

تخفيف التعديل الطوري الذاتي SPM في نظام اتصالات ضوئي متماسك

د. محمد نصر*

لما محمد**

(تاريخ الإيداع 31 / 8 / 2020 . قبل للنشر 28 / 10 / 2020)

□ الملخص □

أكسبت السعة العالية ومسافات الإرسال الطويلة نظم الاتصالات الضوئية أهمية كبيرة في شبكات الاتصالات الحديثة. تعاني الأنظمة الضوئية عند مستويات الطاقة العالية من التأثيرات اللاخطية التي تؤثر بشكل واضح على أداء النظام. تم خلال هذا العمل تخفيف تعديل الطور الذاتي Self Phase Modulation (SPM) في نظام ضوئي متماسك باستخدام خوارزمية الانتشار الخلفي الرقمية Digital Back Propagation (DBP)، ودراسة تأثير كل من طول الليفو استطاعة المرسلو المساحة الفعالة لمقطع الليف Effective Area (A_{eff}) على تعديل الطور الذاتي SPM باستخدام برنامج optisystem لمحاكاة الأنظمة الضوئية. تم تحليل أداء النظام بالاعتماد على معدل خطأ البت Bit Error Rate (BER) ومعامل Q وعند مسافة إرسال 200km واستطاعة مرسل 20dBm كانت قيمة معامل $Q=5.01$ ومعدل خطأ البت يساوي 15×10^{-6} .

الكلمات المفتاحية : كشف متماسك، تعديل الطور الذاتي SPM، خوارزمية الانتشار الخلفي DBP، المساحة الفعالة لمقطع الليف A_{eff} ، المعامل اللاخطي، DP-QPSK γ .

* مدرس في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا
** طالبة ماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا الاتصالات - كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات - جامعة طرطوس - سوريا.

Self Phase Modulation mitigation in coherent optical communication system

Dr.Mohammad Nassr *

Lama Mohammad **

(Received 31 / 8 / 2020 . Accepted 28/ 10 / 2020)

□ABSTRACT□

High capacity and long transmission distances have made optical communication systems a great importance in modern communication networks. Optical systems at high power levels suffer from nonlinear effects that significantly affect system performance. In this paper, Self Phase Modulation (SPM) was mitigated in a coherent optical system using the Digital Back Propagation (DBP) algorithm, and study the effect of fiber length, transmitter power and Effective Area (A_{eff}) on self-phase modulation (SPM) using an optical system software to simulate optical systems. System performance was analyzed based on Bit Error Rate (BER), Q Factor, at 200km transmission distance and 20dBm transmitter power the Q Factor value was equal to 5.01 and Bit error rate was equal to 15×10^{-6} .

key words: Coherent detection, Self-Phase Modulation (SPM), backward propagation algorithm (DBP, fiber segment effective area (A_{eff}), Nonlinear parameter (γ),

DP-QPSK

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

** Master student, Communications Technology Engineering Department, Information and Communication Technology, Tartous University, Syria.

1. مقدمة:

فرضت الثورة الكبيرة في مجال الاتصالات والمعلومات المتمثلة في الاستخدام المتزايد للإنترنت ونقل البيانات واقعاً جديداً لا يمكن تحقيقه من دون شبكة اتصال عالية السعة والإرسال بعيد المدى. تعد تقنية الاتصال بالألياف الضوئية أحد المصادر الرئيسية التي يمكن استخدامها لدعم السعة العالية وحركة النقل الكبيرة و مسافات الإرسال الطويلة ومعدل البيانات المرتفع بسبب الوزن الأقل والتكلفة المنخفضة والحجم المقبول ومعدل التأخير الأفضل. [1]

تتخفف جودة الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية عندما تنتشر من جهاز الإرسال نحو جهاز الاستقبال بسبب التأثيرات الخطية واللاخطية التي تعيق انتشارها وتسبب انخفاض في أداء نظام الإرسال. [2,3]

يمكن أن نرجع الاستجابة اللاخطية للضوء في الألياف الضوئية إلى الحركة اللاتوافقية للإلكترونات الترابط تحت تأثير الحقل المطبق، ونتيجة لذلك، فإن الاستقطاب الكلي P المقدم من الديبولات الإلكترونية يصبح لاخطي في المجال الكهربائي E ويحقق العلاقة العامة التالية [4]:

$$P = \epsilon_0 (X^{(1)} \cdot E + X^{(2)} : EE + X^{(3)} : EEE + \dots) \quad (1)$$

حيث ان:

P : الاستقطاب.

ϵ_0 : السماحية الكهربائية للفراغ.

$X^{(j)}$: التأثير Susceptibility من المرتبة j حيث $(j=1,2,\dots)$

حيث $X^{(1)}$ يمثل التأثير الخطي ويؤثر من خلال معامل الانكسار n ومعامل التخماد α ، $X^{(2)}$ مسؤول عن التأثير اللاخطي من المرتبة الثانية كتوليد التوافقيات من الدرجة الثانية، وينعدم هذا التأثير من أجل وسط ثنائي أكسيد السيليكون SiO_2 بسبب تناظر الجزيئات وبالتالي فإن الألياف الضوئية لا تولد توافقيات من الدرجة الثانية. تنشأ أدنى مرتبة للتأثيرات اللاخطية ضمن الألياف من المؤثر $X^{(3)}$ والمسؤول عن عدة ظواهر مثل التوافقيات من الدرجة الثالثة ومزج الأمواج الأربعة FWM (Four-Wave Mixing) ومعامل الانكسار اللاخطي.

2. هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تخفيف تأثير تعديل الطور الذاتي SPM في نظام ضوئي متماسك بمعدل إرسال 112Gbit/s و صيغة تعديل DP-QPSK ودراسة هذا النظام عند مسافات واستطاعات إرسال مختلفة وتحليل النتائج.

3. طرائق البحث ومواده :

اعتمد هذا البحث في تنفيذه على العديد من المراجع والدراسات الحديثة [5-11]، كما تم الاعتماد على دراسة معادلة الانتشار عبر الليف الضوئي واعتماد خوارزمية الانتشار الخلفي الرقمية لتخفيف تعديل الطور الذاتي SPM .

3-1. التأثيرات الخطية:

تعاني نظم الاتصالات الضوئية من التأثيرات الخطية التي تحدث للإشارة الضوئية أثناء انتشارها على طول الليف مثل التخماد والتشتت والضجيج. يعد تخامد الإشارة أحد العوامل الرئيسية التي تحد من مسافة الإرسال في أنظمة الاتصالات الضوئية لمسافات طويلة بسبب فقدان الإشارة لجزء من طاقتها أثناء انتشارها، يتعلق التخماد على طول الليف بطول الموجة والمادة المصنوع منها الليف. يعبر التشتت عن توسيع فترة النبضة خلال انتقالها عبر الألياف الضوئية، يؤدي توسع النبضة إلى تداخلها مع النبضات التي تجاورها على الليف الضوئي وحدوث مشكلة تداخل الرموز Inter Symbol Interference (ISI) [12]، يوجد عدة أنواع للتشتت مثل التشتت اللوني Chromatic Dispersion (CD) وتشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion (PMD) وتشتت دليل الموجة [13].

يوجد العديد من مصادر الضجيج التي تؤثر على وصلة الانتشار مثل ضجيج المنبع والمضخمات وضجيج الإطلاق والضجيج الناتج عن ربط الدارات مع بعضها البعض، يظهر ضجيج الليزر الضوئي نتيجة التغيرات العشوائية لكثافة وطور الإشارة الضوئية ويسمى ضجيج الكثافة النسبية [4] Relative Density Noise (RIN).

3-2. التأثيرات اللاخطية :

يتم افتراض أن الألياف تعمل كوسيط خطي عند تصميم وصلة الألياف الضوئية الأساسية، أي أن خصائص الألياف لا تتغير مع استطاعة الإشارة الضوئية، ولا تتفاعل الإشارة مع إشارات أخرى ضمن الليف. لكن في الحقيقة جميع المواد تتصرف بسلوك لاخطي من أجل كثافة استطاعة عالية للحقل المطبق ويزداد معامل الانكسار للوسط مع زيادة الاستطاعة. أي أن معامل انكسار الليف n لا يعتمد فقط على التردد وإنما يعتمد أيضاً على كثافة الاستطاعة الضوئية (P/A_{eff}) والتي يتم تعريفها على أنها نسبة الاستطاعة الضوئية P إلى مساحة المنطقة الفعالة للليف A_{eff} ، يضغط المجال الكهرومغناطيسي الجزيئات ويزيد من قيمة معامل الانكسار، تسمى هذه الظاهرة تأثير كير [14] Kerr effect، ويعطى معامل انكسار الليف على النحو:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (2)$$

تمثل n_0 معامل الانكسار الخطي، و A_{eff} المساحة الفعالة للليف الضوئي، و n_2 معامل الانكسار اللاخطي، و P الاستطاعة الضوئية.

3-2-1. Self-Phase Modulation: التعديل الطوري الذاتي

لا يؤثر إدخال معامل الانكسار اللاخطي ضمن معادلة انتشار النمط على شكل النمط Mode Shape بل يؤثر على ثابت الانتشار ويصبح مرتبط بالاستطاعة ويمكن كتابته وفق المعادلة (3). [2].

$$\beta = \beta_0 + \gamma P \quad (3)$$

β_0 معامل الانتشار الخطي، β معامل الانتشار اللاخطي، γ المعامل اللاخطي يعطى بالمعادلة (4):

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (4)$$

λ طول الموجة في الخلاء.

تعتمد سرعة الموجة الضوئية ضمن وسط نقل ما على معامل الانكسار وبالتالي تغيره سيجعل القيم اللحظية للكثافة تنتشر بسرعات مختلفة وتصل في أزمنة مختلفة إلى نهاية الليف، و تتحول تغيرات الاستطاعة الضوئية مع الزمن إلى تغيرات في الطور تسمى هذه العملية تعديل الطور الذاتي [15] SPM. يسبب تعديل الطور الذاتي اتساعاً في طيف الإشارة يترافق مع إزاحة طورية لاختطية ϕ_{NL} تعطى بالعلاقة التالية [3]:

$$\phi_{NL} = \int_0^z \gamma P(z) dz = \gamma P L_{eff} \quad (5)$$

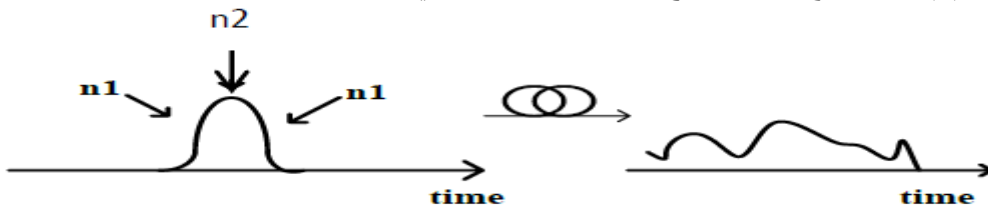
حيث أن P : استطاعة الدخل، و يعطى الطول الفعال للليف الضوئي L_{eff} بالعلاقة التالية:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (6)$$

