

## استخدام خوارزمية تحويل فورييه ذات الخطوة المجزأة من أجل حوسبة احتمال الخطأ الناتج عن تعديل الطور الذاتي للإشارة البصرية

نغم عباس\*

(تاريخ الإيداع 23 / 9 / 2014. قُبل للنشر في 11 / 12 / 2014)

### □ ملخص □

تسبب زيادة معدل المعطيات في نظم الاتصالات البصرية بروز ظواهر كهرومغناطيسية لاختطية ترافق انتشار الإشارة البصرية عبر الليف البصري، وتسبب تشويهاً فيها، ويعد تشتت الليف الظاهرة الخطية التي تسبب صعوبة في تحقيق حاصل جداء معدل بت بالمسافة مرتفع. يتطلب الحد من التأثيرات الاختطية عادة الحد من السويات العالية للاستطاعة المرسل، لكن هذا يسبب انخفاضاً في نسبة الإشارة إلى الضجيج، وهذا ما دعا إلى البحث عن حلول أخرى. يقدم هذا البحث دراسة لخوارزمية تحويل فورييه ذات الخطوة المجزأة (SSFTM) Split Step Fourier Transform Method) المستخدمة لحل معادلة شرودنغر الاختطية (Nonlinear Schrödinger Equation) ((NLSE)) التفاضلية الجزئية، ومن ثم استخدامها لمحاكاة انتشار النبضة البصرية عبر الليف البصري باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB، وتصميم كتلة (block) تمثل الليف البصري، يمكن اضافتها إلى مكتبة المحاكاة (Simulink Library). تم التوصل من خلال البحث إلى نتائج تساعد في اختيار البارامترات الهامة للليف البصري وحيد النمط القياسي من أجل معدلات إرسال مرتفعة، بما يضمن تحسين معدل خطأ البت ((BER) bit error rate) وعامل الأداء Q.

**الكلمات المفتاحية:** ليف بصري، تأثيرات غير خطية، معدل المعطيات، التشتت، خوارزمية تحويل فورييه ذات الخطوة المجزأة.

\*قائم بالأعمال - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Using of Split Step Fourier Transform Algorithm for Computing Error Probability Induced by Self Phase Modulation in Optical Signal

Nagham Abbas\*

(Received 23 / 9 / 2014. Accepted 11 / 12 / 2014)

### □ ABSTRACT □

Increasing data rate in optical communication systems leads to nonlinear electromagnetic phenomenon in optical signal along fiber, and causes distortion in it. The fiber dispersion is a linear phenomenon that causes difficulties to achieve high bit rate and distance product. The limiting of nonlinear effects requires low input power level, but this induces low signal to noise ratio. So, we search another solutions.

This paper studies Split Step Fourier Transform Algorithm (SSFTM) used to solve partial differential nonlinear Schrödinger equation (NLSE). Then, we use it for simulating optical signal propagating in fiber by using MATLAB program, and designing fiber optic block could add it to MATLAB Simulink Library. Finally, in this paper, we achieved results for selecting important parameters in single mode fiber for high bit rate, for improving bit error rate and Q coefficient.

**Keywords:** Optical Fiber ; Nonlinear Effects; Data Rate ; Dispersion; Split Step Fourier Algorithm

---

\*Academic Assistante; Department of Communication & Electronics, Faculty of mechanical & electrical engineering; University of Tishreen; Lattakia, Syria.

**المقدمة:**

فرضت الثورة الكبيرة في مجال الاتصالات والمعلومات المتمثلة في الاستخدام غير المحدود للإنترنت واقعاً جديداً لا يمكن تحقيقه من دون شبكات اتصال ذات سعة نقل معلومات هائلة جداً مثل شبكات الألياف البصرية، حيث تستطيع نقل المعلومات بسرعة أكبر وتكلفة منخفضة إلى كل منزل ضمن البلد الواحد، أو بين بلدان القارة الواحدة، أو بين القارات.

يسبب التشبث في الليف البصري تشويهاً في الإشارة البصرية العابرة على امتداد طوله، فهو يؤدي إلى زيادة عرض الإشارة المرسله وتداخلها مع الإشارات المجاورة، ولا يمكن لمستقبل الإشارات تمييزها عن غيرها، وتعرف هذه الظاهرة في الاتصالات بظاهرة التداخل بين الرموز ((ISI) inter symbol interference))، مما يؤدي إلى زيادة معدل خطأ البت (BER) وانخفاض في قيمة العامل Q، لذا يعد التشبث عاملاً محدداً أساساً في تقويم الأداء في الشبكات البصرية عالية السرعة [1].

يرافق التزايد الكبير في عدد القنوات المرسله في الأنظمة البصرية متعددة القنوات تزايد مماثل في التأثيرات اللاخطية الأساسية المؤثرة في الإشارة المنتشرة عبر هذه الألياف، وهي تعديل الطور الذاتي Self Phase Modulation (SPM) Modulation))، الذي يمكن أن يوجد في الأنظمة وحيدة القناة، والمزج رباعي الموجات (FWM) Four Wave Mixing) وتعديل الطور المتصالب ((XPM) Cross Phase Modulation))، اللذين يظهران فقط في الأنظمة متعددة القنوات [2]. لذا تتطلب أنظمة الاتصالات البصرية الحديثة تقويم الأداء بوجود المحددات المعيقة الناتجة عن الليف قبل تنفيذه عملياً. أي محاولة لنمذجة الليف البصري يجب أن تأخذ بالحسبان كلاً من التأثيرات التي تحدث. إحدى الطرق المتبعة لنمذجة انتشار الإشارة عبر الليف البصري تعتمد على حل معادلة شرودنغر غير الخطية، وتدعى طريقة حلها بتحويل فورييه السريع ذي الخطوة المجزأة، التي تأخذ بالحسبان العوامل الأساسية المؤثرة في الإشارة البصرية المرسله عبر الليف البصري، وهذا ما جعلها أقل الطرائق المستخدمة تعقيداً. بشكل عام يمكن تحليل الأداء وإجراء الاختبار باستخدام برنامج المحاكاة، ثم وفقاً لمتطلبات النظام الحقيقية نختار النتائج المناسبة، من هنا أنت الحاجة إلى وجود منصة لمحاكاة وتصميم النظام البصري، والتحقق من مزاياه وعيوبه، وتأثير البارامترات المختلفة في أدائه، ومؤخراً أصبحت بيئة MATLAB شائعة الاستخدام في التطبيقات الهندسية، كما أن قسم النمذجة والمحاكاة في MATLAB مزود بواجهة رسومية تسمح للمستخدمين بناء وتشغيل نماذج الأنظمة، وإجراء اختبارات المحاكاة.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف البحث إلى دراسة تحليلية للأنظمة البصرية العاملة ضمن النافذة (C-Band) واختبار أداء الليف البصري عند إرسال مرتفع ومسافات طويلة. يتضمن هذا البحث تصميم نموذج محاكاة للليف البصري باستخدام خوارزمية تحويل فورييه السريع ذي الخطوة المجزأة، واستخدام برمجية MATLAB كصلة وصل بالنمذجة الرياضية للمسألة المدروسة الموافقة.

يتضمن البحث أيضاً دراسة لتأثير تعديل الطور الذاتي في النبضة المنتشرة عبر الليف البصري أحادي النمط القياسي بوجود التشبث، والذي يسبب تشوهاً في الإشارة المرسله وانخفاضاً في أداء الليف البصري.

## طرائق البحث ومواده:

لقد أنجز هذا البحث بالاعتماد على الأسس النظرية والرياضية للأنظمة البصرية، كما تم الاعتماد على النمذجة الرسومية، وإعداد برنامج حاسوبي باستخدام الحزمة البرمجية MATLAB/SIMULINK لتمثيل الليف البصري، وتحديد قيم المعاملات الأساسية للنظام التي تتعلق بها لاختطية الألياف والتشتت، ومن ثم مناقشة النتائج وصياغة الاستنتاجات.

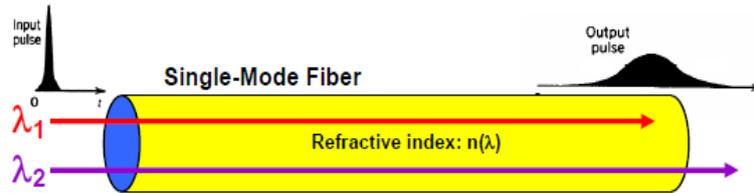
### 1- التشتت اللوني في الليف البصري:

يعد التشتت عاملاً محدداً أساساً في تقويم الأداء في الشبكات البصرية عالية السرعة، ويعتمد على التفاعل بين الأمواج الكهرومغناطيسية والإلكترونات المقيدة في الوسط العازل (الليف البصري). ينجم التشتت اللوني لأن المصدر لا يبعث أشعة بتردد واحد، وإنما بنطاق معين من الترددات يتراوح بين عرض صغير في نتاج مصادر الليزر إلى عرض أكبر نسبياً في نتاج الثنائيات الباعثة للضوء. عند انتشار عدة مركبات ترددية مختلفة بسرعات مختلفة عبر الليف البصري تصل إلى نهاية الليف بأزمنة مختلفة، وهذا الاختلاف في سرعة الانتشار ناجم عن تغير في قرينة انكسار القلب تبعاً لطول الموجة مما يؤدي إلى اتساع عرض النبضة كما هو مبين في الشكل (1).

