

## Simulation and Evaluate The Performance of The Pure Optical Amplifier Using a Split-Phase Fourier Transform Algorithm

Dr. Faek Arraj\*  
Dr. Afif Sakkour\*\*  
Dr. Hadeel Essa\*\*\*  
Nagham Abbas\*\*\*\*

(Received 30 / 10 / 2019. Accepted 13 / 1 / 2020)

### □ ABSTRACT □

Attenuation in optical communication systems is a key determinant imposed by the optical elements used or the fiber itself, which limits the performance of the optical communication system and reduces transmission distance. Therefore, optical amplifiers used in the optical system must be developed to compensate for signal attenuation and allow for very long distances. The increase in the number of channels sent in wavelength division multiplexing optical systems is also accompanied by a similar increase in the basic nonlinear effects affecting the signal transmitted across these fibers. Modern optical communications systems therefore require performance be evaluated by the presence of inhibitory determinants resulting from the fiber before its practical implementation.

Any attempt to model optical fiber must take into account both the effects that occur. One method used to model the propagation of the optical fiber signal used as a Raman amplifier is based on Schrodinger's non-linear equation solution. The method of solving this is called a Split Step Fast Fourier Transform, which takes into account the fundamental factors affecting the optical signal transmitted through this amplifier. Using the MATLAB simulation program, this amplifier's performance was compared for different types of pumping and for different values of the design parameters and performance evaluation through the BER error rate and factor Q.

**Keywords:** Optical Fiber, Nonlinearity, Raman Amplifier, Schrodinger.

---

\* Associate professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\* Associate Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\* Assistant Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\*\* Postgraduate Student (Doctorate), Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## نمذجة وتقييم أداء المضخم الضوئي الصرف باستخدام خوارزمية تحويل فورييه ذات الخطوة المجزأة

د. فائق عراج\*

د. عفيف صقور\*\*

د. هديل عيسى\*\*\*

نغم عباس\*\*\*\*

تاريخ الإيداع 30 / 10 / 2019. قُبِلَ للنشر في 13 / 1 / 2020

### □ ملخص □

يعد التخميد في نظم الاتصالات الضوئية عامل محدد أساسي يفرض من قبل العناصر الضوئية المستخدمة أو من قبل الليف الضوئي نفسه، فيحد من أداء نظام الاتصالات الضوئية ويقلل مسافة الإرسال. لذا لا بد من تطوير المضخمات الضوئية المستخدمة في النظام الضوئي لتعويض تخميد الإشارة والسماح بالإرسال للمسافات الطويلة. كما يترافق التزايد الكبير في عدد القنوات المرسل في الأنظمة الضوئية، المستخدمة لتقنيات التجميع بتقسيم طول الموجة لزيادة سعة الإرسال، مع تزايد مماثل في التأثيرات اللاخطية الأساسية المؤثرة في الإشارة المنتشرة عبر هذه الألياف، لذا تتطلب أنظمة الاتصالات الضوئية الحديثة تقييم الأداء بوجود المحددات المعيقة الناتجة عن الليف قبل تنفيذه عملياً. أي محاولة لنمذجة الليف الضوئي يجب أن تأخذ بالحسبان كلاً من التأثيرات التي تحدث. وإحدى الطرق المتبعة لنمذجة انتشار الإشارة عبر الليف الضوئي المستخدم كمضخم رامان الضوئي تعتمد على حل معادلة شرودنغر غير الخطية، وتدعى طريقة حلها بتحويل فورييه السريع ذي الخطوة المجزأة، التي تأخذ بالحسبان العوامل الأساسية المؤثرة في الإشارة الضوئية المرسل عبر هذا المضخم. باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB، تم من خلال هذا البحث مقارنة أداء هذا المضخم من أجل طرق ضخ مختلفة ومن أجل قيم مختلفة للبارامترات التصميمية وتقييم أدائه من خلال معدل خطأ البت BER والعامل Q.

الكلمات المفتاحية: الليف الضوئي، اللاخطية، مضخم رامان، شرودنغر.

