق [10].

## 2- هدف البحث

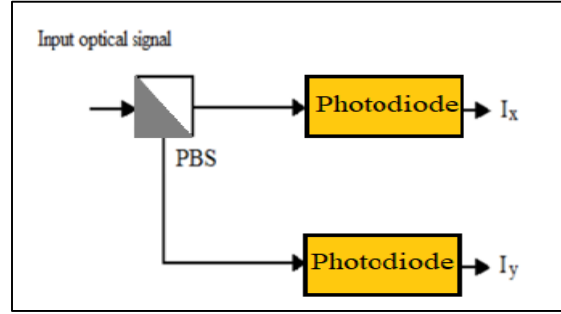
يهدف هذا البحث إلى تحسين أداء نظم الاتصالات الضوئية المتماسكة من خلال تعويض التشتت باستخدام معالجة الإشارة الرقمية وتم اختبار نظام بمعدل إرسال بيانات يصل إلى 112 Gbit/s باستخدام صيغ التعديل المختلفة (DP-QPSK و DP-8PSK و DP-16PSK و DP-16-QAM) دون استخدام أية عناصر تضخيم ودراسة أداء هذا النظام على مسافات مختلفة وتحليل النتائج المستنبطة من هذه الدراسة.

### 3- مواد وطرق البحث:

يبدأ هذا البحث بإجراء دراسة مرجعية عن الكشف المتماسك و طرق معالجة الإشارة الرقمية DSP ضمن المجال الضوئي وكذلك دراسة صيغ التعديل متعددة المستويات الممكن استخدامها في نظم الاتصالات الضوئية المتماسكة. اعتمدنا في الدراسة العملية على برنامج optisystem وهو برنامج متخصص بمحاكاة أنظمة الاتصالات الضوئية وذو موثوقية عالية ومعتمد لدى كبرى شركات الاتصالات في العالم الذي تم ربطه مع برنامج MATLAB R2011a لتنفيذ خوارزميات DSP وتحليل النتائج الناتجة عن تلك الدراسة.

#### 3-1- الكشف المتماسك:

يمكن كشف الإشارة ضمن النظم الضوئية باستخدام طريقتين، هما: الكشف المباشر أو الكشف المتماسك. يتم ضمن الكشف المباشر تحويل شدة الضوء إلى إشارة كهربائية باستخدام الكاشف الضوئي ويتم ضمن هذه الطريقة فقد كامل معلومات الطور، يبين الشكل(1) مفهوم الكشف المباشر.



الشكل(1): مفهوم الكشف المباشر [7].

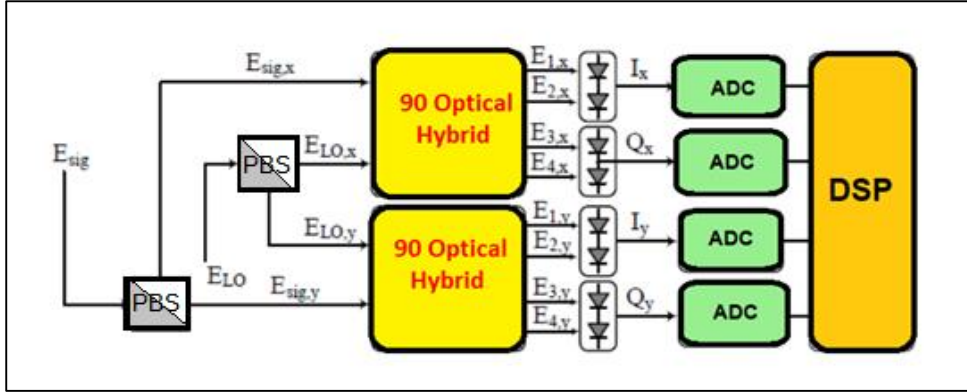
النوع الثاني: هو الكشف المتماسك، ويعتبر أكثر طرق الكشف تقدماً لأنه يمكن المستقبل من استرداد الحقل الكهربائي الكامل، الذي يحتوي على كل من معلومات السعة والطور. ويعتبر هذا النوع مناسباً من أجل الكشف باستخدام أي مستوى من صيغ التعديل الرقمية المتقدمة. يتطلب الكشف المتماسك مزامنة استقطاب دقيقة بين الإشارة المُستقبلة والمذبذب المحلي LO Local oscillator الذي يعمل كمرجع طوري [2].

ظهر الكشف المتماسك في وقت مبكر منذ عام 1979، لكن لم يتم استخدامه في الأنظمة التجارية كونه يسبب تعقيداً إضافياً لأنه يقوم بتتبع طور واستقطاب الإشارة الواردة.

تمكّن المستقبل الرقمي المتماسك من تقليل القيود التي تعيق أداء أنظمة الإرسال الضوئية، مثل التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب PMD وغيرها باستخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية عن طريق المرشحات الرقمية الخطية والمتكيفة مما أدى إلى انخفاض كبير في التعقيد [12][5].

يبين الشكل (2) مفهوم الاستقبال المتماسك والذي يستخدم من أجل فك تعديل الإشارة الضوئية المعدلة باستخدام أحد صيغ التعديل متعددة المستويات. حيث تمر الإشارة الضوئية من خلال مقسم شعاع الاستقطاب Polarization beam splitter PBS ويتم فصلها إلى مسارين مستقطبين متعامدين من الإشارات الضوئية، تدخل بعد ذلك إلى اثنين من المازجات 90 درجة mixers 90° ليتم مزجها مع إشارة المذبذب المحلي.

يتم تمرير الضوء الناتج عن المادج على كواشف ضوئية متوازنة Balanced photodiode لنحصل بعدها على إشارات مستمرة، تدخل هذه الإشارات عبر مكتم عينات Analog to digital converter ADC السرعة من أجل تحويلها إلى إشارات رقمية، ويتم استعادة البيانات في معالج الإشارة الرقمية [16] [8].