حيث L طول الليف، α معامل التخماد وتبلغ قيمته $0.17-0.25$ [dB/km] من أجل الأطوال الموجية ضمن نافذة الإرسال 1550 nm . وهكذا نجد أن التغيرات اللحظية في الطور اللاخطي تؤدي إلى توليد مركبات ترددية جديدة على جانبي تردد الحامل مسببة اتساعاً في طيف الإشارة [3]، يعطى الاتساع الطيفي اعتماداً على الإزاحة الطورية اللاخطية بالنسبة للزمن بالعلاقة (7):

$$\delta_w = -\frac{\partial \phi_{NL}}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial p}{\partial t} L_{eff} \quad (7)$$

يحدث تأثير SPM عند انتشار إشارة وحيدة ضمن الليف لذا يسمى تعديل الطور الذاتي إذ نلاحظ من الشكل (1) تشوه واتساع النبضة الناتج عن هذا التأثير اللاخطي.



شكل (1) اتساع النبضة الناتج عن التعديل الذاتي للطور

3-3. معادلة الانتشار عبر الليف البصري :

تستخدم معادلة شرودنجر اللاخطية ($NLSE$) *Nonlinear Shroinger Equation* لوصف انتشار النبضة في الليف، وهي معادلة تفاضلية جزئية لاخطية ذات مرتبة مرتفعة، يمكن الحصول على معادلة الانتشار من مجموعة معادلات مكسويل لوصف انتشار النبضة في الليف البصري ويعطي الشكل الشعاعي للمعادلة بالعلاقة التالية [3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \underbrace{\beta_1 \frac{\partial A}{\partial t}}_{\text{Group velocity}} + \underbrace{\frac{j\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}}_{\text{CD effect}} - \underbrace{\frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3}}_{\text{CD slope}} + \underbrace{\frac{\alpha}{2} A}_{\text{Attenuation}} = \underbrace{j\gamma |A|^2 A}_{SPM} \quad (8)$$

يمثل الحد الأخير من المعادلة تأثير $kerr$ اللاخطي حيث أن:

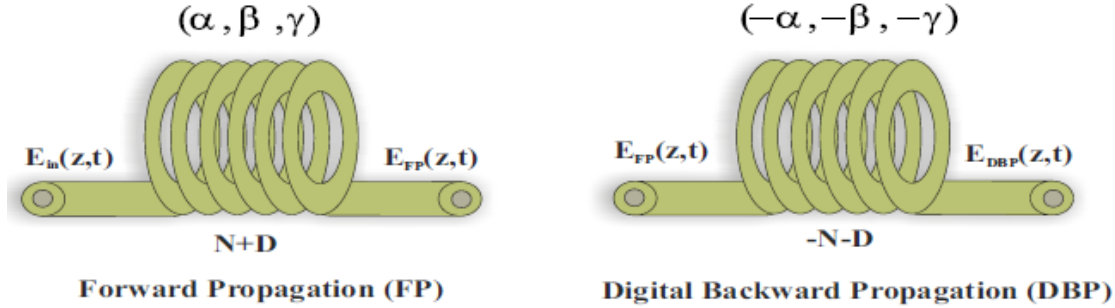
A : غلاف الحقل الكهربائي المتغير ببطء.

γ : المعامل اللاخطي.

إنه من غير الممكن حل المعادلة بشكل تحليلي وبخاصة عندما توجد التأثيرات اللاخطية مع التشتت لذلك نستخدم الطرائق العددية لحل هذه المعادلة من أجل تحليل تأثيرات الليف عبر الوسط اللاخطي [16].

4-3 خوارزمية الانتشار الخلفي الرقمية *Digital Back Propagation* :

يتم تنفيذ التعويض اللاخطي باستخدام طريقة الانتشار الخلفي الرقمية *DBP*، نظراً لأن معادلة *NLS* تدرس الإشارات الضوئية التي تنتشر للأمام مع طول الألياف أحادية الوضع *SMF*، يصبح *DBP* اللاخطية داخلنا فوال تشتت اللوني في جانب المستقبل عن طريق نشر الإشارات الضوئية إلى الخلف مع طول للياف افتراضية تم تصميمه بواسطة معادلة *NLS*.



شكل (2) الانتشار الخلفي الرقمي *DBP*

يتم تعيين التيارات الضوئية المستقبلية في مستقبل ضوئي متماسك خطأً إلى المجال الضوئي، بحيث يصبح كل من السعة الضوئية و الطور متاحين للمعالجة الرقمية في جهاز الاستقبال، يمكن نشر هذه الإشارة المستقبلية رقمياً من خلال نموذج الألياف العكسية لتعويض التشتت واللاخطية. تتطلب *DBP* حل معادلة شرودنغر اللاخطية *NLSE* لمعرفة بارامترات الليف، بالنسبة إلى استقطاب واحد و مع عكس حيز المجال، يتم إعطاء *NLSE* من خلال المعادلة التالية [17]:

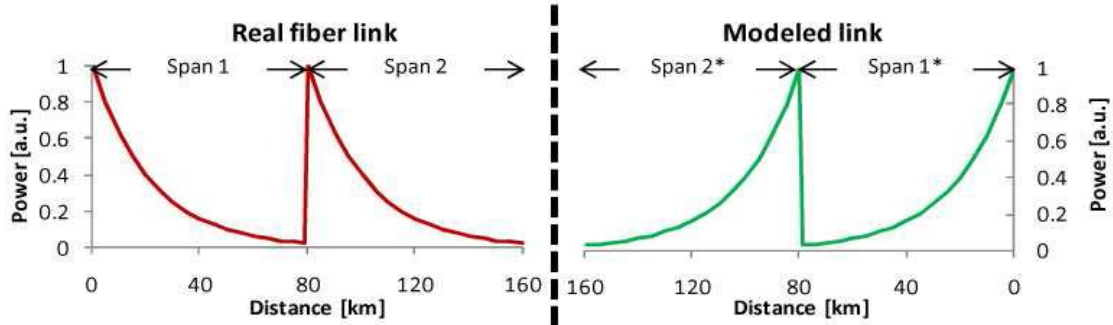
$$\frac{\partial E}{\partial(-z)} = (D + N)E \quad (9)$$