\*أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

\*\*أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

\*\*\*مدرس، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

\*\*\*\*طالبة دراسات عليا(دكتوراه)، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

سورية. e-mail: [nagham575@yahoo.com](mailto:nagham575@yahoo.com)

**مقدمة:**

حققت أنظمة الاتصالات الضوئية تطوراً سريعاً في العقود الماضية استجابة لزيادة الطلب على خدمات الاتصالات في جميع انحاء العالم، فمنذ ظهور انظمة الاتصالات الضوئية زادت سعتها بشكل كبير، وفي أواخر التسعينيات من القرن المنصرم سمحت تقنية التجميع بنقسيم طول الموجة مع فاصل بين القنوات قدره 100[GHz] وبوجود المضخمات اللييفية المشابهة بالاربيوم (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) بإرسال 40 قناة بمعدل [2.5GHz] لكل قناة أي بسعة كلية مقدارها 100[Gb/s]. مع ظهور تقنية التجميع بنقسيم طول الموجة المكثف (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)، والذي قلل المسافة الفاصلة بين القنوات حتى [50GHz] أصبحت السعة الكلية 1[Tb/s]. وبفضل تقنيات التعديل وإدارة التشبثت أمكن زيادة سعة القناة أبعد من ذلك. كما مكن ظهور الكشف المترابط مع تقنية معالجة الإشارة الرقمية (Digital Signal Processing, DSP) مع استخدام التعديل (Polarization Division Multiplexed- Quadrature Phase Shift Keying, PDM-QPSK) عند معدل قناة 100[Gb/s] من الوصول إلى سعة كلية تبلغ 10[Tb/s]. وسوف تزداد هذه السعة خلال سنوات قليلة مرة اخرى للحفاظ على استمرار وظيفة الشبكات. وتعد كيفية استخدام موارد الشبكات (عرض النطاق و الاستطاعة وما إلى ذلك) على نحو يتسم بالكفاءة من التحديات الرئيسية في هذا التطور، وفي سبيل ذلك اقترحت عدة طرق وآليات لزيادة سعة الليف الضوئي ومن بينها زيادة عرض الحزمة الطيفية القابلة للاستغلال من خلال تطوير المضخمات الضوئية أو زيادة كفاءة الطيف أو تطوير تقنيات التجميع لزيادة جودة إرسال الإشارة عبر مسافات أطول [3-1]. حيث تكون مسافة الإرسال في هذه الانظمة محدودة بسبب الفقد والتشبتت في الألياف. إن استخدام الطرق التقليدية التي تعتمد التحويل الكهربائي للإشارة الضوئية مثل المكررات للتغلب على هذا القيد، معقدة ومكلفة بشكل كبير. لذا ظهرت المضخمات الضوئية في تسعينيات القرن العشرين. والتي تضخم مباشرة إشارة الإرسال، فتقلل بذلك من تعقيدات وتكلفة النظام إلى أدنى حد.

ويعد مضخم الليف المشابه بالاربيوم EDFA أحد المضخمات المستخدمة الأكثر شيوعاً وهو الأفضل من حيث تكيفه مع الليف الضوئي بشكل كامل، لكن لديه عيوب وهي أن طيف الريح يعتمد على الطول الموجي، وعرض الحزمة الترددية محدود بالحزمتين C, L Band وتبلغ حوالي 40nm، وهي اقل بكثير من عرض حزمة إرسال الليف البالغ [100nm]. وبناء عليه يوجد طرق للاستخدام الفعال لعرض الحزمة وهو تطبيق تقنيات تضخيم أخرى من بينها جمع مضخمين الأول (EDFA) في الحزمة C-Band والثاني (RAMAN) في الحزمة L-Band.

بالرغم من التصميم غير المعقد لمضخم رامان (RAMAN) وما يتمتع به من مزايا مثل عرض الحزمة الكبيرة التي تتجاوز [100nm] والسهولة في تأمين الريح ومرونة استخدام الاطوال الموجية، والضجيج المنخفض، ونسبة اشارة إلى الضجيج أفضل، وعرض حزمة ربح عريض حوالي 7THz ما يقابل تقريباً 60nm ويعتبر هذا المضخم واعدأ فيما يتعلق بزيادة سعة الإرسال، إلا أنه يوجد العديد من العوامل التي تخفض من أدائه مثل استطاعة المضخة العالية المطلوبة وعدم فاعلية الضخ عند استطاعات ضخ منخفضة، وزمن استجابة سريع ينتج عنه ضجيج أعلى، ولذا يجب دراستها بدقة وبشكل كامل عند تصميم المضخم والنظام.