الشكل (2): مفهوم الاستقبال المتناسك. [8]

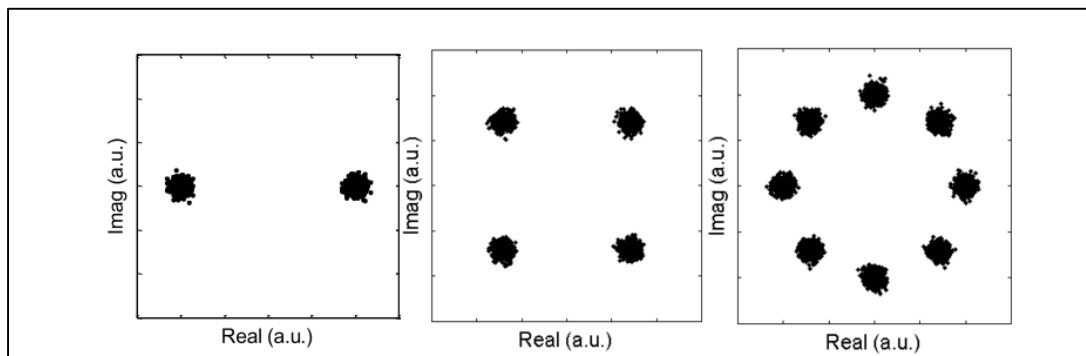
### 3-2-2- تعديل البيانات في أنظمة الاتصالات الضوئية المتناسكة

يتم ضمن نظم الاتصالات الحديثة تخزين المعلومات وإرسالها كبيانات رقمية ممثلة برموز مختارة من أبجدية محدودة. أما البيانات الرقمية فتعدل عن طريق ربط كل قيمة بإشارة مرجعية معينة.

### 3-2-1- تعديل إزاحة الطور PSK

يتم ضمن تعديل إزاحة الطور Phase shift keying تخزين المعلومات ضمن طور الإشارة المرسل، ومن أهم المزايا التي يقدمها هذا النمط هي السماحية العالية للضجيج عند المستقبل وسماحية أكبر للتشتت مقارنة مع On-off keying OOK ولكن هذه السماحية تقل مع زيادة مستوى التعديل [10].

في حالة تعديل الحامل باستخدام أكثر من بت من إشارة الدخل نحصل على تعديل إزاحة الطور متعدد المستويات M-PSK حيث إن M تمثل عدد المستويات  $M=2^m$ . تمثل m عدد البتات المستخدمة لترميز كل عينة من إشارة الدخل.



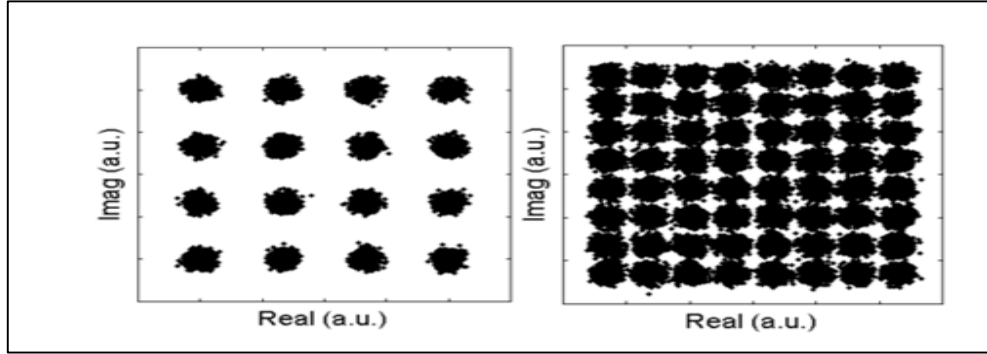
الشكل (3): مخطط المجموعة من أجل BPSK (يمين)، QPSK (وسط)، 8PSK (يسار) [6].

### 3-2-2- تعديل السعة التعمدي QAM

يتميز تعديل السعة التعامدي Quadrature Amplitude Modulation بإمكانية أن تأخذ السعة أكثر من قيمة، وكذلك بالنسبة للطور مما يسمح بالحصول على أكبر عدد من المستويات أو القيم المتاحة. [6] باعتبار إن عدد قيم السعة المتاحة  $KA$  وعدد قيم الطور المتاحة  $KP$  , فإن عدد المستويات المتاحة:

$$M = KA \times KP$$

$$N = \text{Log}_2 M = \text{Log}_2 (KA \times KP) \text{ وهذا يتطلب عدد بتات:}$$



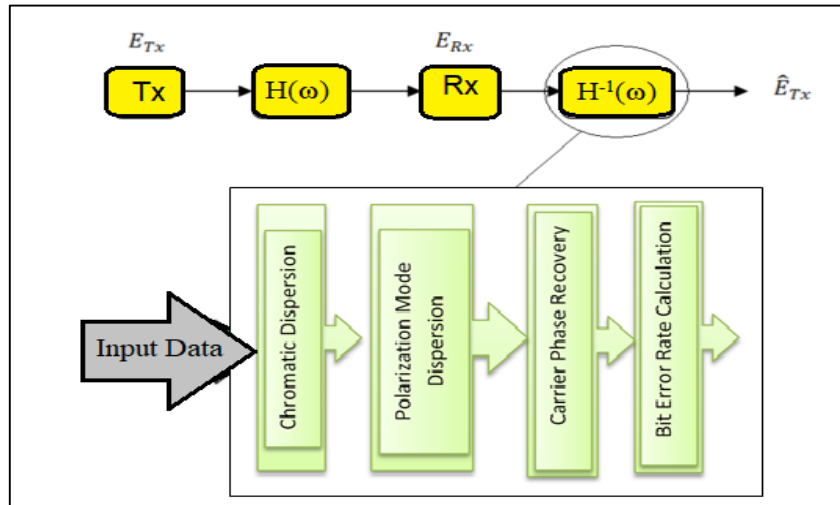
الشكل (4): مخطط المجموعة من أجل 64QAM (يمين)، 16QAM (يسار) [6].

### 3-3- معالجة الإشارة الرقمية بمساعدة الكشف المتناسك

يعتبر إرسال الإشارة بمعدلات عالية على مسافات طويلة أحد أهم أهداف مصممي الشبكات الضوئية، لذلك تُستخدم معالجة الإشارة الرقمية DSP ضمن المستقبل لإزالة الحاجة إلى التحكم في الاستقطاب الديناميكي وأيضاً للتعويض الفعال عن التشوش اللوني CD ، وتشوش نمط الاستقطاب PMD ، وضجيج الطور PN والتأثيرات اللاخطية في المجال الإلكتروني.

تقتضي الطبيعة الديناميكية لبعض القيود مثل PMD أن يكون المعوض متكيف، إلا أن هذا التكيف لا يتحقق بسهولة في المجال الضوئي بسبب قلة مرونة المكونات.

يعتبر التكيف أمراً مهماً من أجل تعقب حالات PMD المتغيرة ويمكن تنفيذه بسهولة اعتماداً على تقنيات معالجة الإشارة الرقمية باستخدام خوارزميات متكيفة مثل خوارزمية المعامل الثابت Constant Modulus Algorithm CMA [3] .



الشكل (5): نظام الإرسال مع مكون DSP [11].