تظهر العلاقة (1) تابعة قرينة الانكسار للتردد الزاوي للموجة: [3]

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{\beta_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (1)$$

$\omega_j$ : التردد الزاوي للإشارة،  $\beta_j$ : معامل سيلمييه (Sellmeier)



الشكل (1) اتساع النبضة الناتج عن التشتت اللوني

يؤدي اتساع النبضة إلى تقاطع النبضات المتجاورة، ومن ثم إلى صعوبة في كشف واستعادة هذه النبضات بشكل كامل عند المستقبل.

يمكن رياضياً حساب التشتت باستخدام منشور تايلور لثابت انتشار النمط  $\beta$ : [4]

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2)$$

$\beta_0$ : عامل يتعلق بالسرعة الطورية للحامل البصري  $v_p = \frac{\omega_0}{\beta_0}$ .

$\beta_1$ : يتناسب عكساً مع تشتت سرعة المجموعة ((GVD) group velocity dispersion))، واحدته

، ويتحدد بالمعادلة:  $\frac{\text{second}}{\text{meter}}$

$$\beta_1 = \frac{1}{c} \left[ n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right] = \frac{1}{v_g} \quad (3)$$

ويسمى ثابت انتشار النمط  $\beta_2$  بمعامل تشتت سرعة المجموعة GVD، ويستخدم لتحديد درجة اتساع النبضة خلال انتشارها.

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left[ 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right] = \omega \frac{d^2n}{cd\omega^2} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D \quad (4)$$

ويمثل D معامل التشتت واحده [ps/nmkm]، و  $\lambda$  طول موجة الحامل البصري، و c سرعة الضوء في الخلاء.

يعطى D من أجل حساب التشتت اللوني وفقاً للعلاقة:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \cong \frac{\lambda d^2n}{cd\lambda^2} \quad (5)$$

يسمى طول الموجة الذي يكون عنده  $\beta_2 = 0$  بطول الموجة ذي التشتت الصفري  $\lambda_0$ ، وعندها يصنف التشتت إلى تشتت عادي ( $\beta_2 > 0$ )، وتشتت شاذ ( $\beta_2 < 0$ ).

## 2- اللاخطية في الليف البصري:

لا تعتمد قرينة انكسار المادة على طول الموجة فقط، وإنما تعتمد أيضاً على شدة الإشارة المتغيرة مع الزمن والمنتشرة عبر المادة. وتعرف هذه الظاهرة بتأثير كبير (Kerr)، وبناء عليه تعطي قرينة انكسار الليف البصري على النحو: [3, 5, 6]

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P \quad (6)$$

تمثل  $n_0$  قرينة الانكسار الخطية المعتمدة على طول الموجة و  $A_{eff}$  المساحة الفعالة لليف البصري و  $n_2$  قرينة الانكسار اللاخطية المعتمدة على الشدة، حيث  $I(t)$  الشدة البصرية (optical intensity) و P الاستطاعة البصرية.

يمثل  $\frac{n_2}{A_{eff}}$  العامل اللاخطي، أي تعتمد التأثيرات اللاخطية على المساحة الفعالة لليف البصري.

العلاقة بين البارامتر اللاخطي  $\gamma$  وقرينة الانكسار اللاخطية  $n_2$ :

$$\gamma = \frac{\omega_0 n_2}{c_0 A_{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{eff}} \quad (7)$$

يمثل  $\omega_0$  التردد الزاوي للموجة البصرية و  $c_0$  سرعة الضوء في الخلاء و  $\lambda_0$  طول الموجة في الخلاء [7].

التأثيرات الأكثر أهمية الناتجة عن تأثير كبير هي SPM و XPM و FWM والتي تسبب انخفاض أداء النظام.

درسنا في هذا البحث تأثير التعديل الطوري الذاتي فقط، فهو العامل الأساس المعيق لأداء النظام عند معدل إرسال مرتفع، إذ يتسع طيف الإشارة بشكل ملحوظ .

## 2-1- التعديل الطوري الذاتي:

تسبب زيادة معدل المعطيات زيادة معدل تغير الاستطاعة البصرية مع الزمن، وطالما أن قرينة الانكسار تابعة للشدة البصرية للإشارة المنتشرة، ستسبب النبضات البصرية غير مستطيلة الشكل تغيرات في قرينة الانكسار، وكما نعلم أن سرعة الموجة البصرية ضمن وسط نقل ما تعتمد على قرينة الانكسار، ولذا فإن تغير قرينة الانكسار سيجعل القيم اللحظية للشدة تنتشر بسرعات مختلفة، وتصل في أزمنة مختلفة إلى نهاية الليف. وهكذا تتحول تغيرات الاستطاعة البصرية مع الزمن إلى تغيرات في الطور، نسمي هذه العملية تعديل الطور الذاتي. [8]

فهو يسبب اتساعاً في طيف الإشارة و يترافق مع إزاحة طورية لاختطية  $\phi_{NL}$  تعطى بالعلاقة (8) [9, 3-1]:

$$\phi_{NL}(z,t) = \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma P_{in}(t) L_{eff} \quad (8)$$

$P_{in}$ : استطاعة الدخل،  $z$ : مسافة الانتشار، يعطى الطول الفعال للليف البصري  $L_{eff}$  بالعلاقة (9):

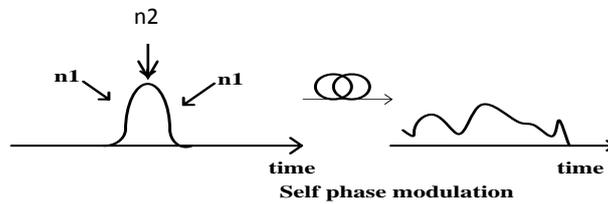
$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (9)$$

$L$ : طول الليف البصري،  $\alpha$ : عامل التخماد ويساوي [dB/km] 0.17-0.25 من أجل الأطوال الموجية

الواقعة في نافذة الإرسال الثالثة أي حول القيمة [nm] 1550. وهكذا نجد أن التغيرات اللحظية في الطور اللاخطي تؤدي إلى توليد مركبات ترددية جديدة على جانبي تردد الحامل مسببةً اتساعاً في طيف الإشارة، يعطى الاتساع الطيفي، أو ما يسمى الانحراف الترددي اعتماداً على الإزاحة الطورية اللاخظية بالنسبة للزمن بالعلاقة (10): [1, 10]

$$\delta\omega = -\frac{\partial\phi_{NL}}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial P}{\partial t} L_{eff} \quad (10)$$

يتناسب  $\delta\omega$  مع مشتق استطاعة الإشارة. تسبب هذه الإزاحة الطورية الناتجة تشتتاً لحظياً، وتحد من سرعة



الإرسال ومسافته.

الشكل (2) اتساع النبضة الناتج عن التعديل الذاتي للطور

يحدث هذا التأثير عند انتشار إشارة وحيدة عبر الليف البصري، لذا يسمى التعديل الطوري الذاتي، إذ نلاحظ من الشكل (2) تشوه النبضات البصرية المرسل، كما نلاحظ اتساع النبضة الناتج عن هذه اللاخظية [8].

## 3- نمذجة الليف البصري أحادي النمط:

تتعرض الأمواج البصرية خلال انتشارها عبر ليف بصري أحادي النمط (SMF) الى تخميد وتشتت، وتداخل لاخطي (Nonlinear Crosstalk) والتي تسبب جميعها انخفاضاً في أداء نظام الإرسال. لا تنتج التأثيرات اللاخطية عن بارامتر واحد فقط بل عن عدة بارامترات، وأي محاولة لنمذجة الانتشار في الليف البصري يجب أن تأخذ بالحسبان كلاً من التأثيرات التي تحدث، من الطبيعي أن يكون من الصعب تنفيذ النموذج الدقيق الذي يأخذ كل العوامل المؤثرة بالحسبان، وخاصة من حيث الزمن المأخوذ لإنجازه، ونظام الكمبيوتر الذي يجري هذه النمذجة، إحدى الطرائق المتبعة لنمذجة انتشار الإشارة عبر الليف البصري، تعتمد على حل معادلة الانتشار اللاخطي (NLSE)، وتدعى الطريقة المتبعة لحل هذه المعادلة بـ SSFFTM، وهي تأخذ بالحسبان العوامل الأساسية المؤثرة في الإشارة المنتشرة عبر الليف البصري (التخميد، التشتت، التعديل الطوري الذاتي اللاخطي)، وهذا ما جعلها أقل الطرائق المستخدمة تعقيداً.