تتفاعل في مضخم رامان الفوتونات مع جزيئات الوسط لتعرض انتقالات بين سويات الطاقة. وعادة ما تكون الفوتونات المتناثرة من هذه التفاعلات بنفس طاقة وخصائص طول موجة الضوء الساقط، وتعرف بالانتثار المرن أو بتبعثر Rayleigh. ومع ذلك ، فإن جزءاً صغيراً من الضوء، حوالي 1 من كل  $10^7$ ، يتبعثر عند ترددات ضوئية مختلفة

ويكون مستوى طاقته أقل بكثير من الفوتونات الساقطة، ويسمى هذا بتبعثر رامان المحثوث ( Stimulated Raman Scattering, SRS) الذي كان أول اكتشاف له في عام 1928. ينتج عن هذا التأثير ربح في الإشارة الضوئية ويعتمد الربح في هذه العملية على طول موجة المضخة ومستقل عن وسط الربح بخلاف مضخم EDFA، هذا يعني أن التضخيم يمكن تحقيقه من اجل اي تردد [3,4].

يرافق التزايد الكبير في عدد قنوات نظام WDM تزايداً مماثلاً في التأثيرات اللاخطية المؤثرة في الإشارة المنتشرة عبر الليف، وهي تعديل الطور الذاتي (Self Phase Modulation, SPM)، الذي يمكن أن يتواجد في الأنظمة وحيدة القناة، والمزج رباعي الموجات (Four Wave Mixing, FWM) وتعديل الطور المتصالب (Cross Phase Modulation, XPM)، التي تظهر فقط في الأنظمة متعددة القنوات وتبعثر رامان المحثوث [5].

يتضمن هذا البحث تصميم مضخم رامان وتطبيقه في أنظمة WDM الضوئية. إضافة إلى التحقق من الخواص الفيزيائية لتضخيم رامان ومقارنة نتائج الإرسال من أجل تكوينات النظام المختلفة لتحديد ما إذا كان مضخم رامان مفيداً في تحسين الأداء، ويركز على نمذجة مضخم رامان باستخدام MATLAB عن طريق حل وتحليل معادلاته بشكل رقمي، وتقييم الأداء بوجود المحددات المعيقة الناتجة عن الليف قبل تنفيذه عملياً واستخدامه في التضخيم.

تعتمد إحدى الطرق المتبعة لنمذجة انتشار الإشارة عبر ليف مضخم رامان على حل معادلة شرودنغر (Schrödinger) اللاخطية، وتدعى طريقة تحويل فورييه السريع ذي الخطوة المجزأة (Split Step Fast Fourier Method, SSFFM)، التي تأخذ بالحسبان العوامل الأساسية المؤثرة في الإشارة الضوئية المرسله عبر الليف الضوئي، وهذا ما جعلها أقل الطرائق المستخدمة تعقيداً [6,7].

### أهمية البحث وأهدافه:

بالرغم من أن مضخم رامان المصنوع من ألياف السيليكا الضوئية لا يملك عوامل لاختية كبيرة إلا أن العمليات اللاخطية تظهر وبشكل كبير بسبب صغر مساحة المقطع العرضي لليف التي تقع بين  $10^{-8} - 10^{-7} [cm^2]$  من أجل ليف أحادي النمط، والتي تحد بدورها من مسافة الإرسال إضافة إلى التخمد والتشتت، لذا يتضمن هذا البحث دراسة تقنيات رقمية تعتمد على استخدام برنامج MATLAB في حل معادلات الموجات المزوجة للحصول على معاملات تصميم مضخم رامان يعمل في المجال C-Band، وتقييم أدائه في ظل وجود التأثيرات السلبية، كما يتضمن تصميم نموذج محاكاة لمضخم رامان باستخدام خوارزمية SSFFM، باستخدام البرمجية MATLAB.

### طرائق البحث ومواده:

تعتمد طريقة البحث على إعداد برنامج حاسوبي باستخدام البيئة البرمجية MATLAB يسمح بتحديد قيم المعاملات الأساسية التي يتعلق بها التشتت والتخمد ولاخطية الليف والمضخم، اعتماداً على المعادلات المزوجة لمضخم رامان، ومعادلة شرودنغر للانتشار اللاخطي.