يمكن تمثيل نظام الإرسال الضوئي كما هو موضح في الشكل (5) حيث  $E_{TX}$  هي الإشارة المرسلية ،  $H(\omega)$  هو تابع نقل القناة و  $E_{RX}$  هي الإشارة المستقبلية. الهدف من DSP هو تنفيذ  $H^{-1}(\omega)$  ، والذي يمكن تفسيره على أنه مزيج من التأثيرات الخطية التي تؤثر على الإشارة أثناء الانتشار ، وتقدير  $E_{RX}$  الذي يمثل الإشارة المُعالَجة. من أجل تعويض كل هذه التأثيرات، يتم فصل عينات الإشارة الكهربائية المستقبلية من خلال سلسلة من الخوارزميات وذلك بهدف تقليل معدل خطأ البت BER الذي يمثل معيار التقييم الرئيسي لجودة نظام الاتصالات الرقمية [11].

### 3-4- تعويض معوقات القناة

تدخل الإشارات الأربعة إلى مكون DSP ويتم نقلها إلى المجال الرقمي من أجل معالجتها، بعد ذلك يتم تعويض التشتت اللوني باستخدام مرشح رقمي بسيط، ثم يتم تعويض PMD المتكيفة بتطبيق خوارزمية CMA، ويتم تعويض عدم تطابق الطور والتردد بين المرسل والمذبذب المحلي LO باستخدام خوارزمية تقدير الطور Viterbi- Viterbi المعدلة.

### 3-4-1- تعويض التشتت اللوني

يعتبر التشتت اللوني أحد العوامل الأساسية التي تسبب تراجع أداء أنظمة الاتصالات الضوئية. مع إهمال التأثيرات اللاخطية ، يمكن التعامل مع الألياف الضوئية على أنها مرشح له تابع النقل التالي [14]:

$$G(z, \omega) = \exp\left(-j \frac{D\lambda^2 z}{4\pi c} \omega^2\right) \quad (1)$$

حيث:

$Z$  : مسافة الإرسال،  $\omega$  : التردد الزاوي،  $z$  : الوحدة التخيلية،  $\lambda$  : طول موجة القناة،  $c$  : سرعة الضوء،  
 $D = D_0 + S \times (\lambda - \lambda_0)$  : معامل تشتت الألياف للأطوال الموجية ،  $S$ : انحدار التشتت،  $\lambda_0$  : الطول الموجي المرجعي [9].

بما أن كمية تشتت الألياف الضوئية هي في الأساس قيمة ثابتة، يمكن استخدام مرشح FIR ثابت للتعويض عن التشتت اللوني CD .

### 3-4-2- تعويض تشتت نمط الاستقطاب PMD

يحدث هذا النوع من التشتت نتيجة عدم التصنيع الاسطواني المثالي لنواه الليف وهذا ينتج أنماط مختلفة بمركبات قطبية متعامدة لنمط الليف الأساسي. إذا وجد قطبين للنمط الأساسي عند الدخل سيحدث فرق في المسافة بينهما وذلك لأن سرعة انتشار كل قطب تختلف عن الأخرى وينتج عن ذلك تشتت قطبي. يتغير التشتت الناتج عن PMD بسرعة مقارنة مع التشتت اللوني ذو القيمة الثابتة لذلك يجب استخدام معادل متكيف للتعويض عن PMD . بحيث يمكن للمعادل المتكيف أن يتغير ديناميكياً وفقاً لخصائص القناة لضبط معاملات المرشح الرقمي. يمكن التعبير عن التأثيرات المعتمدة على الاستقطاب والتي تؤثر على الإشارة المنقولة من خلال مصفوفة جونز الموضحة وفق العلاقة: [9]

$$J = \begin{pmatrix} \cos\theta e^{j\frac{\pi}{2}} & -\sin\theta e^{-j\frac{\pi}{2}} \\ \sin\theta e^{j\frac{\pi}{2}} & \cos\theta e^{-j\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

للتعويض عن دوران الاستقطاب و PMD ، يمكن استخدام صندوق block مكون من 4 مرشحات FIR تم تصميمه بناءً على معكوس مصفوفة جونز المنظمة في بنية فراشة [12]. يعطى معكوس مصفوفة جونز بالعلاقة:

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} h_{xx} & h_{xy} \\ h_{yx} & h_{yy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

تمثل المرشحات الرقمية الأربعة المستخدمة لتحقيق التوازن بين زاوية الاستقطاب وتأخير الطور. يتم اختيار مرشح FIR بثلاث أوزان، القيم الأولية هي:

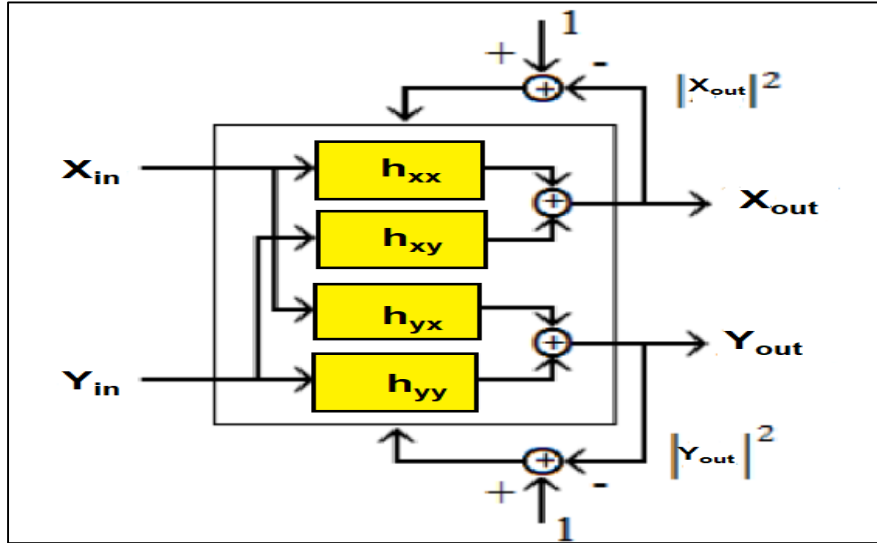
$$h_{xx} = (...010...),$$

$$h_{yx} = (...000...),$$

$$h_{xy} = (...000...),$$

$$h_{yy} = (...010...).$$

عند إيجاد معكوس مصفوفة  $J^{-1}$ ، يمكنك الاستفادة من خوارزمية المعامل الثابت CMA لتعويض PMD. ويوضح الشكل (6) المخطط الصندوقي لخوارزمية CMA [4].



الشكل (6) : المخطط الصندوقي لخوارزمية CMA [4].

