

## دراسة تأثيرات كير اللاخطية ضمن نظام اتصالات بصري يستخدم تقنية DWDM

د. محمد نصر \*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٥/١٥ . قُبل للنشر في ٢٠٢٣/٧/٢٤)

□ ملخص □

تتأثر تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف (DWDM) بالعديد من العوامل التي تحد من أداء النظام البصري، يمكن أن تقسم هذه العوامل إلى تأثيرات خطية liner وتأثيرات لا خطية non linear. تتلخص التأثيرات الخطية بالتخامد attenuation والتشتت dispersion بأنواعه المختلفة. أما التأثيرات اللاخطية والتي تحد من أداء النظام وجودة الإشارة فيتم تقسيمها إلى نوعين الأول: يسمى تأثيرات كير Kerr effects وتشمل تعديل الطور الذاتي self-phase modulation (SPM) وتعديل الطور المتبادل cross-phase modulation (XPM) ومزج الأمواج الأربعة (FWM) four wave mixing. النوع الثاني: هو التأثير اللاخطي الناتج عن التبعثر المحفز stimulated scattering ويضم تأثير بريليون Brillion وتأثير رامان Raman.

تم في هذا البحث دراسة تأثيرات كير اللاخطية على أداء نظام اتصالات بصري DWDM يستخدم ٤ قنوات بصرية كل منها يستخدم معدل ارسال 40 Gbps مع مجال ترددي فاصل بينها 50 GHz وليف بصري نوع SSMF يمتد لمسافة 75 km. تمت المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية Opti System المستخدمة لتطوير الشبكات البصرية.  
الكلمات المفتاحية: الأنظمة البصرية، DWDM، التأثيرات الخطية، التأثيرات اللاخطية، BER.

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

## Studying of Kerr effects in DWDM optical communication system

Dr.Mohammad Nassr \*

(Received 15/5/2023 . Accepted 24/7/2023)

### □ ABSTRACT

DWDM technology is affected by many factors that limit the performance of optical system. These factors can be divided into linear and nonlinear effects. Linear effects is attenuation and dispersion. As for nonlinear effects that limit system performance and signal quality, they are divided into two types. The first one is called Kerr effects and includes self-phase modulation (SPM), cross-phase modulation (XPM) and four wave mixing (FWM). The second type is the nonlinear effect resulting from stimulated scattering contain Brillion and Raman effect.

In this research, Kerr's nonlinear effects on the performance of a DWDM optical communication system were studied using 5 optical channels, each of which uses a transmission rate of 40 Gbps, with a frequency range of 50 GHz, and an optical fiber type SSF that extends to a distance of 75 km. The simulation was done using the Opti System software environment used to develop optical networks.

**Key Words:** Optical systems, DWDM, NRZ, Linear effect, Non linear effect, BER.

---

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

## 1- مقدمة

تعتمد أنظمة الاتصالات البصرية الحالية على تقنية DWDM بكثرة بسبب الحاجة الكبيرة لزيادة سعة مجال قناة الإرسال والطلب الكبير على عرض المجال للمستخدمين، وذلك للإمكانيات الكبيرة التي تنتجها هذه التقنية. إلا أن التأثيرات الخطية واللاخطية التي تتعرض لها الإشارة أثناء عبورها الليف الضوئي تؤثر بشكل كبير على جودة الإشارة ونسبة أخطاء البت الواردة إلى المستقبل [1].

تتقسم التأثيرات الخطية إلى مجموعتين هما الضياعات losses والتشتت dispersion. يُعرف الضياع بأنه التخماد باستطاعة الإشارة أثناء عبورها الليف الضوئي وتعتمد على طول الليف، يمكن تعويض هذه الضياعات باستخدام مكبرات amplifiers. أما التشتت فينقسم إلى تشتت لوني chromatic dispersion (CD) وتشتت نمط الاستقطاب polarization mode dispersion (PMD). ينتج التشتت من انتشار كل طول موجة بسرعة مختلفة عن الأخرى ضمن الليف مما يؤدي إلى وصولها بأزمنة منفصلة إلى المستقبل. تسبب هذه الظاهرة توسع بعرض النبضة وتداخل الأطوال الموجية مع بعضها البعض [2]. يمكن تعويض تأثير التشتت باستخدام ليف معوض للتشتت dispersion compensation fiber (DCF) أو باستخدام ليف شبكة براغ fiber Bragg grating (FBG) [3]. تتقسم التأثيرات اللاخطية إلى مجموعتين أيضاً: تأثيرات كير وتأثيرات التبعثر [4]. تسمى تأثيرات كير أيضاً بتأثيرات معامل الانكسار refractive index وتحدث عندما تتجاوز استطاعة النبضة الضوئية pulse intensity حد أعظمي مسموح. تؤدي هذه الزيادة للحقل المغناطيسي لتعديل خصائص وسط الليف والذي بدوره يؤثر على انتشار الإشارة البصرية [5].

يسمى تغير معامل الانكسار للوسط بتأثير كير Kerr effect ويعتمد هذا التأثير على الجزء اللاخطي من معامل الانكسار والمحدد بالعلاقة [6]:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

n: معامل الانكسار للليف.