حيث: E هو المجال العقدي للإشارة المستقبلية. D هي معامل تفاضلي يحسب من أجل التشتت في وسط خطي و N هو المعامل اللاخطي للليف :

$$D = \frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\alpha}{2}(10-a)$$

$$N = j\gamma|E|^2(10-b)$$

حيث α هو عامل التخماد، β_2 ثابت انتشار من الدرجة الثانية [ps^2/km], γ العامل اللاخطي. من المهم جداً ملاحظة أن عكس حيز لمجال يعني أن الليف النموذجي تم تصميمه وفقاً لمبدأ "أول ما يصل أخيراً"، حيث يكون امتداد الليف أول هو الامتداد النموذجي الأخير و بداية كلامتداد ليفي هو نهاية كلامتداد نموذجي [17]. يتم رسم الاستطاعة في نظام ضوئي ذي امتدادين (*two-span*) ونموذج الوصلة العكسية المقابلة مقابل مسافة الانتشار في الشكل (3).



شكل (3) الاستطاعة المقابلة لمسافة الانتشار لوصلة ضوئية ذات امتدادين وربط الانتشار الخلفي المقابل عند استخدام *NLSE* المعكوس

يحسب الحل العددي للمعادلة (9) باستخدام خوارزمية فورييه ذات الخطوة المجزأة *Split-Step Fourier Method (SSFM)* حيث يتم التعامل مع الألياف على أنها سلسلة من المقاطع الخطية (يتم اعتبار D فقط) والمقاطع اللاخطية المشتتة (يتم اعتبار N فقط). القسم الخطي في خوارزمية الانتشار الخلفي الرقمية DBP هو ذاته المستخدم في تعويض CD ، والقسم اللاخطي من DBP مشابه للقسم المستخدم في المعوض اللاخطي ذي الخطوة الواحدة. تعطى الإزاحة الطورية لكل عينة تعطى بالعلاقة التالية [17]:

$$\theta_{NL}(t) = k\gamma L_{eff}|E|^2 \quad (11)$$

حيث: k هو عامل تعويض تم تحسب منه ليتناسب مع حجم الخطوة الافتراضي وطول الألياف لكل امتداد يتم تعيين قيمته بين 0 و 2 .

L_{eff} هو الطول الفعال لكل خطوة، في الحالات التي تعوض فيها كل خطوة عن واحد أو أكثر من امتدادات الألياف يتم إعطاء الطول الفعال لجميع الامتدادات من خلال:

$$L_{eff} = s \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha L_{span})}{\alpha} \quad (12)$$

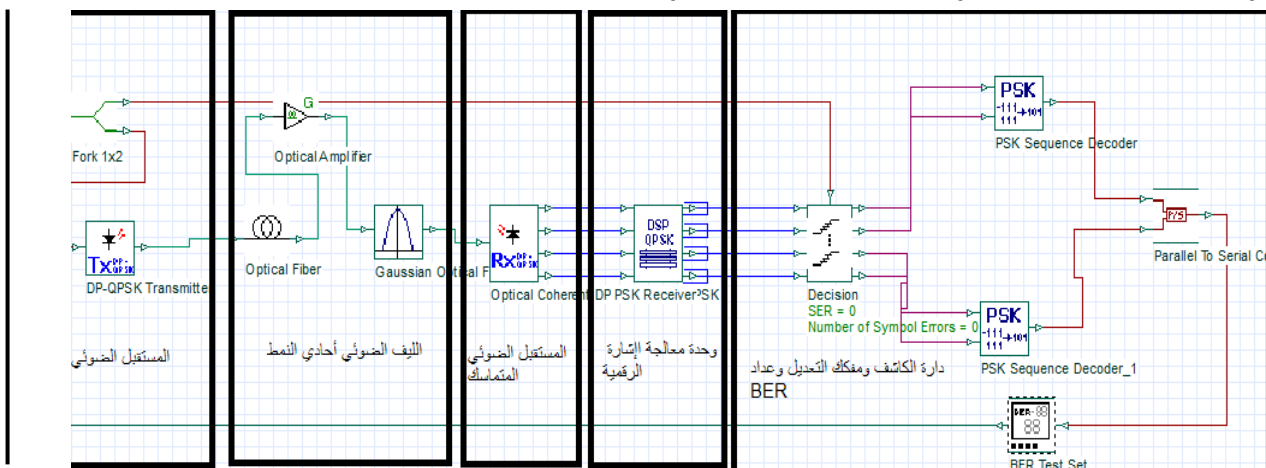
حيث: L_{span} طول كل امتداد و s عدد الامتدادات اللبية التي يتم تعويضها عن طريق كل خطوة، إذا كانت كل خطوة تعوض فقط عن جزء من الامتداد يصبح الطول الفعلي:

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L_{step})}{\alpha} \quad (13)$$

L_{step} حجم الخطوة المستخدم للتعويض.

4. النتائج والمناقشة :

يبين الشكل (4) نموذج المحاكاة المدروس وهو نظام ضوئي متماسك بمعدل $112Gb/s$ وصيغة تعديل $DP-QPSK$ وبالاعتماد على تقنية معالجة الإشارة الرقمية. يتكون النظام من مرسل $DP-QPSK$ وقناة الإرسال هي الليف الضوئي أحادي النمط SMF والمستقبل المتماسك، وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP ، مفكك التعديل ودارة الكاشف وعداد BER لتقدير معدل خطأ البت.