CMA هي نوع من الخوارزميات المُعدلة العمياء تستخدم لتحديث معاملات أوزان المرشح FIR ، وذلك من أجل التقليل من قيمة خطأ تابع الخرج. يعتبر الدخل  $X_{in}$  و  $Y_{in}$  إشارات منحازة الاستقطاب. وإشارات الخرج

هي عبارة عن إشارتين مستقطبتين متعامدتين  $X_{out}$  و  $Y_{out}$ . يتم تمثيلهم بالعلاقات:

$$X_{out} = h_{xx} \otimes X_{in} + h_{xy} \otimes Y_{in} \quad (4)$$

$$Y_{out} = h_{yx} \otimes X_{in} + h_{yy} \otimes Y_{in} \quad (5)$$

$\otimes$  تمثل عمليات الطي في المجال الزمني. ونسمي المرشح مرشح الفراشة Finite Impulse Response

FIR



### 3-4-3- تقدير طور الحامل CPE Carrier Phase Estimation

يمكن استبدال دارة قفل الطور بتقدير الطور في المجال الرقمي بواسطة DSP. في هذه المرحلة، يتم تعويض إزاحة الطور والتردد بين المذبذب المحلي والإشارة المستقبلية. والطريقة الأكثر انتشاراً لتحقيق هذه الغاية هي خوارزمية Viterbi-Viterbi [15]. يظهر مخطط الخوارزمية في الشكل (7)

يمكن تقديم إشارة QPSK المستلمة بواسطة المعادلة (6).

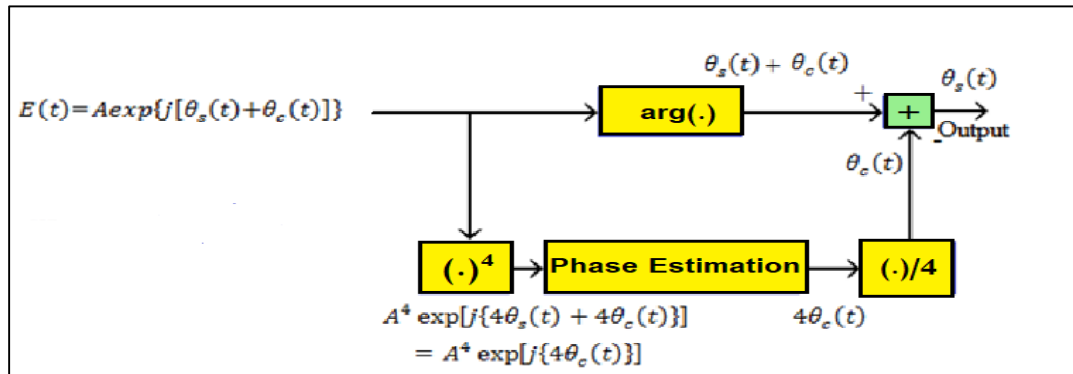
$$E(t) = A \exp\{j[\theta_s(t) + \theta_c(t)]\} \quad (6)$$

حيث:

$\theta_c$ : معلومات طور تعديل الحامل.

$\theta_s$ : فرق الطور.

تعتبر خوارزمية القوة M هي الخوارزمية الأكثر استخداماً لتقدير الطور من أجل صيغة التعديل QPSK ونستخدم هذه الخوارزمية لتقدير طور الإشارة QPSK في المجال الرقمي.

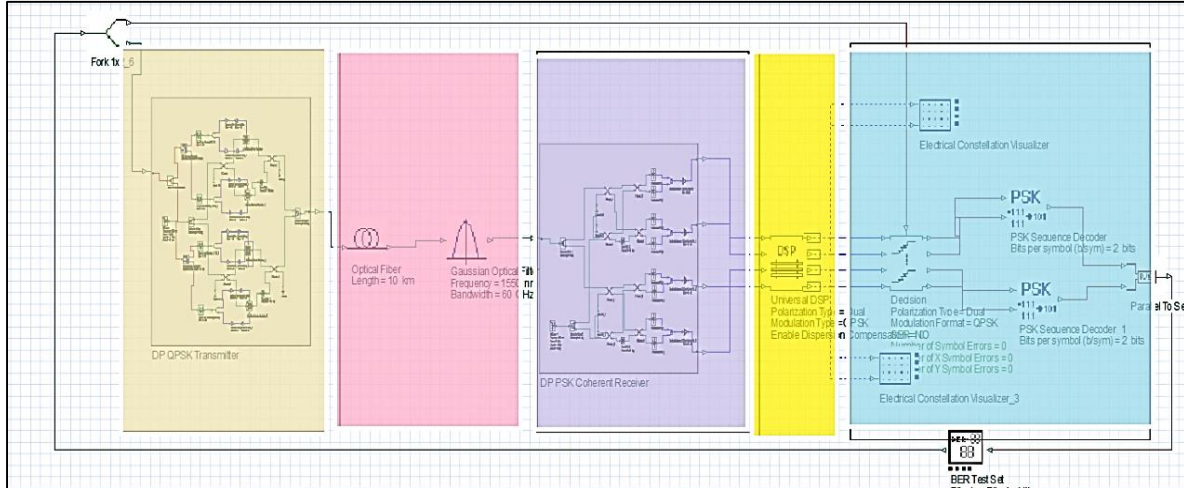


الشكل (7): المخطط الصندوقي لخوارزمية Viterbi-Viterbi [6].

## 4- النتائج والمناقشة

### 4-1- نموذج المحاكاة

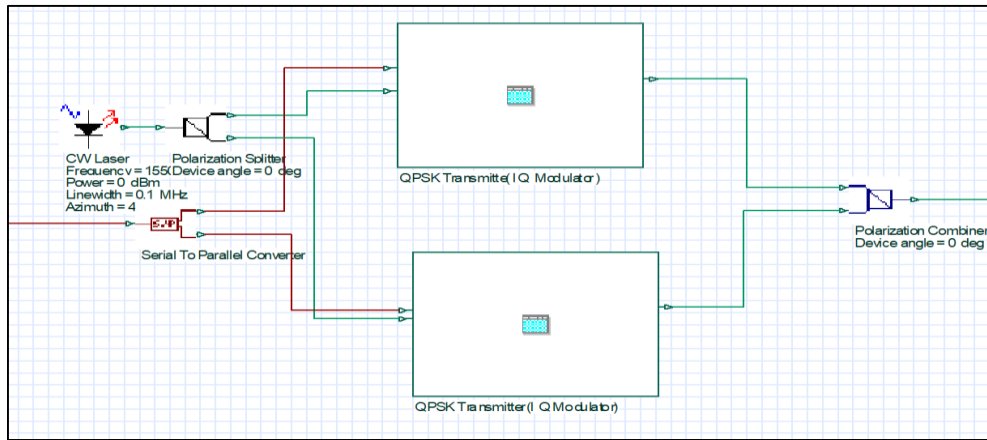
يبين الشكل (8) المخطط العام للنموذج المدروس والذي يمثل نظام اتصالات ضوئي متماسك بمعدل 112 Gbit/s باستخدام صيغ تعديل متعددة المستويات مختلفة وبالاعتماد على تقنية معالجة الإشارة الرقمية. قمنا بتعديل الإشارة باستخدام صيغ تعديل متعددة المستويات، قسمنا النظام إلى خمسة أجزاء رئيسية: المرسل، وصلة الإرسال وهي الليف الضوئي أحادي النمط Single Mode Fiber SMF، المستقبل المتماسك، وحدة معالجة الإشارة الرقمية، مفكك التعديل والكشف، وعداد Bit Error Rate BER لتقدير معدل الخطأ في البت.