$n_0$ : معامل الانكسار العادي ordinary refractive.

$n_2$ : معامل الانكسار

I: الكثافة البصرية للنبضة.

تبين هذه المعادلة أن معامل الانكسار يزداد مع زيادة استطاعة النبضة والذي ينتج بدوره التأثيرات اللاخطية الغير مرغوبة مثل SPM, XPM, FWM. تنتج تأثيرات التبعثر عن الذرات والجزيئات التي تشكل الليف البصري والتي تسبب بضياع الاستطاعة ونقلها إلى أطوال موجية أخرى وتضم تغير رامان المحفز (SRS) وتغير بريليون المحفز (SBS).

## 2- هدف البحث

هدف البحث إلى دراسة تأثيرات كير اللاخطية على أداء نظام اتصالات بصري DWDM يستخدم لنقل أربع قنوات بصرية بمعدل يصل إلى 40 Gbps واقتراح طريقة لتخفيف هذه التأثيرات بما ينعكس إيجاباً على أداء النظام.

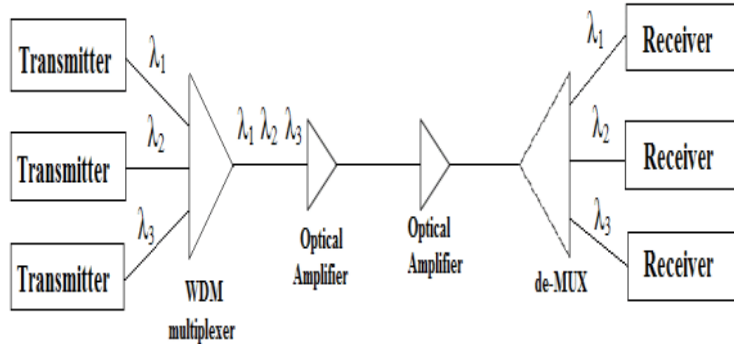
## 3- طرائق البحث ومواده

أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسات ومراجع علمية حديثة وعديدة تختص في هذا المجال وقد أخذت نتائجها وتوصياتها بعين الاعتبار، كما استخدمت البيئة البرمجية OptiSystem في وضع النماذج الرياضية والمحاكاة الحاسوبية واستخلاص النتائج [7][8][9].

### 3-1- شبكات التجميع بتقسيم طول الموجة البصرية

ساعدت هذه التقنية بشكل كبير على زيادة سعة الألياف البصرية الموضوعة بالخدمة من خلال القدرة على استخدام عدة أطوال موجية وإرسالها معاً بنفس الليف وتشابه تقنية Frequency Division Multiplexing FDM التجميع بتقسيم التردد والمستخدم ضمن النظم الراديوية لزيادة السعة [10]. وكان المحرك الرئيسي لتطور هذه التقنية هو اكتشاف المضخمات البصرية Optical Amplifiers التي تعطي ربح ثابت على الأطوال الموجية العاملة ضمن نوافذ الإرسال المنخفضة التخماد.

تستخدم تقنية DWDM لزيادة سعة الأنظمة البصرية للألياف الموضوعة بالخدمة ويتيح تقريب الأطوال الموجية العاملة من بعضها للوصول لتقنية HDWDM يبين الشكل (1) تقنية WDM



[10] WDM الشكل (1) تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة

### 3-2- التأثيرات الناتجة عن انتشار الضوء ضمن الألياف البصرية

تعد التأثيرات الخطية من العوامل الأساسية المرتبطة بالألياف البصرية، إلا أن استخدام الليزر عالية الاستطاعة وإرسال أكثر من طول موجة معاً بنفس الليف أدى لظهور التأثيرات اللاخطية ضمن النظم البصرية. ينتج الأثر اللاخطي عن الاهتزازات اللاتوافقية Anharmonic Motion لإلكترونات الترابط بسبب شدة الحقل الكهربائي المطبق وكنتيجة لذلك يتغير الاستقطاب الكلي للتثائيات الإلكترونية Electric Dipoles ويصبح لاخطي ويحقق العلاقة الآتية [11][12]:

$$P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)} : \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots) \quad (2)$$

P: الاستقطاب Polarization.

$\epsilon_0$ : السماحية الكهربائية للفراغ Vacuum Permittivity.

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

$\chi^{(1)}$  هو المعامل الخطي ويتغير تبعاً لمعامل الانكسار Refractive Index ويرتبط بمعامل التخامد Attenuation Coefficient.  $\chi^{(2)}$  يعبر عن التأثير اللاخطي من المرتبة الثانية، ويساوي الصفر من أجل ليف مصنع من ثنائي أكسيد السيليكون  $SiO_2$  بسبب تناظر الجزيئات Symmetric Molecule وبالتالي فإن الألياف البصرية لا تولد توافقيات من الدرجة الثانية.

تنشأ أدنى مرتبة للتأثيرات اللاخطية ضمن الألياف البصرية من المؤثر  $\chi^{(3)}$  والمسئول عن عدة ظواهر مثل التوافقيات من الدرجة الثالثة، ومزج الأمواج الأربعة، ومعامل الانكسار اللاخطي.