### 3-1- معادلة الانتشار اللاخطية عبر الليف البصري:

رياضياً تستخدم معادلة شرودنغر (Schrödinger) اللاخطية لوصف انتشار النبضة في الليف، وهي معادلة تفاضلية جزئية لاخطية ذات مرتبة مرتفعة. يمكن الحصول على معادلة الانتشار اللاخطية من مجموعة معادلات مكسويل لوصف انتشار النبضة في الليف البصري، ويعطى الشكل الشعاعي للمعادلة بالعلاقة (11): [12]

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A(z,t) + \beta_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z,t) + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z,t) - i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) \quad (11)$$

يمثل الحد الأول من الطرف اليميني للمعادلة السابقة  $\frac{\alpha}{2} A(z,t)$  التخميد الخطي (Linear Attenuation)،

ويمثل الحد الثاني  $\beta_1 \frac{\partial}{\partial t} A(z,t)$  تشتت سرعة المجموعة، أما الحد  $i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z,t)$  فيمثل التشتت من الدرجة الثانية

(second order dispersion)، ويمثل  $i\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t)$  تأثير كير اللاخطي، حيث:

$A(z,t)$  غلاف الحقل الكهربائي المتغير ببطء،  $t$  الزمن،  $\beta_2$  ثابت انتشار من الدرجة الثانية [ $\text{ps}^2/\text{km}$ ].

إنه من غير الممكن حل المعادلة بشكل تحليلي وبخاصة عندما توجد التأثيرات اللاخطية مع التشتت. لذلك تستخدم الطرائق العددية لحل هذه المعادلة من أجل نمذجة تأثيرات الليف عبر الوسط اللاخطي (الليف البصري) [13].

### 3-2- خوارزمية تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة:

توجد طرائق عديدة لنمذجة انتشار النبضات عبر الليف، وفي هذا البحث استخدمنا طريقة (خوارزمية) تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة، واستخدمنا برمجية MATLAB لوصل النمذجة الرياضية بالمسألة المدروسة الموافقة.

من أجل المسافات الصغيرة تصبح المعادلة (11) كما يأتي: [14, 15, 16]

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = (\bar{D} + \bar{N})A(z,t) \quad (12)$$

$\bar{N}$ : لاخطية الليف و  $\bar{D}$ : معامل تفاضلي يحسب من أجل التشتت في وسط خطي بالمعادلة (13):

$$\bar{D} = -\frac{\alpha}{2} - \beta_1 \frac{\partial}{\partial t} - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (13)$$

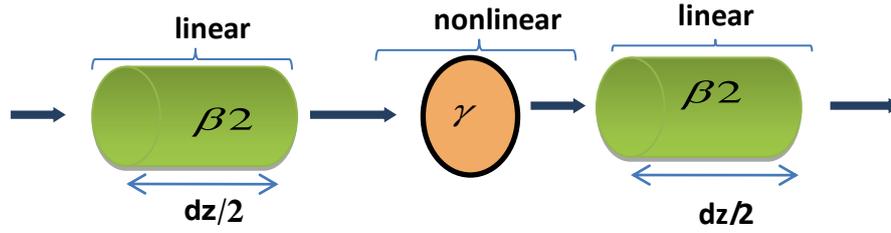
$$\tilde{N} = iy|A|^2 + \text{other nonlinear terms} \quad (14)$$

$$A(z+h, t) = \exp\left(\frac{h}{2}\tilde{D}\right) \exp\left(\int_z^{z+h} N(z') dz'\right) \exp\left(\frac{h}{2}\tilde{D}\right) A(z, t) \quad (15)$$

تتطلب هذه الخوارزمية تقسيم الليف البصري إلى مقاطع صغيرة طول كل منها  $h$ . وخلال طول ما من الليف  $Z$  فان كل مقطع  $h$  يمثل تأثيرات مختلفة لليف، وكل مقطع يقسم إلى جزأين بطول  $h/2$ . ويفترض أن المقاطع تعمل بشكل مستقل عن بعضها، وتحلّ تأثيرات التشتت واللاخطية بشكل منفصل في مجال الزمن للأول ومجال التردد للثاني. ويؤخذ التشتت في كل نصف مقطع، أما اللاخطية فتطبق على نقطة المنتصف فقط لكل مقطع. والبرنامج المستخدم لتمثيل هذه الخوارزمية هو MATLAB Program. يمكن تلخيص الخطوات الأساسية لنمذجة الليف وفقاً للطريقة السابقة كما يأتي [17]:

- 1- توليد غلاف إشارة الدخل الممثل بنبضة غوص  $A(0, T)$ .
  - 2- إجراء تحويل فورييه السريع لغلاف إشارة الدخل  $A(z, \omega) = \text{FFT}[A(z, T)]$ .
  - 3- حساب تابع النقل من أجل طول موافق لنصف حجم الخطوة اي  $h/2$ 

$$H(\omega) = \exp\left[\left(\frac{i}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 - \frac{i}{6}\beta_3(\omega - \omega_0)^3 - \frac{\alpha}{2}\right)\frac{h}{2}\right] \quad (16)$$
  - 4- ضرب الإشارة التي حصلنا عليها في الخطوة 2 بتابع النقل السابق:
$$A'\left(Z + \frac{h}{2}, \omega\right) = A(Z, \omega) \cdot H(\omega) \quad (17)$$
  - 5- حساب تحويل فورييه العكسي السريع للنتائج، الذي تم الحصول عليه في الخطوة السابقة 4:
$$A'\left(Z + \frac{h}{2}, T\right) = \text{IFFT}\left[A'\left(Z + \frac{h}{2}, \omega\right)\right] \quad (18)$$
  - 6- حساب العبارة اللاخطية:
$$h_{\text{SPM}}(T) = \exp\left[\left(iy \left|A'\left(Z + \frac{h}{2}, T\right)\right|^2\right)h\right] \quad (19)$$
  - 7- ضرب ناتجتي الخطوتين 5، 6:
$$A\left(Z + \frac{h}{2}, T\right) = A'\left(Z + \frac{h}{2}, T\right) \cdot h_{\text{SPM}}(T) \cdot \exp\left(\frac{-\alpha}{2}h\right) \quad (20)$$
  - 8- تكرار الخطوات من 2 حتى 5 من أجل كل المقاطع.
  - 9- تكرار الخطوات من 2 حتى 7.
- تبعاً لذلك فإن الإشارة عندما تنتشر في مقاطع الليف فسوف تنتقل بين مجالي الزمن والتردد بشكل تعاقبي. ويوضح الشكل (3) مراحل انتشار الإشارة في أحد المقاطع المجزأة:



الشكل (3) مقطع من الليف البصري أحادي النمط

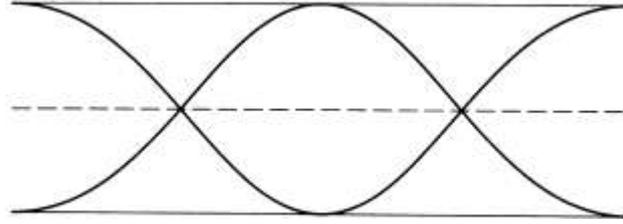
ويوضح الشكل (4) المخطط النهجي (الالغاريم) لطريقة SSFFTM المستخدمة :



الشكل (4) خوارزمية تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة لتحديد البارامترات الداخلة في نمذجة الليف البصري.

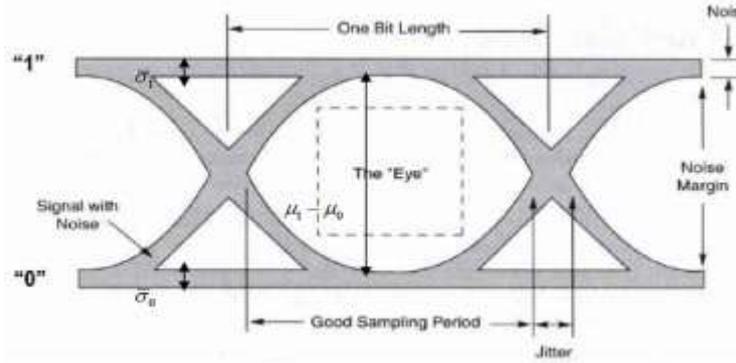
#### 4- معدل خطأ البت (BER) وعامل الأداء Q:

إن الطريقة المناسبة لرؤية التشوه في القناة هي النموذج العيني أو المخطط العيني (Eye Diagram)، الذي يمكن الحصول عليه بعرض سلسلة المعطيات على شاشة راسم الإشارة. في الفترة الزمنية الخاصة بالرمز الواحد (عرض البت) يمثل الخط الشاقولي لحظة اتخاذ القرار، الذي يوافق أقل قيمة للخطأ (BER)، أي يجب أخذ العينة عند هذه النقطة، حيث تكون العين مفتوحة وعريضة. إذا تطابقت كل خطوط المسارات مع مطال وطور النبضة، فإن العين تكون مفتوحة بشكل كامل كما هو مبين في الشكل (5):



الشكل (5) النموذج العيني للإشارة.

نستطيع من خلال النموذج العيني قياس أداء الإشارة التي قد تعاني من تشوه وضجيج وتشتت. إذا كان المخطط العيني غير مشوه فإن العين تبدو مفتوحة وواضحة، لكن مع وجود محددات (معوقات) مثل التأخير وقلة التزامن، فإن النموذج العيني سيصبح مشوهاً ويتناقص حجم فتحة العين عمودياً وأفقيًا، أي يحدث التشوه المطالي والطوري معاً، كما في الشكل (6):



الشكل (6) النموذج العيني في حال وجود تشوه وضجيج.