### 1- تضخيم رامان:

لفهم النموذج الفيزيائي، من الضروري دراسة النظرية الكمية لتبعثر رامان للحصول على معرفة أوسع للقضايا الرئيسية. حيث إن ظاهرة التبعثر اللامرّن إحدى الظواهر اللاخطية التي تحدث في الألياف الضوئية والناتجة عن تأثير الفوتون

على الكريستال، وأحد أنواعه تبعثر رامان المحثوث والذي يمثل انتقال الاستطاعة من الإشارة الضوئية إلى الوسط اللاخطي، ويحدث عندما تتجاوز الاستطاعة المرسله استطاعة العتبة [8].

### 1-1- آلية حدوث تبعثر رامان المحثوث SRS:

تعطى استطاعة العتبة بالعلاقة:

$$P_{th} = \frac{16\alpha A_{eff}}{g_R} \quad (1)$$

$A_{eff}$ : السطح الفعال لليف الضوئي،  $g_R$ : معامل الريح،  $\alpha$ : معامل التخميد.

وعندما يتم حقن الليف بحزمة ضخ (pump) ذات طاقة  $h\nu_p$  (h ثابت بلانك) أكبر من مستوى العتبة يحدث امتصاص لفوتونات الحقل المؤثر (حزمة الضخ) من قبل جزيئات الوسط، ومن ثم يعاد إشعاعها ثانية إلى سوية الكترونية متوسطة، فنتج فوتونات جديدة تسمى موجة ستوكس (Stokes) ذات تردد  $\nu_s$  وقدرة  $h\nu_s$  أقل من حزمة الضخ. أي تتخلى فوتونات حزمة الضخ عن قدرتها لتخلق فوتونات جديدة بقدرة أقل وتردد أقل والقدرة المتبقية من حزمة الضخ يتم امتصاصها من قبل جزيئات السيليكا التي تبدأ بالاهتزاز، ومن الممكن أن تترافق هذه العملية بإصدار فوتون Antistokes الذي يملك تردداً أعلى من حزمة الضخ وبالتالي قدرة أعلى لكنه نادر الظهور. لذا فإن الحزمة الضوئية ذات طول الموجة الأكبر يمكن أن تخضع لتضخيم ضوئي على حساب المضخة ذات طول الموجة الأقصر. أي في SRS إما أن تملك الفوتونات المبعثرة طاقة أو تفقد طاقة بتأثير الفوتونات المؤثرة، إن هذه العملية ممكن ان تكون ذات تأثير سلبي وتسبب انخفاض في أداء النظام من خلال نقل الطاقة الأحادي الجانب من القنوات ذات طول الموجة الأقصر إلى القنوات ذات طول الموجة الأكبر، حيث ينتج انحراف في التوزيع الطيفي لطاقتها في قنوات الإرسال مما يؤدي إلى تشويش وتداخل بين القنوات وانخفاض في استطاعة الإشارات ذات طول الموجة الأقصر [9-12].

### 1-2- المعادلات التفاضلية المزدوجة لمضخم رامان:

بوصف العملية فيزيائياً نجد أن الخفقان بين حزمة الضخ المؤثرة ذات التردد  $\nu_p$  والضوء المتبعثر الناتج  $\nu_s$  يولدان مركبة ترددية جديدة ذات تردد خفقان  $\omega_p - \omega_s$  التي تعمل كمصدر إضافي لاهتزاز الجزيئات، طالما أن مطال الموجة المتبعثرة يزداد استجابة للاهتزازات، يتم تقييم استطاعتي المضخة والإشارة على طول الليف من خلال المعادلات التفاضلية المزدوجة التالية [9,13]:

$$\frac{dP_S}{dz} = -\alpha_S P_S - \frac{g_R}{A_{eff}} P_P P_S \quad (2)$$

$$\xi \frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \left(\frac{\partial P}{\partial S}\right) \frac{g_R}{A_{eff}} P_S P_P \quad (3)$$

توفر استطاعة المضخة  $P_P$  استطاعة للتضخيم وتستهلك مع زيادة استطاعة الإشارة  $P_S$ . عندما تقترب استطاعة المضخة من استطاعة الإشارة، يتناقص الريح الضوئي ويحدث اشباع. في هذا المضخم إما أن يتم الضخ من نهاية الليف أو من بداية الليف أو ضخ ثنائي الاتجاه.