شكل (4) المخطط العام للنموذج المدروس

يعاني الليف الضوئي تخامد أقل ما يمكن يساوي 0.2dB/km عندالنافاذة 1550 nm وهي نافذة الإرسال التي تم إرسال الضوء ضمنها في هذا البحث. يبين الجدول (1) بارامترات الليزر CW المستخدم في المحاكاة:

جدول (1) بارامترات الليزر

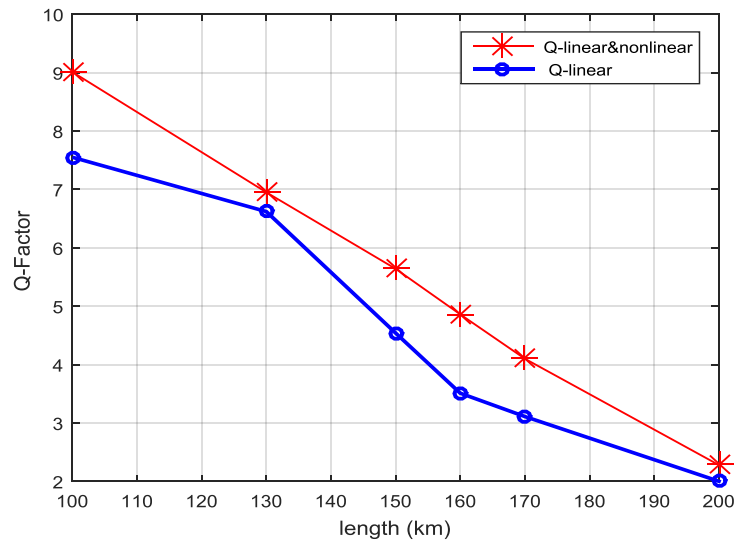
المحدد	القيمة
التردد	1550nm
الاستطاعة	متغير
عرض الخط	0.1MHz

يبين الجدول (2) بارامترات ليف SMF ذات الطول المتغير حسب المواصفات الفنية للشركات المصنعة للألياف الضوئية، يليه مضخم $EDFA$ لتعويض تخامد الليف بريح 20dB وضجيج -4dB .

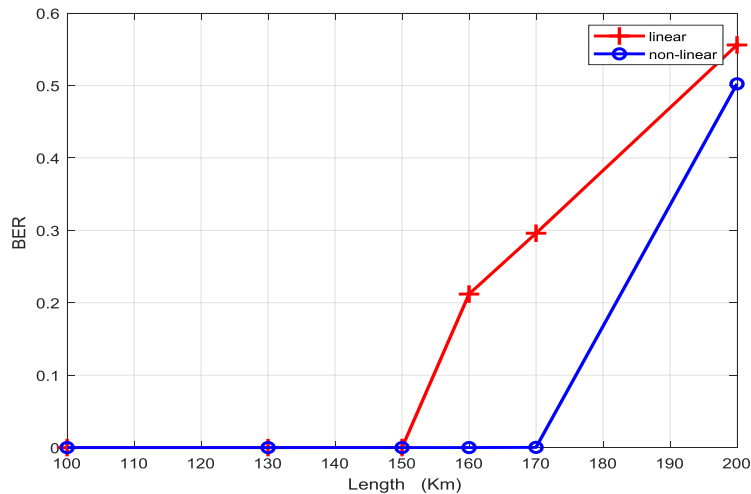
جدول (2) بارامترات الليف لضوئي

البارامتر	القيمة
الطول	متغير
معامل التخامد α	0.2dB/km
معامل التشتت D	$16.75\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$
معامل الانحدار S	$0.075\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$
معامل PMD	$0.05\text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
معامل الانكسار اللاخطي n_2	$26\text{e}-021\text{ m}^2/\text{W}$
مساحة المنطقة الفعالة لليف A_{eff}	$80\mu\text{m}^2$

تم تطبيق تعويض التأثيرات الخطية (التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب وضجيج طور الحامل) على النظام الموضح في الشكل (4)، الذي تم تصميمه في هذه الدراسة و مقارنتها مع تعويض التأثير اللاخطي SPM ودراسة الفرق والتغير في جودة وأداء النظام. يبين الشكل (5) المقارنه للنظام المدروس عند تعويض التأثيرات الخطية فقط مع النتائج التي حصلنا عليها عند تعويض تأثير تعديل الطور الذاتي SPM .

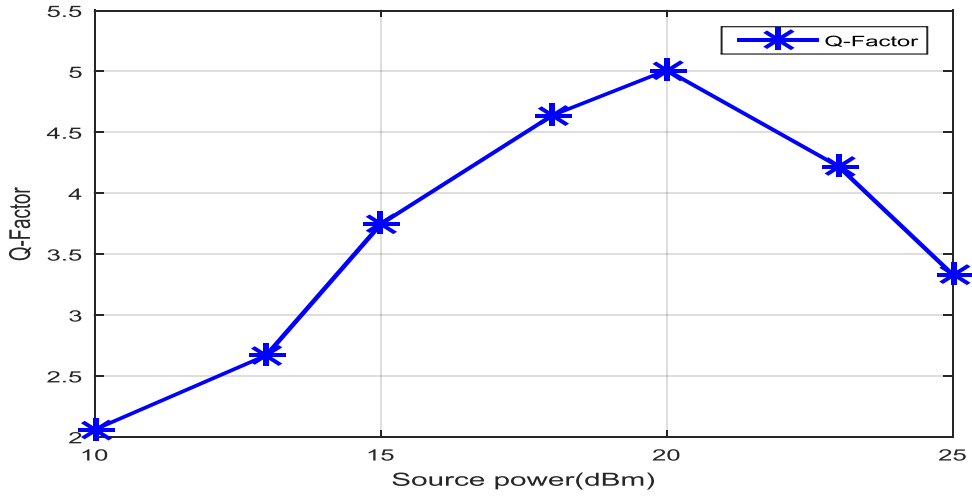


(أ)