يؤثر التشوه الحاصل مباشرة في شكل العين الذي يعني أن الأداء يتراجع عند الخرج، وهذا يزود المستخدم بحجم التشوهات الحاصلة، يقدر عامل الأداء Q باستخدام العلاقة (21): [18]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (21)$$

يمثل  $\mu_1$ ،  $\mu_0$  متوسط مطال الرموز (0) و(1)، أما  $\sigma_1$ ،  $\sigma_0$  فتمثل الانحرافات المعيارية الخاصة الموافقة

للمرمزين (0) و(1)، من أجل توزيع غوسي [19].

حيث  $\sigma_0 = 0.68\bar{\sigma}_0$ ،  $\sigma_1 = 0.68\bar{\sigma}_1$  من أجل النبضات الغوسية، وبحسب BER كما في العلاقة (23):

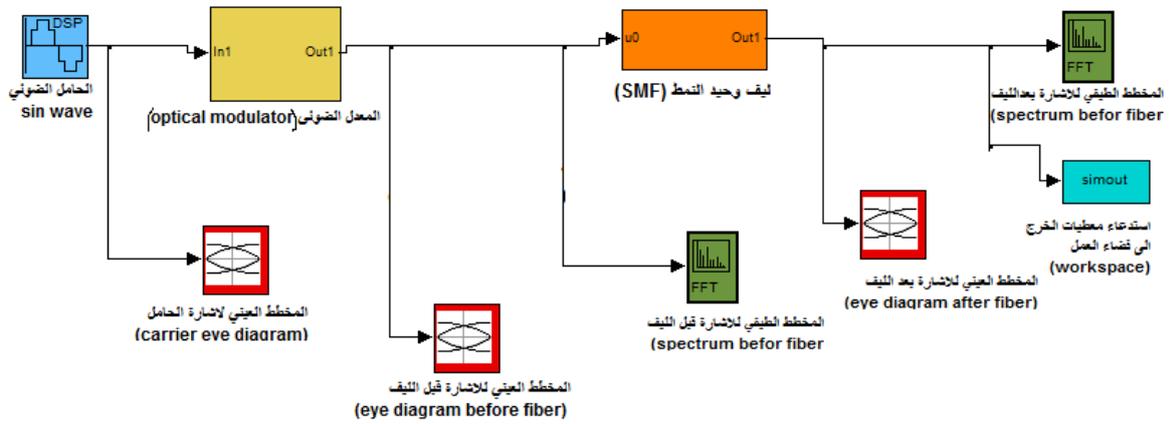
$$BER = \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (23)$$

حيث  $\bar{\sigma}_0$ ،  $\bar{\sigma}_1$  تمثل قيمة الضجيج للمرمزين (0) و(1) على الترتيب.

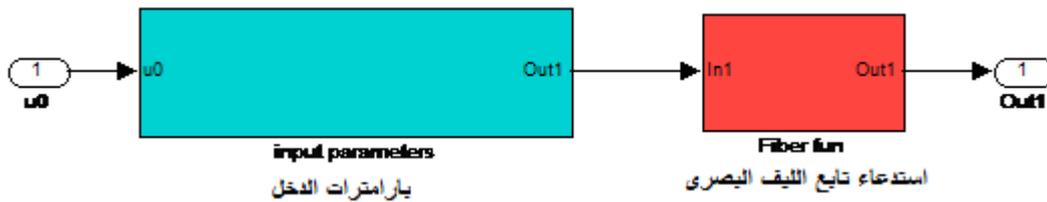
### 5- محاكاة النظام البصري:

يتم تضمين خصائص وبارامترات الليف مثل التشتت والتخميد واللاخطية وطول المقطع وعدد المقاطع وطول الموجة العاملة وغيرها باستخدام ملف تابعي في برنامج MATLAB، وتعالج ضمن MATLAB Function Block، ويتلقى النموذج هذه البيانات من فضاء عمل MATLAB. يقدم الشكل (7) مخططاً صندوقياً لنموذج المحاكاة المصمم عن طريق برنامج MATLAB، والمكون من ثلاثة أنواع من العناصر: المصادر (sources) والنظام (system)

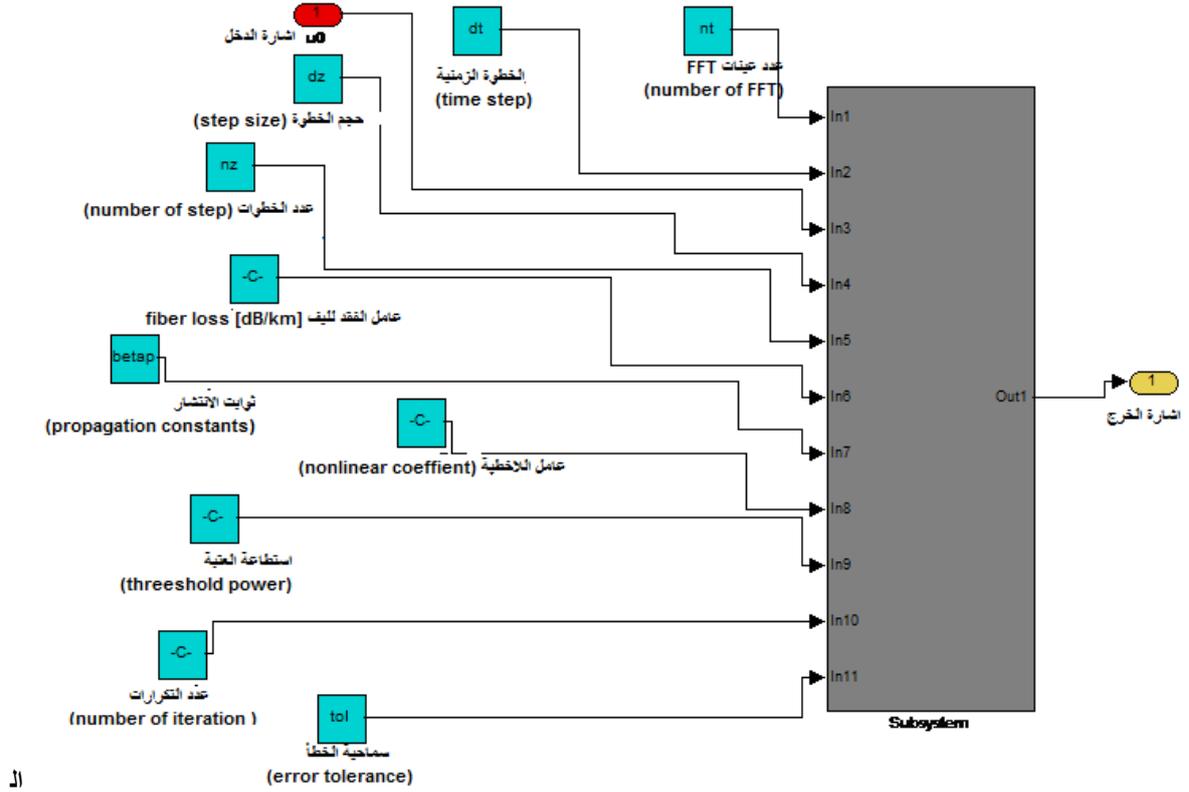
المراد نمذجته، والمراسي (sinks). يعبر العنصر المركزي (system) عن تمثيل Simulink للمخطط الكتل للنظام المراد نمذجته. أما المصادر فتتمثل مداخل النظام، وتشمل الثوابت ومولدات التتابع، مثل الامواج الجيبية، تتلقى المراسي خرج النظام، وتتمثل في المخططات البيانية، ورواسم الإشارة وملفات الخرج، وتوجد هذه العناصر في مكتبة commonly used blocks، signal processing، communication blockset، source الموجودة في MATLAB/SIMULINK، تتطلب نمذجة الليف البصري برمجة المعادلات السابقة التي تصف سلوك الموجة البصرية خلال انتشارها عبر الوسط اللاخطي (الليف البصري)، ويقدم MATLAB العديد من الكتل لنمذجة النظم اللاخطية، ونجد هذه الكتل في المكتبات، Discontinuities Math Operation. ومن الكتل المفيدة، التي استخدمت لهذا الغرض الكتلة Fcn والتي تستطيع انجاز الحسابات المصفوفاتية، واستخدام توابع MATLAB وإنتاج خرج شعاعي. يتم سحب الكتل المطلوبة إلى نافذة نموذج فارغ، ومن ثم وصل هذه الكتل مع بعضها باستخدام خطوط الإشارة والحصول بالنتيجة على النموذج المطلوب المبين في الشكل (7).



الشكل (7-a) نموذج المحاكاة المصمم للنظام البصري.



الشكل (7-b) نموذج الليف البصري و بارامترته المدخلة.



شكل (7-7) نموذج المحاكاة لبارامترات الليف البصري المدخلة.

قمنا بإنجاز المحاكاة الديناميكية بعد تطبيق هذه الخوارزمية برمجياً باستخدام MATLAB، وكتابة برنامج المحاكاة واستدعائه عن طريق الكتلة Fcn، وقدمت لنا نتائج المحاكاة صورة واضحة عن أداء الخوارزمية من خلال استقراء قيم المعاملين Q, BER لإشارة الخرج، ومن ثم اختبار جودة أداء الليف البصري المستخدم من أجل كل حالة مدروسة.