### 3-3- التأثيرات اللاخطية

تنتج التأثيرات اللاخطية ضمن الألياف البصرية عند ارتفاع كثافة الحقل الكهربائي للضوء المنتشر عن حد معين حيث، عندها يبدأ تأثير المعامل  $\chi^{(3)}$  بالظهور، عند الوصول لعتبة معينة للشدة تبدأ الثنائيات dipoles المشكلة لليف بالاهتزاز عند تردد الموجة المرسله الأمر الذي يسبب ظهور ترددات جديدة مغايرة للتردد المركزي المنتشر [13].

يمكن تقسيم التأثيرات اللاخطية الناتجة عن هذا المؤثر إلى نوعين الأول: تأثيرات التبعثر اللامر Inelastic Scattering ويتشكل بسبب تبادل الاستطاعة بين الحقل الكهرومغناطيسي والوسط أشهر أنواعه: تبعثر رامان Raman Scattering وتبعثر بريليون Brillion Scattering. النوع الثاني تأثيرات تغير معامل الانكسار Nonlinear Refractive Index ويسمى أيضاً بلاخطية كير Kerr Nonlinearity وتؤدي إلى تغير طور الموجة المنتشرة وفي بعض الحالات تؤدي لظهور مركبات ترددية جديدة.

تعد قيمة معامل الانكسار اللاخطي صغيرة وتم الإشارة لها بالمعدلة (١) إلا أن هذا التأثير أصبح كبير ويجب أخذه بالحسبان في نظم الاتصالات الحديثة وخاصة تأثيرات التعديل الطوري الذاتي SPM وتأثير التعديل الطوري المتبادل XPM ومزج الأمواج الأربعة FWM [14].

### 3-3-1- التعديل الطوري الذاتي (SPM) Self-Phase Modulation

يؤدي زيادة شدة مطال النبضة المرسله أو زيادة تركيز الضوء ضمن نواة الليف إلى تعديل معامل الانكسار لليف ليصبح [12]:

$$\tilde{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (3)$$

$n(\omega)$ : الجزء الخطي من معامل الانكسار linear refraction.

$|E|^2$ : الكثافة الضوئية ضمن الليف (optical density).

$n_2$ : الجزء اللاخطي من معامل الانكسار ويرتبط بالمؤثر  $\chi^{(3)}$  وفق العلاقة الآتية:

$$n_2 = \frac{3}{8n} \text{Re} \left( \chi_{xxxx}^{(3)} \right) \quad (4)$$

Re: تمثل الجزء الحقيقي من المؤثر.

يؤدي تغير معامل الانكسار إلى تغير طور الإشارة المنتشرة والذي بدوره يعدل المجال الترددي.

يرتبط طور النبضة المنتشرة مع معامل الانكسار اللاخطي وفق العلاقة الآتية:

$$\phi = \tilde{n} k_0 L = n + n_2 |E|^2 k_0 L \quad (5)$$

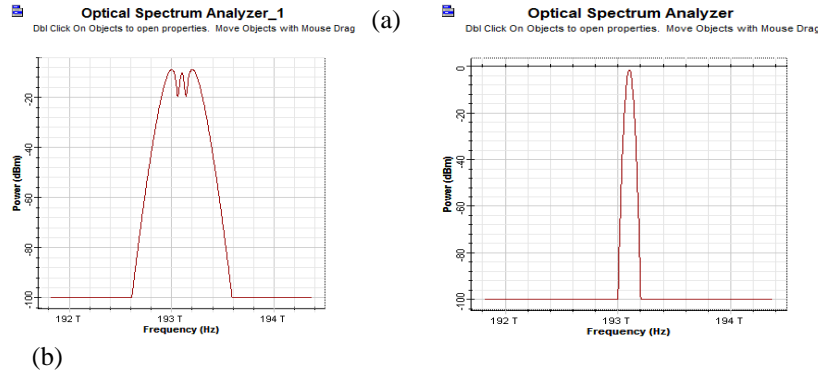
$k_0 = 2\pi/\lambda$ : دليل الانكسار الخطي لوسط الانتشار.

$L$ : طول الليف البصري.

$k_0$ : ثابت الانتشار.

$\lambda$ : طول الموجة.

تسبب ظاهرة SPM تذبذب chirp على الحافة الخلفية للنبضة trailing edge المنتشرة، بحيث تتجمع الترددات الأعلى ضمن النبضة الواحدة على الحافة الخلفية، في حين يسبب نظام التشتت غير المنتظم anomalous dispersion من أجل  $\beta_2$  سالب تجمع للترددات الأعلى على الحافة الأمامية leading edge يؤدي هذا التأثير المتعاكس إلى إلغاء كل من أثر SPM والتشتت وهي إحدى الحلول المقترحة لإلغاء SPM. تعد النبضة المنعزلة soliton أهم تطبيقات هذه الظاهرة وتعتبر من حسنات التأثيرات اللاخطية، يتم في تطبيقات النبضة المنعزلة الاستفادة من التعديل الترددي التي تسببه ظاهرة SPM ومن التعديل الترددي الذي يسببه GVD من أجل  $\beta_2$  سالبة للحصول على نبضة مستقرة على طول المسار بدون أي تغيير على شكل أو مطال هذه النبضة [15]. يبين الشكل (٢) أثر ظاهرة SPM على نبضة مستقرة عند مدخل ومخرج ليف ضوئي حيث يظهر بشكل واضح زيادة عرض المجال الطيفي للنبضة عند مخرج الليف وذلك نتيجة لتبادل الطاقة بين ترددات المجال الاسالي والترددات المتشكلة نتيجة لهذا التأثير.