الشكل (8): المخطط العام للنموذج المدروس.

#### 4-1-1- مرسل DP-QPSK الضوئي

يقوم مرسل DP-QPSK Dual-polarization Quadrature phase shift keying الضوئي بتقسيم شعاع الضوء المستمر بواسطة مقسم شعاع الاستقطاب polarization beam splitter PBS إلى شعاعين ضوئيين متعامدين لهما استطاعة متساوية. ثم يتم إدخال الشعاعين الناتجين إلى معدل IQ ليتم تعديلها ونحصل في خرج المعدل على إشارتين معدلتين مستقطبتين متعامدتين يتم تجميعهما في شعاع موحد من خلال مجمع شعاع الاستقطاب Polarization Beam Combiner PBC. يوضح الشكل (9) آلية العمل.



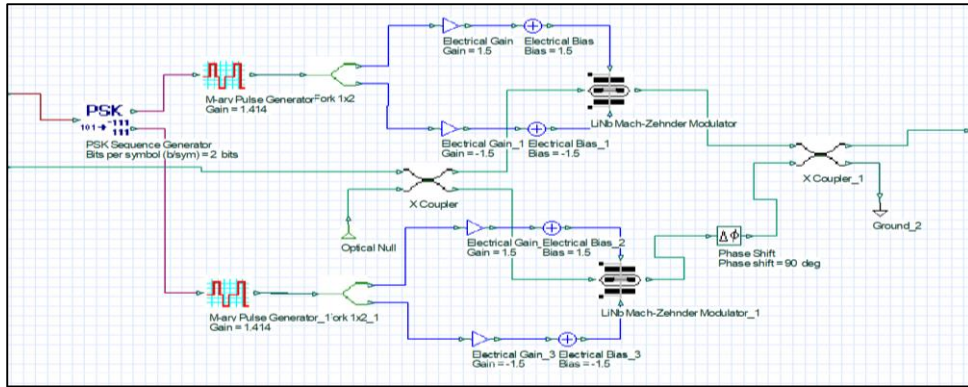
الشكل (9): مرسل DP-QPSK الضوئي.

يبين الجدول (1) بارامترات الليزر CW المستخدم في المحاكاة حيث تم اختيار قيمة التردد 1550 nm بما يتوافق مع أقل تخامد لانتشار الأمواج ضمن الليف، وكذلك تم تحديد قيمة الطاقة 0 dBm لمنع ظهور التأثيرات اللاخطية، وتم اختيار عرض خط الليزر 0.1 MHz من أجل دراسة تأثير التشتت الضوئي.

الجدول (1): بارامترات الليزر CW.

المحدد	القيمة
التردد	1550 nm
الطاقة	0 dBm
عرض الخط	0.1 MHz

يمثل الشكل (10) معدل QPSK الذي يبدأ بمولد سلسلة PSK لتوليد سلسلتي رمز M-ary متوازيتين من الإشارات الثنائية اعتماداً على تعديل إزاحة الطور PSK باستخدام 2 بت 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 (10) : معدل QPSK .

#### 4-1-2- قناة الاتصال الضوئية

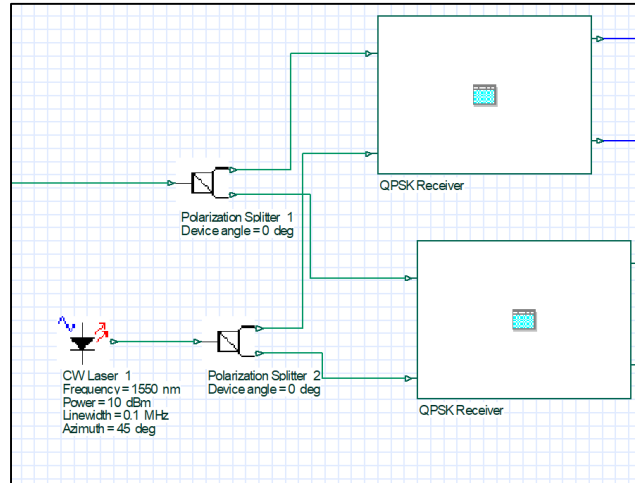
يتم إرسال الإشارة في قناة الألياف الضوئية وهي عبارة عن ليف أحادي النمط SMF، له امتداد يتغير من 10 إلى 100 كم. يوضح الجدول (2) بارامترات المحاكاة لقناة الألياف الضوئية. في هذا النموذج لا يتم تعويض توهين الليف SMF باستخدام مضخم Erbium Doped Fiber Amplifier EDFA.

الجدول (2): بارامترات الليف الضوئي.