## 6- دراسة نظام بصري يستخدم الليف البصري وحيد النمط:

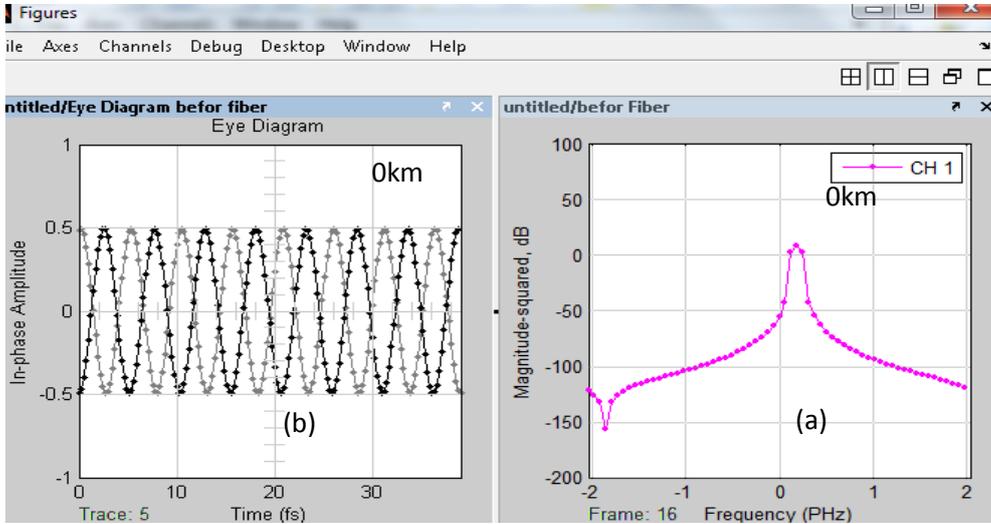
سنقوم بتحديد تأثير عدة بارامترات في جودة عمل الليف البصري مثل التشتت والتخميد، وتعديل الطور الذاتي، ومن ثم معرفة كافة التفاصيل التي يجب أخذها بالحسبان حين تصميم الليف البصري. لكن قبل البدء بعرض المنحنيات الناتجة سنقدم بعض الخصائص المستخدمة للحساب العددي والمضمنة في m-file وفق الجدول (1):

الجدول (1) قيم بعض البارامترات الخاصة بالليف البصري SMF المستخدم

$\gamma$	$A_{eff}$	N	$\lambda$	$\alpha$
عامل اللاخطية	السطح الفعال للقلب	قرينة انكسار النواة	طول الموجة	عامل التخميد
$\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{eff} [\frac{1}{kmW}]$	$80 \mu m^2$	1.46	1550 nm	0.2 dB/km
$P_0$	$P_{th}$	$\beta_2$	$\beta_3$	
استطاعة الذروة المطبقة	استطاعة العتبة	عامل التشتت من الدرجة الثانية	عامل التشتت من الدرجة الثالثة	
0.0001 W	$5 \times 10^{-9} W$	$\beta_2 = D\lambda^2 / 2\pi c [\frac{s^2}{m}]$	$\beta_3 = 0.3 \times 10^{-39} [\frac{s^3}{m}]$	

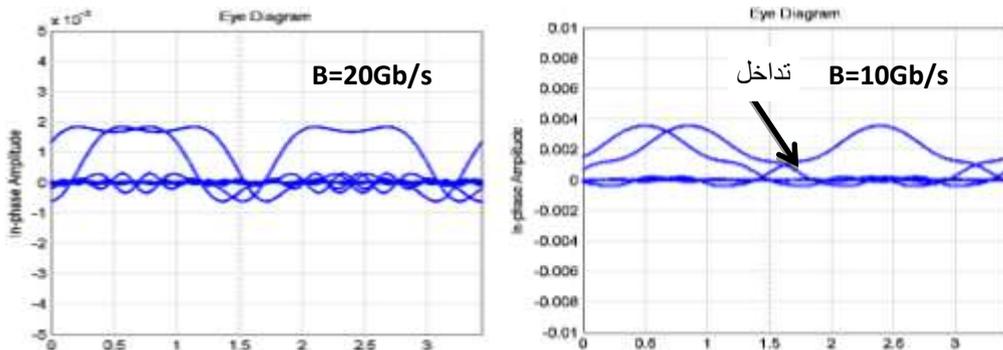
### 1-6-دراسة تأثير معدل الارسال في جودة إشارة خرج الليف البصري:

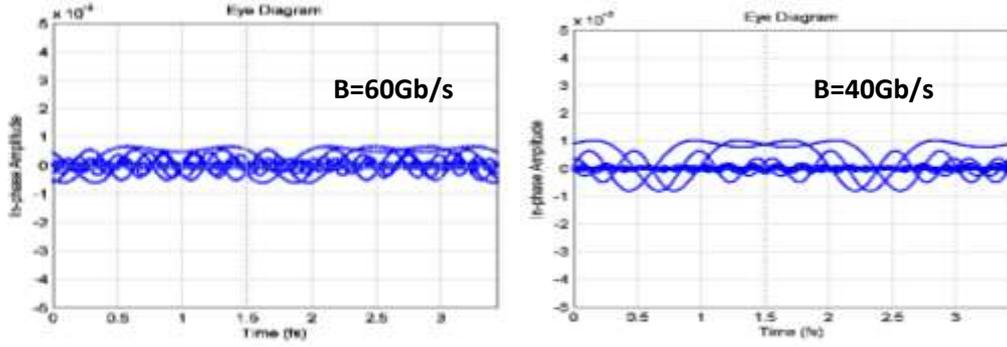
بعد تنفيذ ملف التهيئة m-file وتشغيل نموذج المحاكاة مع ضبط بارامترات الليف ونظام العمل على القيم المطلوبة، نحصل على المخطط الطيفي والنموذج العيني للإشارة البصرية المرسله قبل دخولها الليف البصري، كما في الشكل (8).



الشكل (8) المخطط الطيفي (a)، والنموذج العيني (b) للإشارة البصرية قبل دخولها الليف البصري

أما الشكل (9) فيمثل المخطط العيني للإشارة البصرية على خرج ليف بصري بطول 50km من أجل معدلات ارسال مختلفة. نلاحظ زيادة التشوه في المخطط العيني، والتداخل بين النبضات البصرية مع زيادة معدل الإرسال، ويبدو الانغلاق الكبير في فتحة العين عند معدل الإرسال الأكبر من 20Gb/s، نتيجة تأثير كل من التخميد والتشتت وتعديل الطور الذاتي. أي ان معدل الإرسال الأعظمي المسموح به من اجل ليف بصري بطول 50km يملك المواصفات الموضحة بالجدول (1) يبلغ 20Gb/s، حيث يكون عنده  $BER = 10^{-7}$ ، وعند معدلات أعلى من ذلك يصبح من غير الممكن استعادة الإشارة المرسله عبر الليف البصري بوساطة المستقبلات.





الشكل (9) النموذج العيني لإشارة خرج ليف بصري بطول 50km من أجل معدلات إرسال مختلفة

وبحساب قيم معامل الأداء Q من الشكل السابق ومعدل خطأ البت نحصل على القيم الموضحة في الجدول

(2):

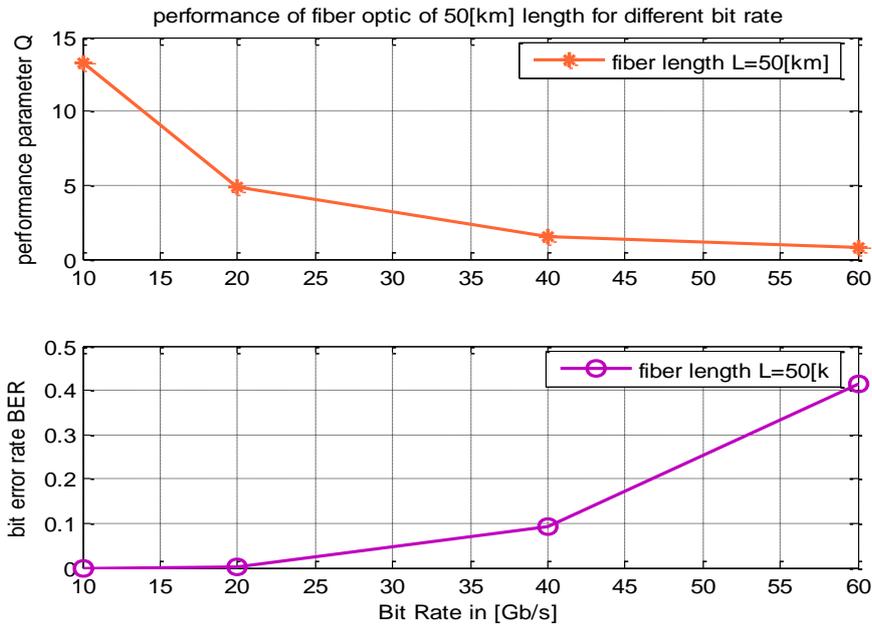
الجدول (2) قيم المعاملين BER،Q لإشارة خرج ليف بصري بطول 50km من أجل معدلات إرسال مختلفة:

B[Gb/s]	10	20	40	60
Q	13.23	4.9	1.47	0.735
BER	2.9e-40	4.9e-7	0.0921	0.414

ويبين الشكل (10) التناقص السريع للمعامل Q، والزيادة الناتجة في قيمة BER، ومن ثم انخفاض الأداء عند

معدل إرسال أعلى من 20Gb/s من أجل ليف بصري SMF بطول 50km يملك المواصفات والخصائص المذكورة في

الجدول (1) من دون استخدام مضخمات أو مكبرات.