الشكل (٢) أثر ظاهرة SPM (a) عند مدخل الليف، (b) عند مخرج الليف

### 3-2-3- التمدد الطوري المتبادل (XPM) Cross-Phase Modulation

تحدث ظاهرة التمدد الطوري المتبادل عندما تنتشر إشارات بأطوال موجة مختلفة معاً ضمن الليف، تسبب هذه الظاهرة تشوه في شكل النبضات المنتشرة حيث تصبح الازاحة في طور أي نبضة ناتجة عن النبضة نفسها SPM وعن النبضات الأخرى المنتشرة معه لتصبح علاقة الانزياح في الطور عند انتشار نبضتين على الشكل [12]:

$$\phi = n_2 k_0 L (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) \quad (6)$$

$E_1$ : شدة الحقل للنبضة الأولى (field intensity).

$E_2$ : شدة الحقل للنبضة الثانية.

يبدأ تأثير XPM بالظهور من أجل مستوى لمطال نبضة الدخل أعلى من حد معين، يسبب هذا التأثير زيادة طورية أكبر بمرتين عما يسببه SPM وينتج عنه تداخل cross talk بين الأطوال الموجية المنتشرة كما يؤدي إلى تشكيل ترددات جديدة كما في حالة FWM، وذلك عند حدوث توافق بالطور بين الاشارات. من أجل تخفيف هذه الظاهرة نسعى لوجود تشتت ضمن الليف المستخدم الأمر الذي يؤدي لتخفيف XPM حيث يسبب انتشار كل نبضة بسرعة مجموعة مختلفة عن الأخرى إلى إلغاء حدوث التوافق بالطور المطلوب من أجل انشاء الترددات الجديدة وعندها يقتصر أثر XPM على حالة العبور بين الاشارات.

### 3-3-3- مزج الأمواج الأربعة (FWM) Four Wave Mixing

يتم في هذه الظاهرة نشوء موجات جديدة عند انتشار ثلاث موجات معاً ضمن الليف، يرتبط تردد هذه الموجات مع الترددات المنتشرة وفق العلاقة الآتية:

$$w_4 = w_1 \mp w_2 \mp w_3 \quad (7)$$

$w_1, w_2$  and  $w_3$ : ترددات الأمواج المنتشرة ضمن الليف.

تعد الأمواج التي تقع ضمن نفس المجال band للموجات المنتشرة هي الأكثر أهمية هي حيث يمكن ترشيح الترددات البعيدة عن المجال المدروس. إضافة لهذه الترددات قد تنشئ ترددات من مرتبة  $2w_1 - w_3$ ،  $2w_1 - w_2$ ، و ترددات أخرى ناتجة عن اعتمادية الاستطاعة اللاخطية  $P_{NL}$  على الحقل من المرتبة الثالثة والذي يعطى بالعلاقة [13]:

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 \quad (8)$$

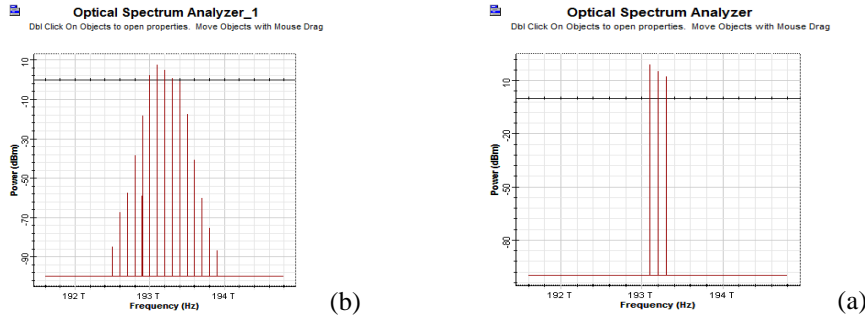
$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

$$E = E^{\wedge} e^{-j\omega t} + cc \quad (9)$$

cc: complex conjugate المرافق العقدي

$E^{\wedge}$ : مطال شدة الحقل الكهربائي

بالتالي سينتج عدد كبير من الترددات عند انتشار ثلاث موجات بترددات مختلفة وبطاقة نبضة تتجاوز حد معين، ويعزى ظهور هذه الترددات إلى التأثير الطوري الناتج عن انتشار الأمواج والذي يؤدي لنقل طاقة من إشارة الترددات إلى ترددات جديدة تقع في المجالات المذكورة بالمعادلة (٧). يبين الشكل (٣) الترددات المتولدة الناتجة عن انتشار ثلاث أطوال موجية معاً ضمن الليف.