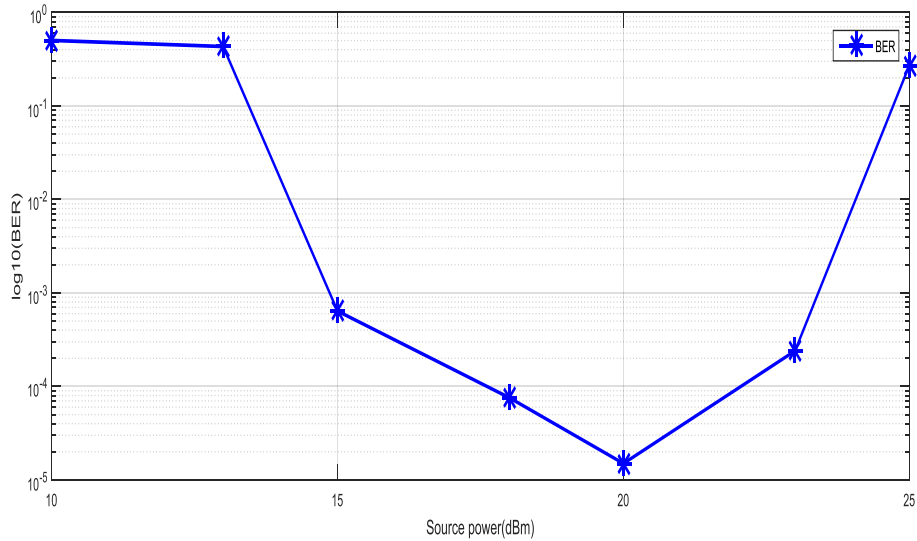


(ب)

شكل (5) مقارنة بين تعويض التأثيرات الخطية فقط و تعويض التأثير اللاخطي. (أ) معامل Q. (ب) BER
 يبين الشكل (5) أن التغير واضح جداً في النتائج وجودة النظام عند تعويض تأثير تعديل الطور الذاتي،
 و أن أقل جودة للنظام تكون عند مسافة 200Km في نتائج تعويض تأثير SPM. ثم في هذا البحث تحسين جودة
 النظام عند هذه المسافة ودراسة تأثير تغير طاقة المرسل و حجم خطوة الخوارزمية.
 يبين الشكل (6) دراسة تغير قيمة الطاقة المرسل مع طول ليف ثابت 200 Km لتوضيح تأثير طاقة
 الإرسال على التأثير اللاخطي.



(أ)



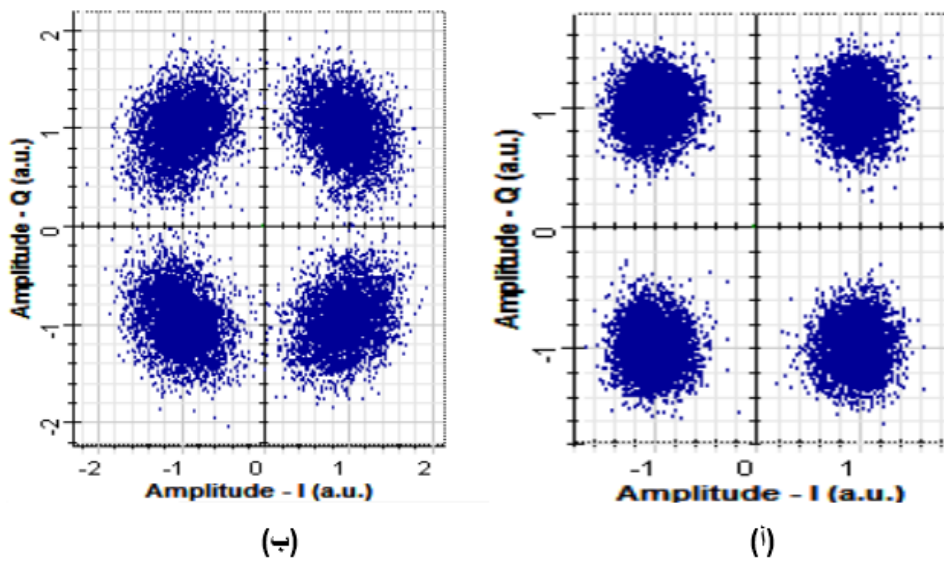
(ب)

شكل (6) تغير الاستطاعة المرسله عند طول ليف 200km. (أ) معامل Q ، (ب) معدل خطأ البت للنظام BER .

يوضح الشكل (6) أن أفضل قيمة حصلنا عليها لمعامل Q عند قيمة الاستطاعة 20 dBm حيث بلغت تقريباً 5.01 كذلك قيمة BER تساوي 1.5×10^{-6} . ونلاحظ أن زيادة الاستطاعة المرسله تدريجياً حتنا لقيمة 20dBm تؤدي إلى إيصال كمية أكبر من الاستطاعة إلى المستقبل وبالتالي تحسن قيمة معامل Q وانخفاض معدل خطأ البت، لكن يترافق ذلك مع زيادة التأثيرات اللاخطية والتي يصبح تأثيرها أكبر بعد هذه القيمة ويبين الشكل (6) هذا الانخفاض في قيمة معامل Q وارتفاع معدل خطأ البت BER .