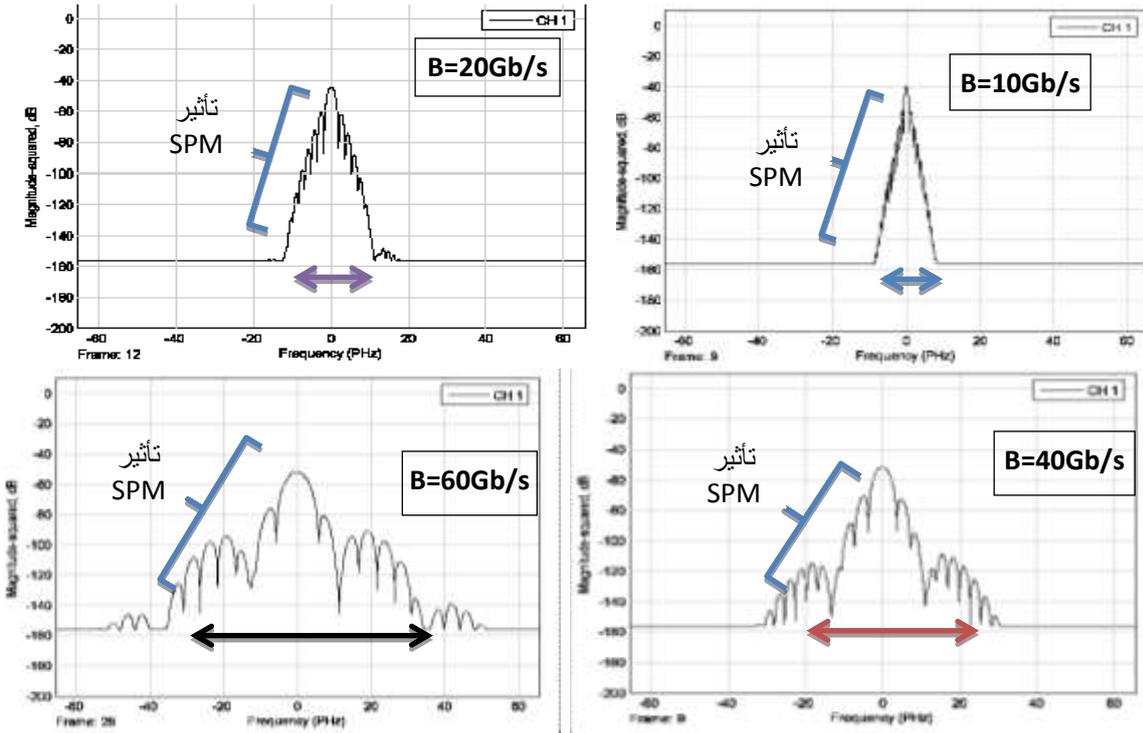
الشكل (10) علاقة عامل الأداء Q ومعدل خطأ البت BER بمعدل الإرسال من أجل ليف بصري بطول 50km

يمثل الشكل (11) المخطط الطيفي لإشارة خرج الليف البصري المستخدم من أجل معدلات إرسال مختلفة،

ومنه يتبين ظهور حزم جانبية (مركبات تداخل جانبية) جديدة في طيف إشارة الخرج ناتجة عن تعديل الطور الذاتي

اللاخطي، إضافة إلى ازدياد في عرض الحزمة مع زيادة معدل إرسال الإشارة عند مرورها عبر ليف بصري بطول

50km.



الشكل (11) المخطط الطيفي لإشارة خرج الليف من أجل معدلات إرسال مختلفة

### 6-1- دراسة تأثير طول الليف في جودة إشارة خرج الليف البصري:

سنقوم باختبار أداء الليف البصري الذي يملك الخصائص المذكورة في الجدول (1) عند معدلي الإرسال  $B_1=10\text{Gb/s}$ ،  $B_2=20\text{Gb/s}$  من أجل مسافات إرسال مختلفة.

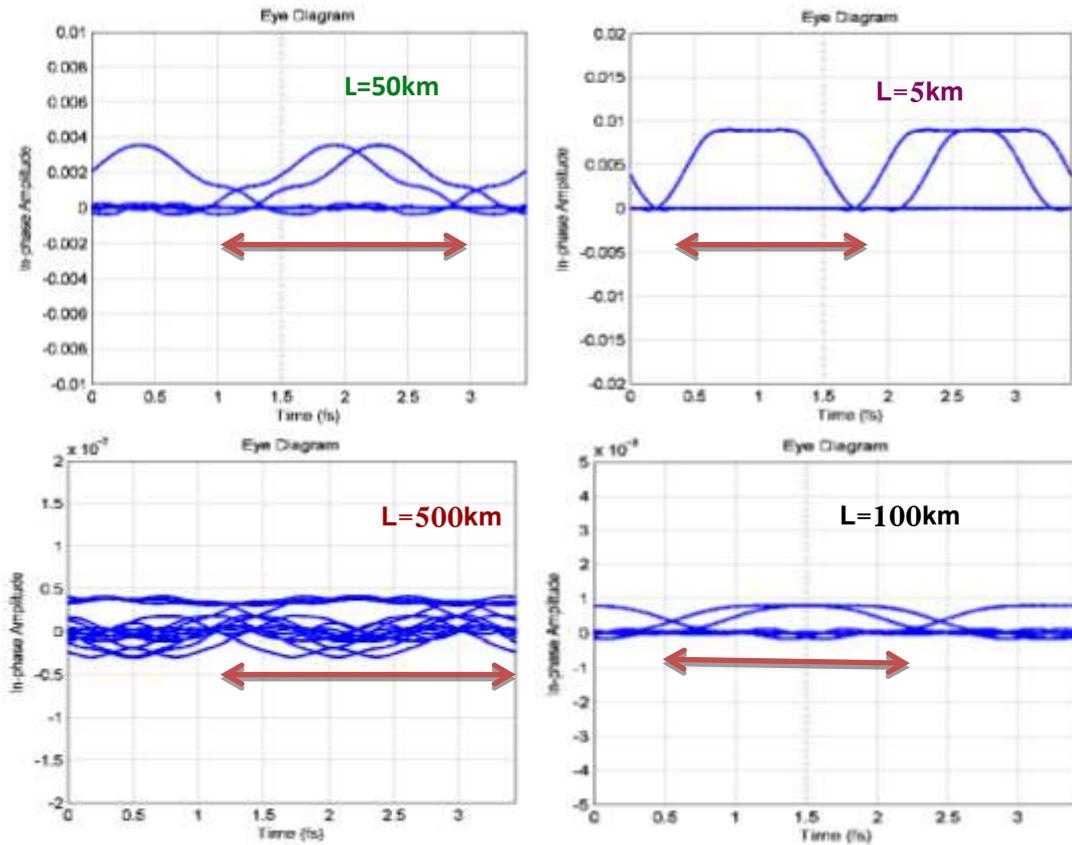
بتحليل المخططات الآتية في الشكل (12) التي حصلنا عليها من أجل معدل إرسال  $10\text{Gb/s}$  بنتيجة المحاكاة، نجد أنه كلما ازدادت مسافة الإرسال ازداد تشوه النموذج العيني للإشارة المرسله وضافت فتحة العين، وازداد العرض الزمني للنبضة بتأثير التشتت، وبإجراء حسابات عديدة لقيم BER، نجد أن الطول الأعظمي المسموح للليف هنا من أجل الحالة المدروسة يجب الا يتجاوز  $100\text{km}$ ، حيث إن قيمة BER عنده تساوي  $10^{-10}$ ، علماً ان القيمة النموذجية لمعدل خطأ البت هي  $(BER \leq 10^{-9})$  والتي تقابل القيمة  $(Q=6)$  لعامل الاداء، وذلك وفقاً للاتحاد

الدولي للاتصالات (The International Telecommunication Union (ITU) [19].

كما يبدو لنا واضحاً انخفاض الاستطاعة البصرية مع زيادة مسافة الإرسال. ويبين الجدول (3) قيم عرض النبضات البصرية المرسله واستطاعتها مع زيادة طول الليف.