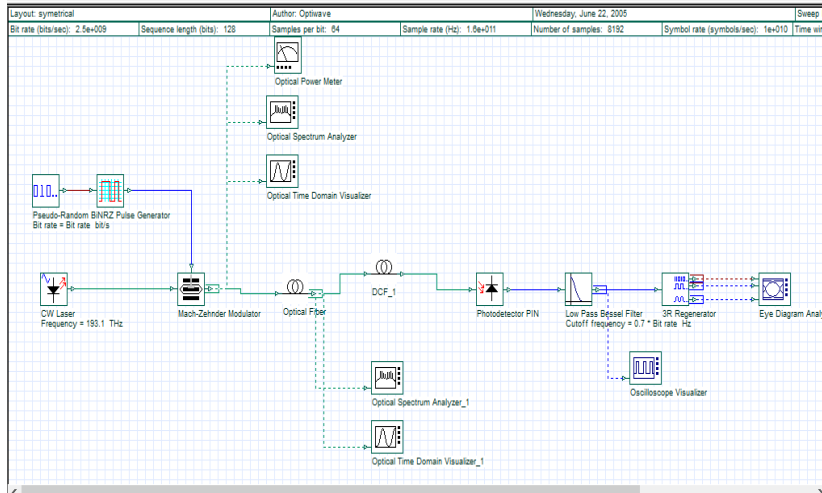
الشكل (٣) أثر ظاهرة FWM (a) عند مدخل الليف، (b) عند مخرج الليف

### 4- النتائج والمناقشة

تم في هذا العمل محاكاة نظام اتصالات بصري يستخدم قناة بمعدل ارسال 40 Gbps لدراسة أثر التعديل الطوري الذاتي ونظام DWDM يستخدم أربع قنوات ارسال وعلى مسافة للليف البصري تصل لـ 75 Km بمعدل ارسال 40 Gbps لدراسة تأثير التعديل الطوري المتبادل ومزج الأمواج الأربعة.

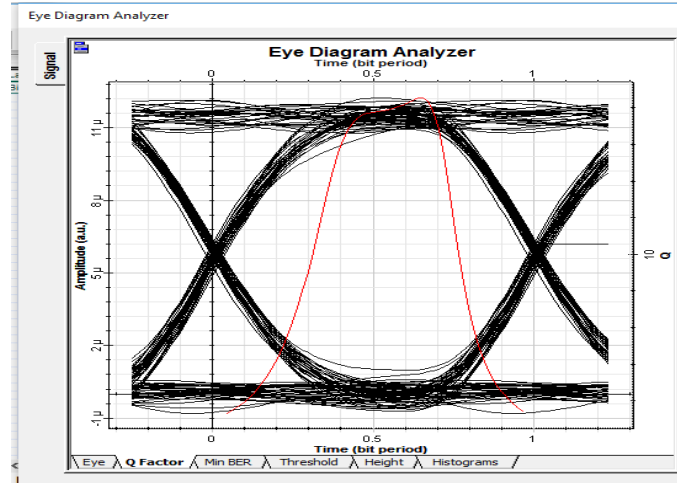
### 4-1- تأثير SPM

من أجل دراسة تأثير SPM تم اعتماد النظام المبين في الشكل (٤) والمكون من مرسل ليزري باستطاعة إرسال 20 dBm وطول موجة 1550 nm مع معدل MachZender ومعدل نبضات NRZ مع ليف بصري ومعوّض DCF يعوض كامل التشننت الناتج.

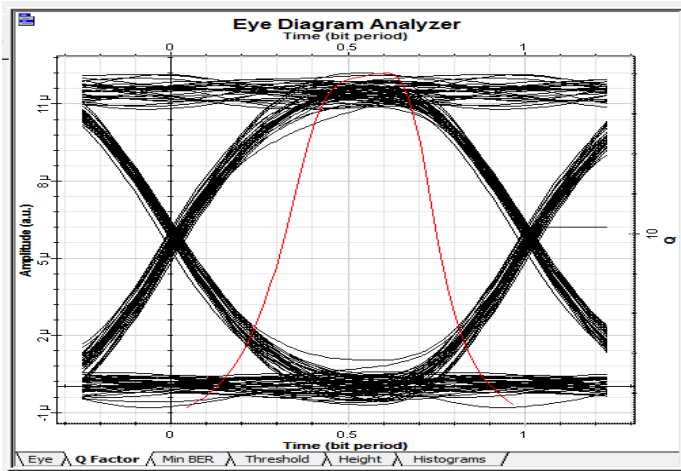


الشكل (٤) النظام البصري المقترح من أجل دراسة تأثير SPM

يبين الشكل (٥) شكل الإشارة بدون تأثير SPM حيث تنتشر الإشارة بجودة عالية ومعدل خطأ منخفض، أما عند تفعيل تأثير SPM فإن جودة الإشارة تتخفض كما يزداد معدل الخطأ كما موضح في الشكل (٦).