يبين الشكل (7) تغير كوكبة البتات عند تعويض تأثير SPM مقارنةً مع تعويض التأثيرات اللاخطية فقط عند قيمة

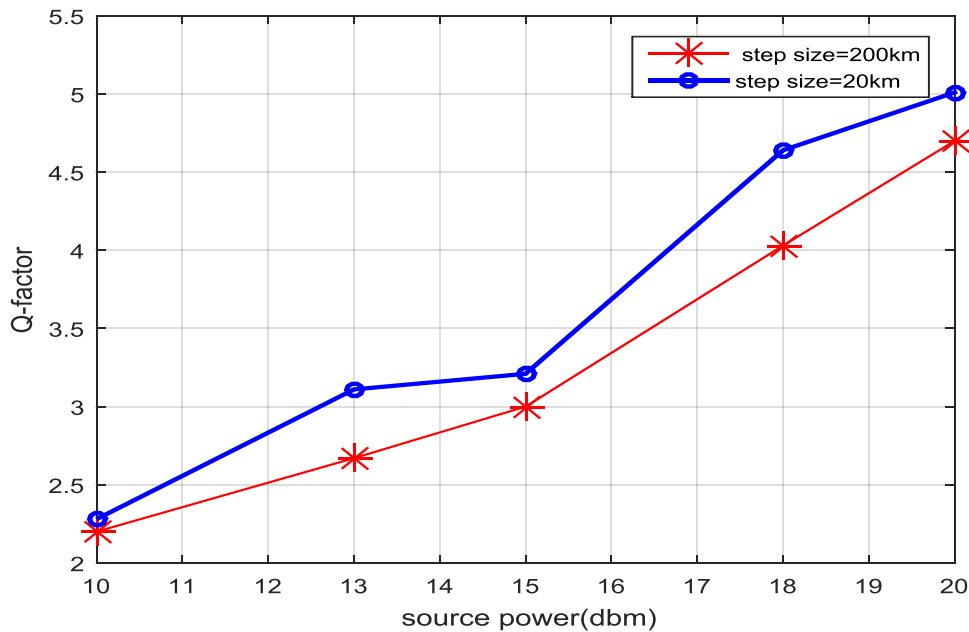
استطاعة 20dBm.



شكل (7) كوكبة البتات . (أ) تعويض التأثير اللاخطي، (ب) تعويض التأثيرات الخطية فقط.

يوضح الشكل (7) أن كوكبة البتات عند تعويض التأثير اللاخطي أكثر تركزاً ومحافظة على قيمة الطور فيما بينهم بالمقارنة مع كوكبة البتات عند تعويض التأثيرات الخطية فقط حيث كانت قيمة معامل Q لها ما يقارب 3.4 ومعدل خطأ البت 0.22.

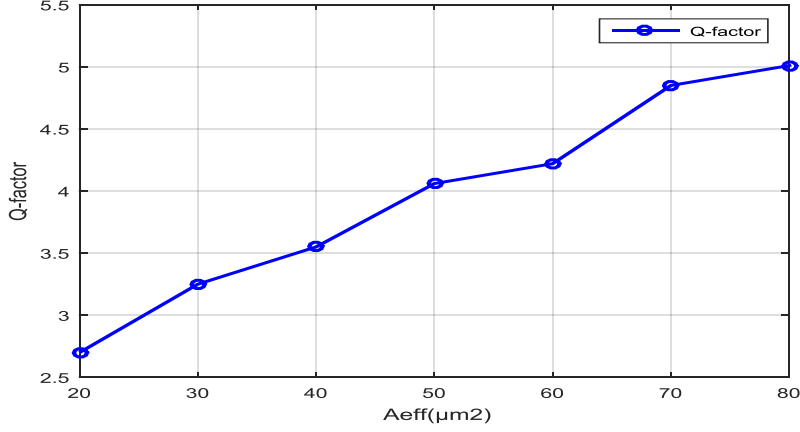
يعد حجم الخطوة لخوارزمية DBP من المتغيرات المهمة لدراسة تأثير تعديل الطور الذاتي SPM ، تم في هذا العمل دراسة قيمتين لحجم الخطوة عند طاقة إرسال 20dBm وطول ليف 200 Km ، كما موضح في الشكل (8).



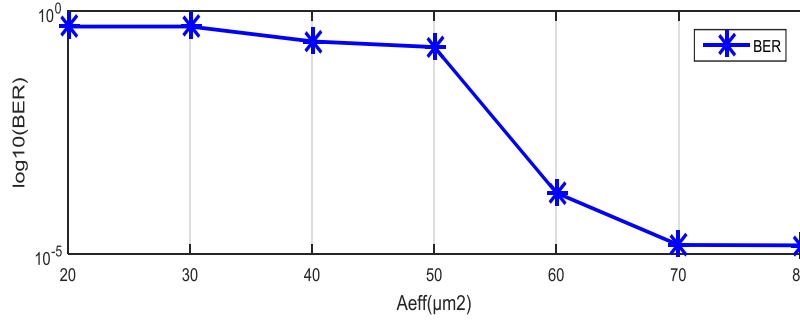
الشكل (8) معامل Q للنظام عند تغيير حجم الخطوة المستخدم في خوارزمية DBP.

يوضح الشكل (8) تحسن معامل Q عند حجم خطوة 20km مع تغيير الاستطاعة للمرسل مقارنة مع حجم خطوة 200km مما يدل على جودة أداء النظام كلما كان حجم الخطوة أصغر .