الجدول (3) قيم عرض (اتساع) واستطاعة الإشارة البصرية من أجل اطوال مختلفة لليف البصري SMF عند معدل ارسال  $B=10\text{Gb/s}$ :

L[km]	5	50	100	500
Pulse width[fs]	1.4	1.7	2.2	2.5
Output power[mW]	0.009	0.0038	$10^{-3}$	$0.5 * 10^{-7}$



الشكل (12) النموذج العيني لإشارة خرج الليف من أجل أطوال مختلفة لليف عند معدل ارسال 10Gb/s وبحساب قيم معامل الجودة Q ومعدل خطأ البت BER نحصل على القيم الموضحة في الجدولين (4)، (5):

الجدول (4) قيم المعامل Q من أجل اطوال مختلفة لليف البصري SMF عند معدل ارسال B=10Gb/s:

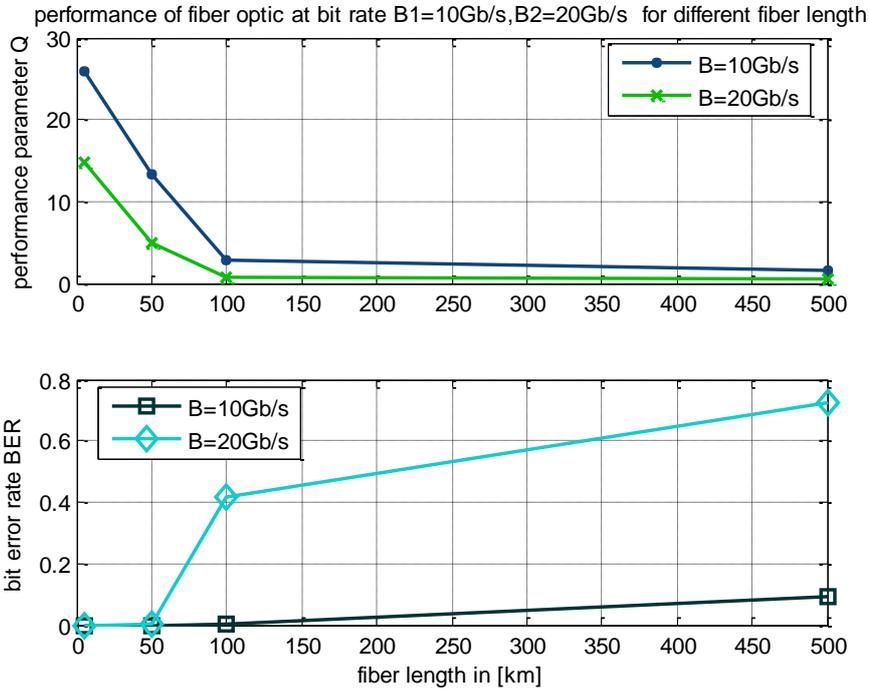
L[km]	5	50	100	500
Q	26	13.23	6.3	1.47
BER	2.4e-149	2.9e-40	1.5e-10	0.0921

الجدول (5) قيم المعامل Q من أجل اطوال مختلفة لليف البصري SMF عند معدل ارسال B=20Gb/s:

L[km]	5	50	100	500
Q	14.7	4.9	0.735	0.488
BER	3.2e-49	4.9e-7	0.414	0.725

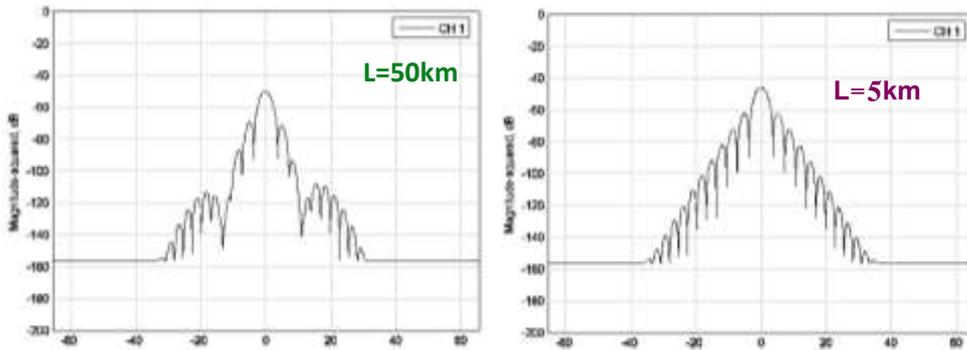
هذا ويبين الشكل (13) أن مضاعفة معدل الإرسال في النظام البصري مع الحفاظ على خصائص الليف المذكورة سابقاً يؤدي إلى انخفاض واضح في قيمة المعامل Q بنسبة 40% تقريباً، ومن ثم زيادة في معدل خطأ البت BER، حيث يلاحظ تغير كبير في قيمة المعامل Q و BER بين الحالتين، كما يتضح لنا من أجل معدل ارسال معين إن زيادة طول الليف البصري تسبب انخفاضاً بالاداء أيضاً، على سبيل المثال من أجل معدل ارسال 10Gb/s فإن

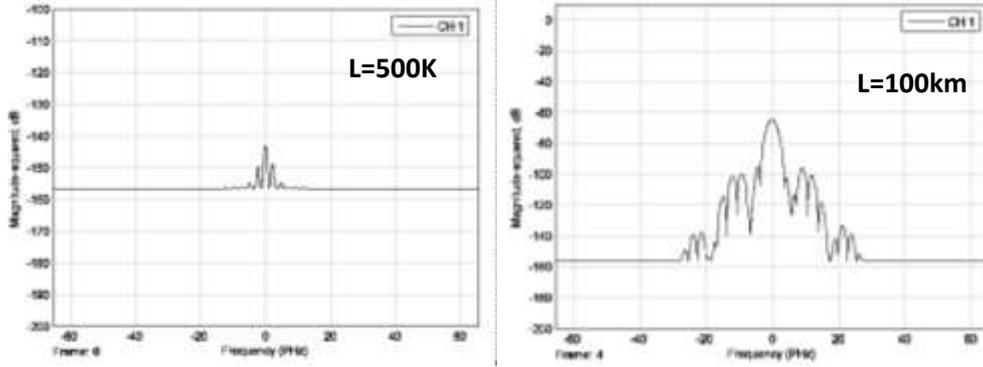
الطول الأعظمي المسموح باستخدامه للليف البصري بحيث تبقى الإشارة ضمن هامش جودة مقبول يبلغ 100km، في حين لايتجاوز 50km عند معدل ارسال 20Gb/s.



الشكل (13) تابعة عامل الأداء Q ومعدل خطأ البت BER لطول الليف من أجل معدلي ارسال 20, 40Gb/s

أما المخطط الطيفي المبين في الشكل (14) لإشارة خرج الليف البصري فيظهر تأثير زيادة طول الليف البصري عند معدل ارسال 40Gb/s، وهو يبين انخفاضاً في استطاعة الإشارة المرسله، وانخفاضاً في عرض الطيف أي زيادة في اتساع النبضة زمنياً مع زيادة المسافة بتأثير التشتت. بالمقابل هناك انخفاض في عدد واستطاعة الحزم الجانبية الناتجة عن SPM بوجود التشتت، وباختبار النموذج من أجل معدل ارسال 10Gb/s نحصل على نتائج مشابهة لكن عرض طيف الإشارة يكون أصغر.





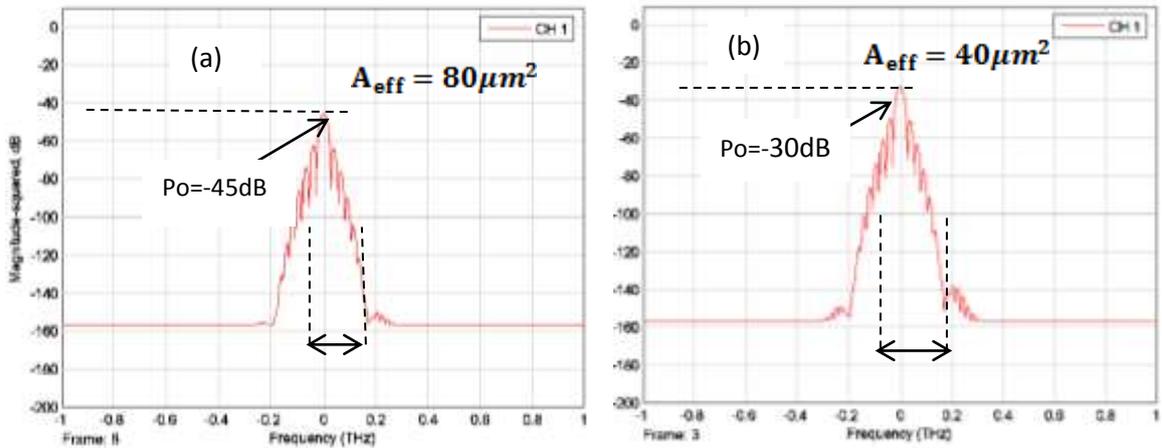
الشكل (14) المخطط الطيفي لإشارة خرج الليف البصري عند الإرسال لمسافات مختلفة من أجل معدل ارسال 40Gb/s هذا يقودنا إلى استنتاج فعالية نموذج المحاكاة المصمم وامكانية استخدامه في تطبيقات الاتصالات البصرية المختلفة.