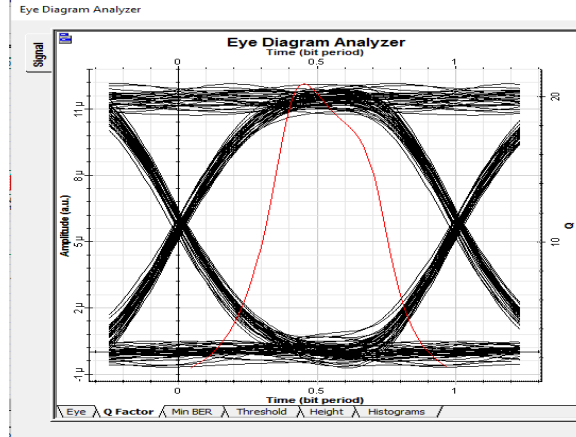
الشكل (٥): مخطط العين بدون تأثير SPM



الشكل (٦): مخطط العين مع تأثير SPM



تم استخدام استطاعة قليلة للإرسال مع الحفاظ على بعض التشتت ضمن الليف، SPM من أجل تخفيف تأثير يوضح الشكل (٧) مخطط العين للإشارة بعد إجراء عملية التعويض حيث نلاحظ انخفاض قيمة الخطأ بالإضافة إلى SPM. تحسن عامل الجودة للإشارة. يوضح الجدول (١) نتائج الحالات المدروسة لنظام



الشكل (٧) مخطط العين بعد عملية التعويض لـ SPM

يوضح الجدول (١) نتائج تأثير SPM

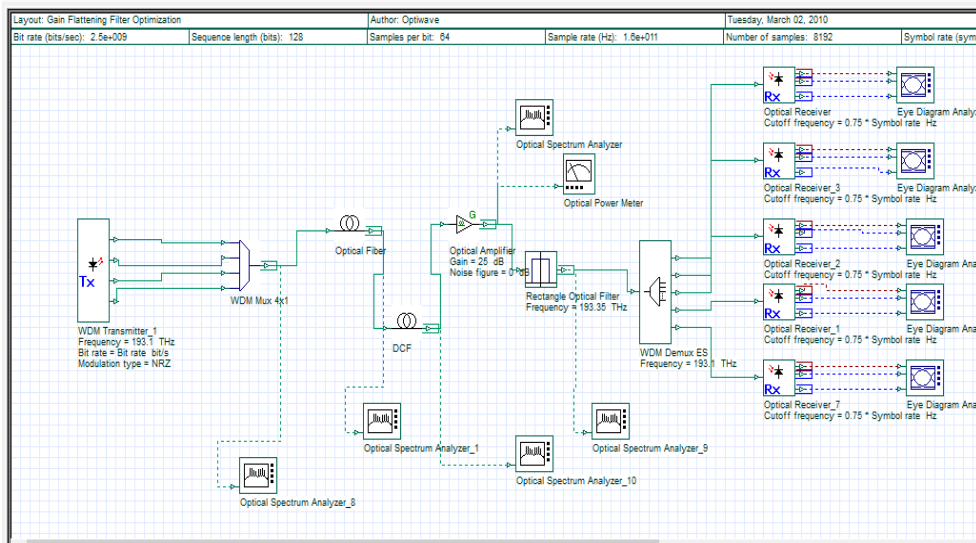
Eye height	Q-factor	BER	الحالة
$9.6011e^{-6}$	18.5363	$5.2557 e^{-14}$	SPM بدون تأثير
$9.5377e^{-6}$	18.0489	$4.02199e^{-11}$	SPM مع تأثير
$9.6933e^{-6}$	20.8864	$3.5547e^{-17}$	SPM بعد تعويض

نلاحظ أنه وبعد إجراء التعويض تناقص معدل خطأ البت إلى مرتبة  $3.5547e^{-17}$  وهو أمر جيد ساهم في

تحسين الأداء

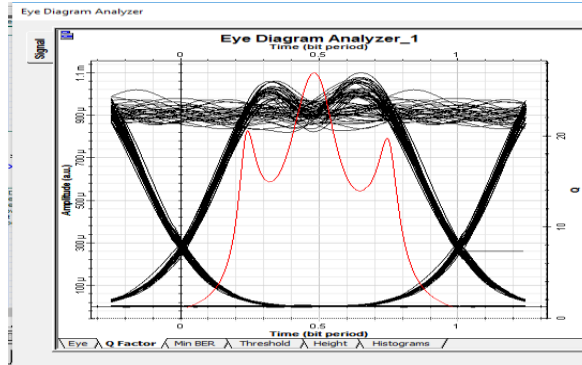
#### ٤-٢ تأثير XPM:

من أجل دراسة تأثير XPM تم استخدام النموذج الموضح في الشكل (٨) والمكون من ٤ قنوات كل منها باستطاعة 3 dBm وبمجال ترددي 50 GHz ومعدل إرسال 40 GHz مع ليف بصري ومعوّض لكامل التشتت.

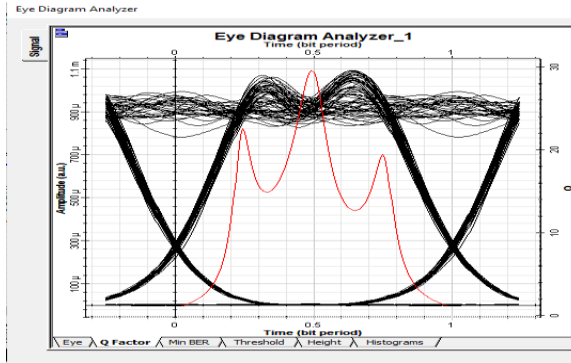


الشكل (٨) النظام البصري المقترح لدراسة تأثير XPM, FWM لنظم DWDM

يوضح الشكل (٩) الإشارة مع تأثير XPM، أما الشكل (١٠) يوضح شكل الإشارة بعد إجراء عملية التعويض من أجل تخفيف تأثير XPM، حيث تم ذلك من خلال زيادة التباعد بين القنوات ليصبح 100 GHz.