المحدد	القيمة
الطول [km]	متغير
ثابت التوهين $\alpha$	0.2 dB/km
معامل التشتت D	16.75 ps/(nm.km)
معامل الانحدار S	0.075 ps/(km.nm <sup>2</sup> )
معامل PMD	0.004 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

#### 4-1-3- المستقبل DP-QPSK المتماسك الضوئي

يشتمل المستقبل الضوئي المتماسك على مذبذب ليزر محلي LO مستقطب عند 45 درجة مرتبط مع مقسم شعاع الاستقطاب. يتم فك تعديل الإشارة المستقبلية باستخدام مستقبلي QPSK منفصلي الاستقطاب. يمثل الشكل (11) مستقبل ضوئي متماسك



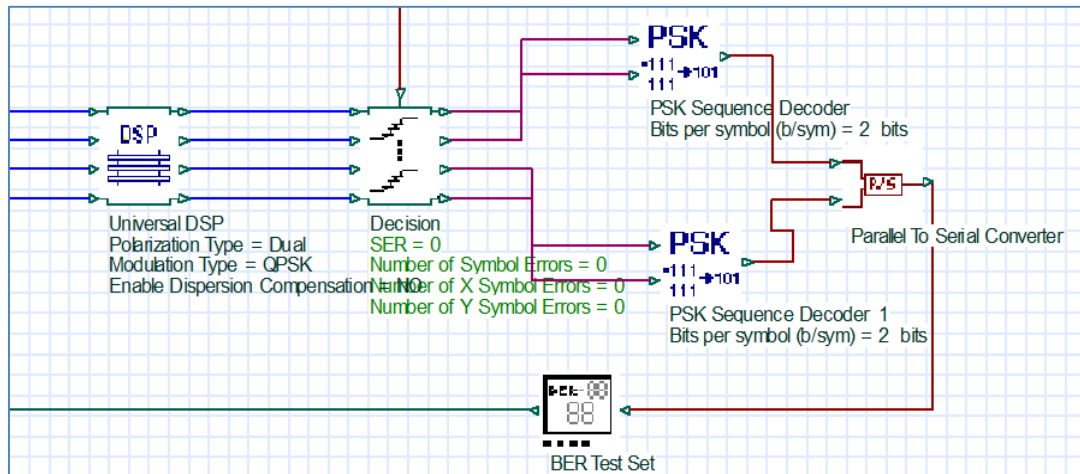
الشكل (11): مستقبل DP-QPSK المتماسك الضوئي.

## 4-1-4 - مكون معالجة الإشارة الرقمية:

يتم تغذية الإشارات الخارجة من المستقبل DP-QPSK المتماسك الضوئي إلى مكون DSP من أجل تعويض معوقات الإرسال في المجال الرقمي، وهذا يساعد في استرداد الإشارة الواردة بعد الكشف المتماسك كما تم شرحه سابقاً.

## 4-1-5 - الكاشف ومفكك الترميز

تصل الإشارة إلى مكون القرار حيث يقوم بمعالجة قسمة الإشارة الكهربائية المستقبلة in-phase I و quadrature Q القادمة من مرحلة DSP، وتطبيق المطال الكهربائي لكل قناة I و Q إلى الشبكة m-PSK الخاصة بها وإعطاء قرار بشأن كل رمز مستقبلي على أساس إعدادات العتبة المقاسة. بعد ذلك يقوم مفك الترميز بفك تشفير سلسلتي الرموز المتوازية M-ary إلى إشارات ثنائية. ، والتي ترسل بدورها إلى مجموعة اختبار BER للكشف عن الأخطاء كما هو موضح في الشكل (12).



الشكل(12): الكشف وفك الترميز بعد DSP.

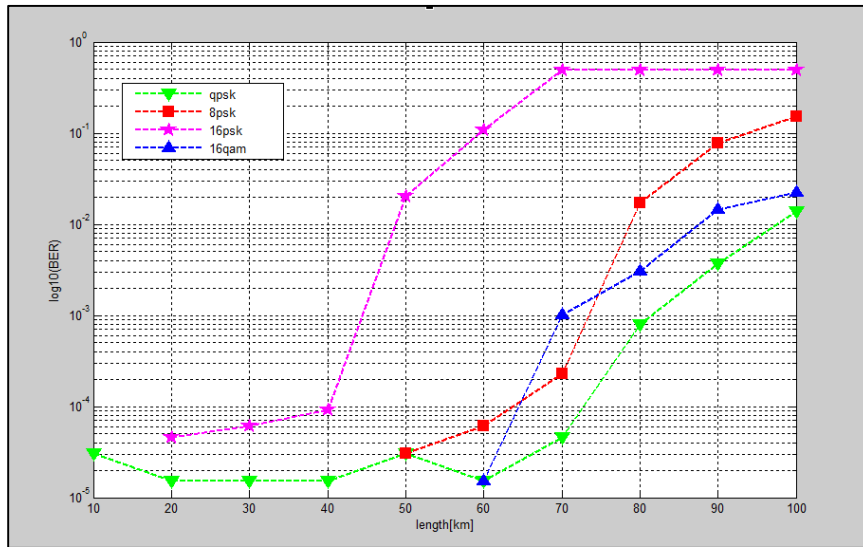
#### 4-2- صيغة التعديل الأفضل المناسبة للكشف المتماسك

تم اختبار النموذج من أجل قيم مختلفة لطول الليف الضوئي واستخدام صيغ تعديل متعددة المستويات مختلفة لتعديل الإشارة الضوئية المرسل. بفرض إن طول سلسلة البتات التي يقوم مولد البتات العشوائي بتوليدها 65536 بت, يوضح الجدول(3) معدل الرمز المناسب من أجل كل من صيغ التعديل المستخدمة.

الجدول(3): معدل الرمز المناسب من أجل كل من صيغ التعديل المستخدمة.

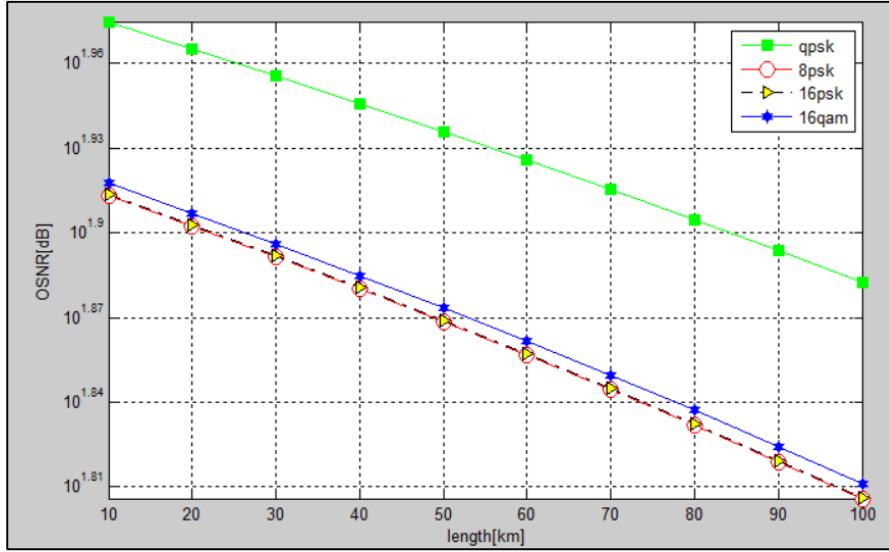
صيغة التعديل	معدل البيانات	معدل الرمز
DP-QPSK	112 Gbit/s	28e+009 Symbols/s
DP-8PSK	112 Gbit/s	18.6e+009 Symbols/s
DP-16PSK	112 Gbit/s	14e+009 Symbols/s
DP-16QAM	112 Gbit/s	14e+009 Symbols/s

يبين الشكل(13) معدل خطأ البت على مسافات مختلفة من أجل صيغ التعديل المستخدمة



الشكل(13): معدل خطأ البت من أجل صيغ التعديل متعددة المستويات المختلفة.