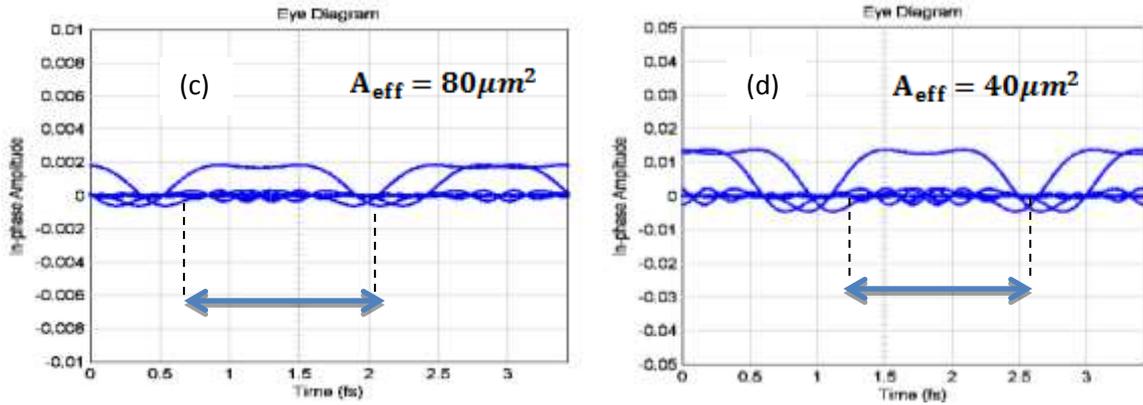
## 6-2- دراسة تأثير مساحة السطح الفعال لقلب الليف البصري في جودة الإشارة:

قمنا بتقليل السطح الفعال لقلب الليف البصري إلى النصف من القيمة  $80\mu m^2$  إلى  $40\mu m^2$ ، من أجل

تحليل وتقييم أداء ليف بصري بطول 50km، عندما يستخدم في نظام بمعدل ارسال 20Gb/s بوجود تأثيري كل من التشتت و SPM. فصلنا على الشكل (15)، والذي يبين أنه بتناقص مساحة السطح الفعال للقلب تزداد استطاعة الإشارة  $P_0$ ، ولكن يزداد عرض الطيف وعدد الحزم الجانبية، أي يزداد تأثير SPM اللاخطي بوجود التشتت، وكلما كانت قيمة  $A_{eff}$  أكبر تناقص تأثير SPM، وتناقصت استطاعة الخرج  $P_0$  أيضاً، كما هو واضح في الشكل (a)، - (15b)، بالمقابل إن زيادة  $A_{eff}$  يقابلها زيادة في زمن النبضة، كما يتضح من المخطط العيني الشكل (c, d) - (15).

بالنتيجة يمكن تقليل التأثيرات السلبية الناجمة عن SPM اللاخطي بزيادة مساحة السطح الفعال لقلب الليف البصري.





الشكل (15) المخطط الطيفي (a,b) والنموذج العيني (c,d) لإشارة خرج ليف بصري بطول 50km من أجل معدل ارسال 40Gb/s وقد أتاحت نتائج المحاكاة امكانية وضع مواصفات عمل عامة للليف البصري، وذلك من خلال اختيار قيم المعاملات الخاصة به، واثبتت النتائج فعالية نموذج المحاكاة المصمم، بحيث يمكن اضافته ككتلة مستقلة (block) تمثل الليف البصري إلى مكتبة المحاكاة الخاصة ببرنامج MATLAB لتخدم تطبيقات الاتصالات البصرية، وتمكّن الباحثين من تطوير الانظمة البصرية، وتؤمن مرونة في انتقاء قيم البارامترات التي تصف خصائص الليف المستخدم.

### الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- قمنا في هذا البحث بدراسة تحليلية لخوارزمية تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة المستخدمة في حل معادلة الانتشار اللاخطي الجزئية التفاضلية. وقد ترجمت هذه الخوارزمية إلى تعليمات بلغة MATLAB مكنتنا من تصميم نموذج محاكاة (block) للليف البصري SMF، وقد أثبتت الدراسة أن هذا النموذج يؤمن مرونة ودقة في التعامل مع معطيات كثيرة، ويتيح اختبار أداء الليف البصري من أجل مجال واسع من القيم المحددة لمواصفاته.
- 2- أجريت الدراسة على نظام بصري يعمل في النافذة البصرية (C-Band)، وتم اختبار أداء الليف البصري المستخدم في هذا النظام بوجود تأثيرات التشنت والتخميد واللاخطية (SPM) عند معدلات ترسل مختلفة تجاوزت 40Gb/s، وذلك من أجل أطوال مختلفة للليف البصري. وقد أظهرت النتائج مرونة في اختيار قيم المعاملات التي يتعلق بها التشنت والتخميد، وتعديل الطور الذاتي التي تؤثر في أداء النظام البصري، وخاصة قيمة معامل التشنت ومساحة السطح الفعال لقلب الليف (A<sub>eff</sub>)، الذي يؤثر بشكل كبير في قيمة التداخل الناتج عن SPM.
- 3- تم تقويم أداء الليف البصري بحساب قيمة BER والعامل Q من أجل كل حالة مدروسة، وأوضحت النتائج أن زيادة مسافة الإرسال من أجل معدل ارسال محدد تزيد من انغلاق وتشوه فتحة العين الخاصة بالمخطط العيني لإشارة الخرج، ومن ثم زيادة BER وتناقص العامل Q، وتزيد من انبساط النبضة، وتبدي انخفاضاً واضحاً في استطاعة النبضة المرسله، لكن بالمقابل نلاحظ أن هناك انخفاضاً مقابلاً في عرض الطيف، وعدد الحزم الجانبية الناجمة عن تأثير SPM. كما لاحظنا زيادة BER وانخفاض العامل Q وزيادة في عرض الطيف مع زيادة معدل الإرسال من أجل ليف بطول 50km، ولذا يجب اختيار طول الليف المناسب عند كل معدل إرسال.
- 4- أجريت مقارنة بين قيمتين للسطح الفعال لقلب الليف البصري (A<sub>eff</sub>)، وبينت المقارنة أن زيادة A<sub>eff</sub> من شأنها تقليل تأثير SPM لكنها تزيد من العرض الزمني للنبضات البصرية المرسله.

5- يمكن الاستفادة من نموذج المحاكاة واستخدامه في نمذجة ومحاكاة نوع آخر من الألياف معوضة التشتت مثل DSF، NZDSF، DCF ذات مواصفات مختلفة، ودراسة تأثير استخدامها على الأداء في حالات متعددة.

### المراجع:

- [1] UDALCOVS, A.; BOBROVS, V.; IVANOV, G., *Investigation of Allowed Channel Spacing for Differently Modulated Optical Signals in Combined HDWDM Systems*. Electronics and Electrical Engineering ISSN 1392 – 1215, Vol. 6(112), 2011, 6.
- [2] KHAYER, M. A.; AZAD, M.; ISLAM, S., *Performance Limitations of WDM Optical Transmission System Due to Cross-Phase Modulation in Presence of Chromatic Dispersion*. ISBN 978-89-5519-139-4, Bangladesh, 2009, 1877-1881.
- [3] ADAPTÉ DE, S.O.; KASAP, B.E.A.; SALEH, M.C.; TEICH, P.; *Polarization and Modulations of Light*. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, Prentice Hall, 2010, 13.
- [4] KARAHAN1, S. VAROL, S., *Dispersion Compensation Using the Inverse Transfer Function of Fiber Optic Channel*. JOURNAL OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING, ISTANBUL UNIVERSITY, Vol. 9(2), 2009, 943-949.
- [5] GALWAS, A.; ZENON, R., *Generation of Intermodulation Distortions by Electro-Optical Modulators*. Warsaw University of Technology, 2002, 4.
- [6] SALGADO, H.M., *performance assessment of FM broadcast subcarrier multiplexing optical systems*. IEE Proceedings-J, UK, Vol. 140(6), 2000,10.
- [7] Gu, L.; JIANG, W.; CHEN, X.; Chen, R.T., *Physical Mechanism of p-i-n-Diode-Based Photonic Crystal Silicon Electro optic Modulators for Gigahertz Operation*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.14 (4), 2008, 1132-1139.
- [8] VERMA, R.; GARG, P., *Comparative analysis of self-phase modulation (SPM) and cross phase modulation (CPM)*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering, Volume 1, Issue 3, May 2012, 6.
- [9] BAYVEL P.; KILLEY R. *Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission*. In: Optical Fiber Communications. Elsevier Science (USA), United Kingdom, 2002, 611-641.
- [10] MAYROCK, M., *Analysis and Compensation of Non-linear Signal Distortion in Optical OFDM*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Cauerstr, 2010, 5.
- [11] DECUSATIS C., BASS M., STRYLAND E., *Fiber Optics Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Companies, United States of America, 2002, 398.
- [12] GOVIND E., *Optical Fibers in Fiber-Optic Communication Systems*. Third Edition, Wiley – Interscience, New York, 2002, 53.
- [13] AL-HAMDANI, A. H.; *Stationary and Solitary Solution sin a Nonlinear Medium*. 4th Class Optoelectronics Branch, 2011, 20.
- [14] Wang, Z. B.; Yang, H. Y.; Li, Z. Q., *The Numerical Analysis of Soliton Propagation with Plit-Step Fourier Transform Method*. Institute of Physics Publishing, International Symposium on Instrumentation Science and Technology, China, Vol. 48, 2006, 878-882.
- [15] MOHSAN NIAZ CHUGHTAI, *Nonlinear Phase Noise in Fiber Optical Communication*. Communication Systems Group Department of Signals and Systems, Sweden, 2009, 40.

[16] KANWAR, R.; BHASKAR, S., *Performance Analysis of Fiber Optic Link Using Different OBP Techniques*. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies IJESSET, Vol. 5(2), 2013, 144-149.

[17] GOVIND P., *Nonlinear Fiber Optics*. 4<sup>th</sup> Ed, Elsevier Science, United State of America, 2007, 534.

[18] Laboratory VI, "*Fiber Optic System Simulation*". 2006.

[19] CHOMYCZ B., "*Planning Fiber Optic Networks*". McGraw-Hill, United State of America, 2009, 401.