تعد المساحة الفعالة لمقطع الليف من المتغيرات المهمة والتي لها تأثير واضح على التأثير اللاخطي وبالتالي تؤثر على أداء النظام الضوئي، فهي لديها تأثير على عرض النطاق لزيادة معدل نقل البيانات داخل الليف، وبينما الشكل (9) تأثير تغير القيمة الفعالة لمساحة مقطع الليف على معامل Q ومعدل خطأ البت للنظام المدروس



(أ)



(ب)

شكل (9) تأثير تغير المساحة الفعالة. (أ) معامل Q عند تغير المساحة الفعالة لليف، (ب) معدل خطأ البت BER عند تغير المساحة الفعالة لليف.

يوضح الشكل (9) أنه عند زيادة المساحة الفعالة تقل لخطية الليف وبالنتيجة يتحسن أداء النظام من حيث معامل Q ومعدل خطأ البت BER وأنه عند قيمة $80\mu\text{m}^2$ كانت قيمة معامل Q تساوي 5.01 ومعدل خطأ البت يساوي 15×10^{-6} .

5.5 الاستنتاجات والتوصيات :

تم خلال هذا البحث تحليل أداء نظام إرسال ضوئي متماسك بمعدل إرسال 112Gbit/s وصيغة تعديل $DP-QPSK$ وتحسين أداء هذا النظام من خلال تعويض التأثير اللاخطي SPM . أظهرت النتائج أنه بتعويض التأثير اللاخطي يمكننا استخدام النظام لمسافات إرسال أطول عند استطاعة إرسال 10dBm ، و بزيادة استطاعة الإرسال يمكننا استخدام طول ليف 200km عند استطاعة 20dBm وبقيمة استطاعة أقل من هذه القيمة تكون جودة النظام منخفضة وبزيادة الاستطاعة أعلى من هذه القيمة سيزداد تأثير تعديل الطور الذاتي SPM وتتخفض جودة النظام. حجم الخطوة لخوارزمية الانتشار الخلفي الرقمية يؤثر على أداء النظام وكلما كان حجم الخطوة أقل

يعطي نتائج أفضل للنظام، والمساحة الفعالة لمقطع الليف لها تأثير على أداء النظام وزيادة أو تخفيض التأثير
اللاخطي، عند زيادة المساحة الفعالة ينخفض التأثير اللاخطي ويتحسن أداء النظام.
يمكن دراسة تعويض التأثيرات اللاخطية لمسافات إرسال أطول من 200 km مع صيغ تعديل مختلفة
ومقارنة أداء النظام .

المراجع :

- [1] Ali, F., Khan, Y., Ali, A., & Ahmad, G. (2018). Minimization of nonlinear impairments and its impact on transmission performances of high-capacity long-haul optical networks. *Journal of Optical Communications, 1*(ahead-of-print).
- [2] Bhusari Shraddha, N., Deshmukh Vikas, U., & Jagdale Shantanu, S. (2016). Analysis of SPM, XPM, and FWM in Fiber Optic Communication Using OptiSystem. *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering, 2*(07).
- [3] Chomycz, B. (2009). *Planning fiber optics networks*. McGraw-Hill Education Group.
- [4] Agrawal, G. P. (2000). Nonlinear fiber optics. In *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century* (pp. 195-211). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] غصنة، ف؛ نصر، م. 2018 "زيادة الفعالية الطيفية لأنظمة الاتصالات البصرية DWDM باستخدام المرشحات ضيقة المجال". مجلة جامعة طرطوس.
- [6] غصنة، ف. 2019 "تقنية مبتكرة في تصميم مستقبل ضوئي- نو تضخيم مسبق في الاتصالات الضوئية عبر الأقمار الصناعية". مجلة جامعة طرطوس.
- [7] نصر، م. 2018 "مقارنة أداء نظام اتصالات بصري متعدد الأطوال الموجية DWDM يستخدم عدة تقنيات لتعويض التشتت". مجلة جامعة طرطوس.
- [8] نصر، م؛ اسعد، ر. 2018 "استخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية لتحسين أداء نظم الاتصالات الضوئية المتماسكة عالية السرعة". مجلة جامعة طرطوس.
- [9] نصر، م؛ اسعد، ر. 2020 "تصميم ومحاكاة نظام اتصالات ضوئية عالي السرعة باستخدام تقنية OFDM". مجلة جامعة طرطوس.
- [10] Koshy, M. S., & Pratheesh, P. (2014). Analysis of SPM and FWM in optical fiber communication system using optisystem. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 3*(3), 1700-1703.
- [11] Ip, E., Lau, A. P. T., Barros, D. J., & Kahn, J. M. (2008). Coherent detection in optical fiber systems. *Optics express, 16*(2), 753-791.
- [12] Silva, S. (2014). *Long-haul high capacity optical fiber communications link with DWDM technology* (Doctoral dissertation, California State University, Northridge).
- [13] Kaur, M., Sarangal, H., & Bagga, P. (2015). Dispersion compensation with dispersion compensating fibers (DCF). *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 4*(2), 354-356.
- [14] Pan, Z. (2011). *Intra-channel nonlinearity mitigation of long-haul single-carrier coherent detection optical communication systems using digital signal processing*. McGill University (Canada).
- [15] Rafique, D., Mussolin, M., Forzati, M., Mårtensson, J., Chughtai, M. N., & Ellis, A. D. (2011). Compensation of intra-channel nonlinear fibre impairments using simplified digital back-propagation algorithm. *Optics express, 19*(10), 9453-9460.
- [16] Mollenauer, L. F., & Gordon, J. P. (2006). *Solitons in optical fibers: fundamentals and applications*. Elsevier.
- [17] Du, L. B., & Lowery, A. J. (2010). Improved single channel backpropagation for intra-channel fiber nonlinearity compensation in long-haul optical communication systems. *Optics express, 18*(16), 17075-17088.