نستنتج من هذا المخطط أن النظام المعدل باستخدام صيغة التعديل DP-QPSK يحقق أفضل نسبة BER مقارنة مع النظم الأخرى وقادر على الوصول إلى مسافة 80 كم بجودة إرسال عالية. وبمقارنة نسبة الإشارة الضوئية المستقبلية إلى الضجيج Optical signal to noise ratio OSNR مع مسافة الإرسال المبينة في الشكل(14) نجد أيضاً إن صيغة التعديل DP-QPSK تقدم جودة إشارة مستقبلية عالية مقارنة بالنظم الأخرى.



الشكل(14): نسبة الإشارة الضوئية المستقبلية إلى الضجيج.

### 3-4 - تعويض معوقات الإرسال الخطية باستخدام DSP في نظام ضوئي متماسك بمعدل 112 Gbit/s

#### يستخدم صيغة التعديل DP-QPSK

من الدراسة السابقة تبين لنا أن DP-QPSK هي أفضل صيغة تعديل ملائمة للاستخدام مع تقنية الكشف المتماسك. قمنا بتحليل أداء وحدة المعالجة الرقمية المستخدمة من أجل التعويض عن التشتت في نظام ضوئي متماسك بمعدل 112 Gbit/s يستخدم صيغة التعديل DP-QPSK. بفرض إن طول سلسلة البتات التي يقوم مولد البتات العشوائي بتوليدها 65536 بت.

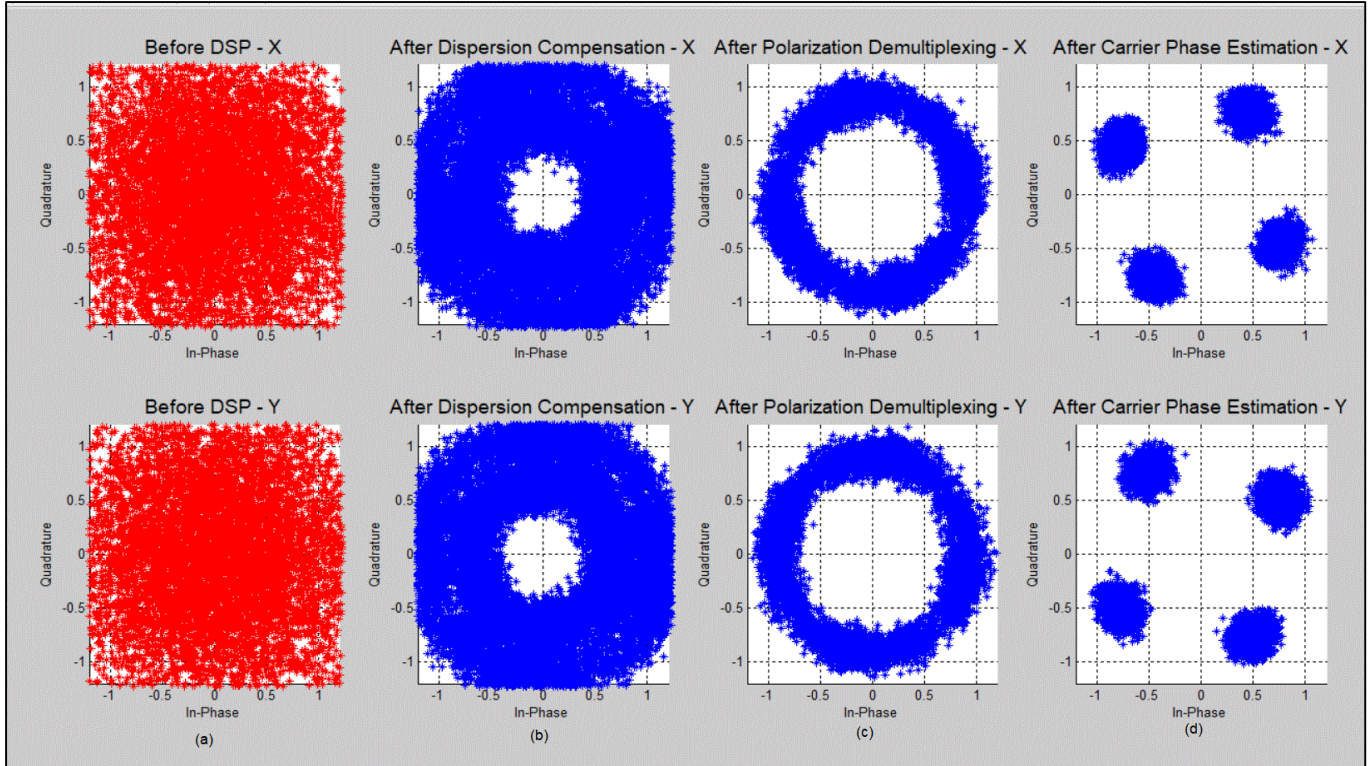
في وحدة DSP يتم تعويض المعوقات الخطية التي تتعرض لها الإشارة أثناء مرورها في الليف الضوئي. حيث تم تعويض التشتت اللوني باستعمال مرشح رقمي بسيط، وتعويض تشتت نمط الاستقطاب بتطبيق خوارزمية المعامل الثابت CMA، بينما يتم تعويض عن عدم تطابق الطور والتردد بين المرسل والمذبذب الحلي المستخدم في المستقبل باستخدام خوارزمية تقدير الطور Viterbi- Viterbi المعدلة. تم ضبط محددات النظام كما يلي:

الجدول(3): البارامترات التي تمثل محددات النظام المستخدم.

المحدد	القيمة
مسافة الانتشار	80 km
معدل الرمز	28E009 Symbols/s
معامل التشتت D	16.75 ps/(nm.km)
معامل الانحدار S	0.075 ps/(km.nm <sup>2</sup> )
معامل PMD	0.004 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
طول الموجة	1550 nm
عدد الرموز	4 / طول السلسلة
عدد العينات في الرمز	2



رتبة المرشح FIR المستخدم من أجل تعويض التشنت اللوني هي 191. بينما رتبة المرشح FIR من أجل تعويض تشنت نمط الاستقطاب هي 13 مع حجم خطوة لخوارزمية CMA مساوية 0.003. يبين الشكل (15) مخطط المجموعة الكهربائية قبل وبعد تعويض كل مرحلة من المراحل الخفية



الشكل (15): مخطط المجموعة. (a) مخطط المجموعة قبل استخدام DSP. (b) مخطط المجموعة بعد تعويض التشنت اللوني. (c) مخطط المجموعة بعد تعويض تشنت نمط الاستقطاب. (d) مخطط المجموعة بعد تقدير طور الحامل.