الشكل (٩): مخطط العين مع تأثير XPM

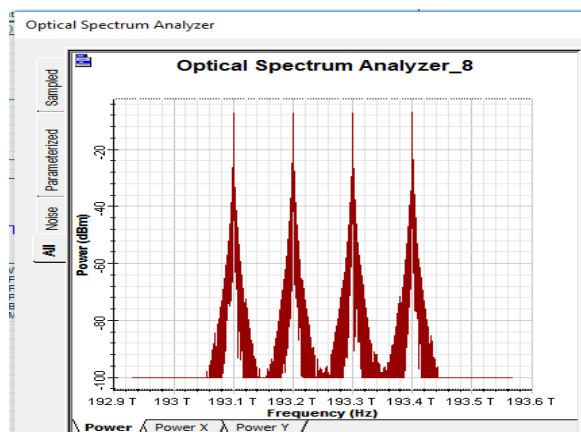


الشكل (١٠): مخطط العين بعد إجراء عملية التعويض لتأثير XPM

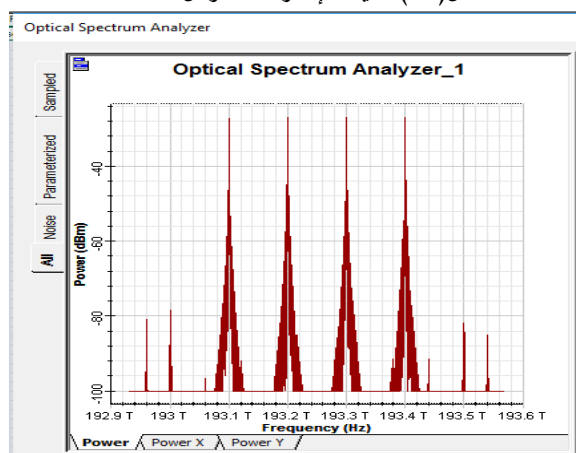
نلاحظ من الشكل (١٠) أن فتحت العين أصبحت أفضل وبالتالي أدى زيادة البعد بين القنوات العاملة إلى حدوث تحسين على أداء النظام

#### ٤-٣ تأثير FWM:

من أجل دراسة هذا التأثير تم استخدام نفس النظام السابق مع مسافة 100 GHz. يوضح الشكل (١١) و (١٢) طيف الإشارة عند خرج المرسل وبعد إرسال الإشارة عبر الليف الضوئي على التوالي. نلاحظ من الشكل (١٢) أن هناك العديد من الاشارات الغير مرغوب بها ظهرت على طيف الإشارة بعد انتشارها عبر الليف نتيجة لتأثير FWM.

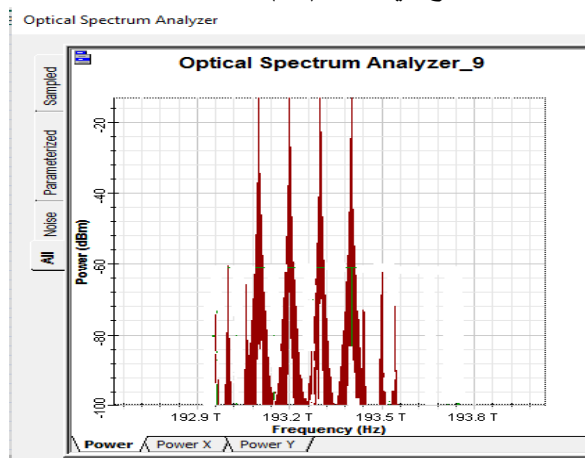


الشكل (١١): طيف الإشارة عند مرسل WDM



الشكل (١٢): طيف الإشارة بعد انتشارها عبر الليف

من أجل التعويض عن تأثير FWM تم استخدام مرشح بصري مستطيل بعد المكبر البصري من أجل إزالة أي الإشارات غير المرغوب بها كما هو موضح في الشكل (١٣).



الشكل (١٣): تعويض FWM عن طريق استخدام مرشح ضوئي مستطيل

## 5- الاستنتاجات والتوصيات

تم خلال هذا البحث اقتراح حلول لتحسين أداء النظم البصرية التي تستخدم تقنية DWDM. ويمكن أن نجمل الاستنتاجات التي توصلنا إليها بما يلي: أفضل تقنية لتعويض عن تأثير SPM هي السماح بوجود بعض التشتت اللوني بالوصلات الضوئية. أما تأثيرات XPM و FWM في أنظمة DWDM والتي تؤثر على جودة الإشارة و BER تم تخفيفها عن طريق زيادة التباعد بين القنوات بالإضافة إلى وضع مرشح نوع مستطيل في نظام DWDM. يمكن بناءً على نتائج البحث أن نوصي بعدد من القضايا من أجل التطوير والبناء على ماسبق:

- يمكن ضمن النظم الحديثة السماح بمعدل خطأ للبتات يصل حتى  $10^{-3}$  بسبب وجود تقنيات التصحيح الامامي وهذا الأمر يسمح بالتقريب أكثر بين القنوات المتجاورة وبالتالي زيادة سعة النظام.
- يمكن استخدام النظام المقترح لإرسال الإشارات إلى مسافات طويلة ويجب عندها مراعاة التشتت المتراكم وكذلك استخدام مضخمات لتعويض الضياع الناتج عن المسافة المقطوعة.
- تم التركيز على نوع التعديل NRZ المستخدم على مجال واسع لكن يمكن اقتراح أنواع تعديل أخرى تقدم عرض مجال أقل للإشارة المعدلة.
- يمكن استخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية لتعويض التأثيرات الخطية واللاخطية التي قد تتعرض لها الإشارة عند انتشارها ضمن الليف.

## 6- المراجع

- [1] M.Tosson, Walid S. El-Deeb, A.E.Abdelnaiem, 2015 “*Comparison of Chromatic Dispersion Compensation in Optical Fiber with Fiber Bragg Grating (FBG) and Dispersion Compensation Fiber (DCF) for 10 Gbps and 40 Gbps*”, International Journal of Scientific and Engineering Research (IJSER), Vol 6, Issue 6
- [2] M.Tosson, Walid S. El-Deeb, A.E. Abdelnaiem, 2015 “*Dispersion Compensation Techniques for DWDM Optical Networks*”, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol. 4, Issue 8
- [3] Manjari Sharma and P. K. Raghav, 2014 “*Analysis on Dispersion Compensation in WDM Optical Network using Pre, Post and Symmetrical DCF based on Optisystem*”, MIT International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE), Vol. 4, Issue 1.

- [4] Ravi Prakash Shukla, Mukesh kumar, A.K. Jaiswal, Rohini Saxena, 2012 "Performance Analysis of Dispersion in Optical Communication link Using Different Dispersion Compensation Fiber (DCF) Models", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Vol 1, Issue 2.
- [5] Ronen Dar, Meir Feder, Antonio Mecozzi, and Mark Shtaif, 2014 "Accumulation of nonlinear interference noise in fiber-optic systems", Optical Society of America journal, Vol. 22, Issue. 12.
- [6] Marvin Suraj Koshy, Pratheesh P, 2014 "Analysis of SPM and FWM in Optical Fiber Communication System using Optisystem", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3, Issue 3.
- [7] باستخدام DWDM غصنة، ف؛ نصر، م. ٢٠١٨ "زيادة الفعالية الطيفية لأنظمة الاتصالات البصرية المرشحات ضيقة المجال". مجلة جامعة طرطوس.
- [8] يستخدم عدة تقنيات DWDM نصر، م. ٢٠١٨ "مقارنة أداء نظام اتصالات بصري متعدد الأطوال الموجية لتعويض التشتت". مجلة جامعة طرطوس.
- [9] نصر، م؛ اسعد، ر. ٢٠١٩ "استخدام تقنيات معالجة الإشارة الرقمية لتحسين أداء نظم الاتصالات الضوئية المتناسكة عالية السرعة". مجلة جامعة طرطوس
- [10] عالي السرعة ". مجلة جامعة طرطوس FTTH نصر، م. ٢٠٢١ "تصميم نظام اتصالات ضوئي
- [11] KAHN, J, M; KEANG, PO, H. 2004, *Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems. IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*. Vol. 10, No. 2, 259-272.
- [12] AGRAWAL, P, G. 2007, *Nonlinear Fiber Optic*. 4ed, Academic Press, New York, London, Tokyo, Sydney, 534.
- [13] BANERJEE, P, P. 2004, *Nonlinear Optics Theory, Numerical Modeling and Application*. Marcel Dekker Inc, New York, Basel, 330.
- [14] AGRAWAL, P, G. 2001, *Applications of Nonlinear Fiber Optic*. 3ed, Academic Press, New York, San Diego, San Francisco, Boston, Tokyo, London, 472.
- [15] Weiwei Feng, Ligang Chen, Guoli Ma & Qin Zhu 2022 "Study on weakening optical soliton interaction in nonlinear optics", Springer Nature.
- [16] GHATAK, A; THYAGARAJAN, K. 1997, *Introduction To Fiber Optics*, Cambridge University Press, 576.
- [17] AGRAWAL, P, G. 2001, *Applications of Nonlinear Fiber Optic*. 3ed, Academic Press, New York, San Diego, San Francisco, Boston, Tokyo, London, 472
- [18] SINGH, S, P; SINGH, N. 2007, *Nonlinear Effects in Optical Fiber: Origin, Management and Applications. Progress In Electromagnetics Research PIER*, 73, 249-275
- [19] PALIWAL, R. 2017, *Enhancing Performance of 10 Gbps DWDM Optical Link for High Speed Optical Communication. IJISSET*, Volume: 3 Issue: 4.
- [20] POULARIKAS, A, D. 1999, *The Handbook of Formulas and Tables for Signal Processing*. CRC Press, 820.