تشير النتائج من الشكل (a-15) إن توزيع طور الإشارة أو مطالها، هو توزيع لامركزي. بالإضافة لوجود تشنت عالي، وضجيج طور. وبالتالي، لا يمكننا استخراج معلومات الإشارة مباشرة. يبين الشكل (b-15) مخطط المجموعة بعد تعويض التشنت اللوني حيث تصبح نقطة أخذ العينة ذات توزع غير منساوي على محيط الحلقة الدائرية، بالإضافة إلى كثافة نقاط أخذ عينات كبيرة بسبب اختلاف طور نقطة أخذ العينات لكل عينة. وكما يبين الشكل (c-15) إن التوزيع العام يصبح أكثر تركيزاً، ولكن وجود ضجيج طور كبير سيؤدي إلى توزيع النقاط حول المركز في مخطط المجموعة. يبين الشكل (d-15) يكون توزيع كل نقطة أكثر تركيزاً وبعداً عن الحدود، وينخفض الضجيج بشكل كبير.

## 5- الاستنتاجات والتوصيات

قمنا خلال هذا البحث بإجراء المقارنة بين صيغ تعديل ثنائية الاستقطاب متعددة المستويات مختلفة (DP-QPSK و DP-8PSK و DP-16PSK و DP-16-QAM) واختيار الصيغة الأمثل بالنسبة لنظم الاتصالات الضوئية المتناسكة بناءً على تحديد معدل خطأ البت وأقصى مسافة انتشار يمكن أن تسلكها الإشارة بجودة عالية، ويمكن أن نجمل الاستنتاجات التي توصلنا إليها وفق ما يلي:

- تعتبر صيغة التعديل DP-QPSK هي أفضل صيغة تعديل يمكن استخدامها مع نظم الاتصالات الضوئية المتماسكة كونها تحقق أفضل قيمة لمعدل خطأ البت وعلى أبعاد مسافة ممكنة حوالي 80 كم دون استخدام أي عناصر تضخيم على طول مسار الوصلة الضوئية.
- تساعد معالجة الإشارة الرقمية على تعويض المعوقات الخطية مثل التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب وضجيج الطور بشكل جيد دون الحاجة إلى استخدام المعدلات ذات التكلفة الكبيرة والخسارة العالية.
- تعويض المعوقات الخطية باستخدام DSP في النظام الضوئي المتماسك حقق إرسال بمعدلات عالية تصل إلى 112 Gbit/s.
- يمكن استخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية لتعويض التأثيرات اللاخطية التي قد تتعرض لها الإشارة عند انتشارها ضمن الليف.
- يمكن دراسة أداء نظام الاتصالات الضوئية المتماسكة باستخدام صيغة التعديل DP-QPSK من أجل معدلات إرسال مختلفة ومقارنة أدائها.



## 6- المراجع

- [1] Devra, S; Kaur, G. 2011, *Dispersion Compensation using Raised Cosine Filter in optical fibers*. International Journal of Information and Electronics Engineering. Vol. 1, No. 1, 47.
- [2] Ip, E. 2009, *Coherent detection and digital signal processing for fiber optic communications*. Stanford University, California, 55-56.
- [3] Sewter, J. 2005, *Electronic equalization of polarization-mode dispersion in 40-GB/S optical systems*. Electrical and Computer Engineering ,University of Toronto. MSc. Thesis, 489.
- [4] Kikuchi, K. 2008, *Polarization-demultiplexing algorithm in the digital coherent receiver*. In IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, IEEE,101-102.
- [5] Kikuchi, K.2016, *Fundamentals of coherent optical fiber communications*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, No. 1, 157-179.
- [6] Millar, D. S. 2011.*Digital signal processing for coherent optical fibre communications* . University College London UCL. Ph.D Thesis, 29-30.
- [7] Mussolin, M. 2010, *Digital Signal Processing Algorithms for High-Speed Coherent Transmission in Optical Fibers*. M Sc. Thesis, Telecommunications Engineering, Padova University, Italy
- [8] Patro, C. S. S; Panigrahy, S. R; Dash, S. K. 2016, *100Gbps transmission using DSP module for Dispersion Compensation*. International Research Journal of Engineering and Technology. Vol. 3, No. 4, 2722.
- [9] Sahu, A ; Thakare, V. V. 2017, *Comparative analysis of DP QPSK and DP 16-QAM Optical Coherent receiver*. International Research Journal of Engineering and Technology. Vol. 4, No. 7, 647.
- [10] Sharifian, S. 2010, *Chromatic dispersion compensation by signal predistortion: Linear and nonlinear filtering*. Chalmers University of technology, Sweden,8-17.
- [11] Savory, S. J; Gavioli, G; Killey, R. I; Bayvel, P. 2007, *Electronic compensation of chromatic dispersion using a digital coherent receiver*. Optics Express, Vol. 15, No. 5, 2120-2126.
- [12] Savory, S. J. 2008, *Digital filters for coherent optical receivers*. Optics express, OSA, Vol. 16, No. 2, 804-817.
- [13] Xu, T; Jacobsen, G; Popov, S; Li, J;Wang, K; Friberg, A. T. 2009, *Digital compensation of chromatic dispersion in 112-Gbit/s PDM-QPSK system*. In Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), IEEE , 2009, 1-6.
- [14] Xu, T; Jacobsen, G; Popov, S; Li, J; Vanin, E; Wang, K; Zhang, Y. 2010, *Chromatic dispersion compensation in coherent transmission system using digital filters*. Optics express, Vol. 18, No.15, 16243-16257.
- [15] Xu, T; Jacobsen, G; Popov, S; Li, J; Friberg, A. T; Zhang, Y. 2013, *Carrier phase estimation methods in coherent transmission systems influenced by equalization enhanced phase noise*. Optics Communications, Vol. 293, 54-60.
- [16] Yu, J; Dong, Z; Chien, H. C; Jia, Z; Li, X; Huo, D; Schippel, A. 2013, *Transmission of 200 G PDM-CSRZ-QPSK and PDM-16 QAM with a SE of 4 b/s/Hz*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, No. 4, 515-522.