تتناقص الاستطاعة تدريجياً على طول الليف بسبب خسارات الألياف، والتي تؤدي إلى اهتزازات مجهرية في كثافة النواة. يتضمن معاملا التخميد  $\alpha_P, \alpha_S$  كل مصادر تخميد الإشارة والمضخة، و يتم التعبير عنه بوحدة dB/km بالعلاقة  $\alpha \left(\frac{dB}{km}\right) = 10 \log(e) \alpha \approx 4.343 \alpha$  وتعطى استطاعة المضخة المحقونة بالاتجاه الامامي بالعلاقة:

$$P_P = P_0 \exp(-\alpha_P z) \quad (4)$$

حيث  $P_0$  استطاعة المضخة عند الدخل. أما استطاعة خرج المضخم ذي الطول  $L$  تحدد بالعلاقة:

$$P_S(L) = P_S(0) \exp\left(\frac{g_R P_0 L_{eff}}{A_{eff}} - \alpha_S L\right) \quad (5)$$

$L_{eff}$ : الطول الفعال للييف وهو الطول الذي يحدث خلاله التبعثر المحثوث في اللييف ويعطى بالعلاقة:

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

وبما أن ربح المضخم هو نسبة استطاعة الإشارة مع تضخيم إلى استطاعتها دون تضخيم لذا تمثل العلاقة  $G_A = \frac{P_S(L)}{P_S(0) \exp(-\alpha_S L)} = \exp(-g_0 L)$  ربح رامان (*on-off gain*)، حيث  $g_0 = \frac{g_R P_0}{A_{eff} \alpha P L}$  ربح الإشارة الصغيرة [14].

## 2- النمذجة العددية للمعادلات المزدوجة:

يمكن وصف تغيرات استطاعة المضخة والإشارة في وسط التضخيم (مضخم رامان) بمجموعة من المعادلات التفاضلية العادية (Ordinary Differential Equations, ODEs) كما في المعادلتين (2)، (3).

يمكن نمذجة هذه المعادلات باستخدام تقنيات رقمية قياسية. حيث إن التقريب العددي (مثل Runge-Kutta) المستخدم في MATLAB بالاعتماد على التابع (ODEs)، الذي يأخذ بالحسبان الدقة المطلوبة في التقريب وزمن معالجة المحاكاة الذي له أهمية خاصة في ظل بيئة التشغيل MATLAB و Simulink. لذا يستخدم التابع ode45.m في MATLAB على نطاق واسع لحل المعادلات المزدوجة [13-17].

## 2-1- معادلة شرودنجر (Schrödinger) اللاخطية للتبعثر و ربح رامان:

يوضح هذا القسم نموذج ربح مضخم رامان المستخدم للييف SMF. يعتمد هذا النموذج على معادلة Schrödinger غير الخطية (NLS)، لأنها تغطي انتشار النبضات الضوئية ضمن الألياف. بالتالي في حال وجود أي تضخيم موزع، يتم تحويل هذه المعادلة لتشمل تضخيم رامان [13].

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = \frac{j}{2} \beta_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z,t) + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3}{\partial t^3} A(z,t) + j\gamma |A(z,t)|^2 A(z,t) + \frac{1}{2} [g(\xi) - \alpha] \quad (7)$$

$A(z,t)$ : غلاف الحقل الكهربائي المتغير ببطء،  $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}}$  البارامتر اللاخطي،  $\xi = \frac{z}{L_D}$ ،  $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$  طول اللييف الذي يبداً عنده التشتت بالتأثير،  $g$ : عامل الربح، تتضمن معادلة NLSE التأثيرات اللاخطية و ضياعات الألياف من خلال استخدام عامل التخمد  $\alpha$  وتأثيرات التشتت من الدرجة الثانية والثالثة (Three Order Dispersion, TOD) من خلال استخدام العاملين  $\beta_2$  و  $\beta_3$  على التوالي،  $\beta_1$ : مقلوب سرعة المجموعة  $\beta_1 = \frac{1}{v_g}$ ،  $\beta_2$  ثابت انتشار من الدرجة الثانية.  $[\text{ps}^2/\text{km}]$ ،  $\beta_3$  ثابت انتشار من الدرجة الثالثة  $[\text{ps}^3/\text{km}]$ .

## 3- التأثيرات اللاخطية في الألياف:

إن استخدام الألياف الضوئية للإرسال لمسافات طويلة جداً عبر البحار والمحيطات يتطلب استخدام استطاعات ضوئية عالية جداً، وذلك لتحقيق نسبة إشارة إلى ضجيج عالية. هذه المتطلبات تسبب ارتفاعاً في التأثيرات اللاخطية للألياف الضوئية والتي لها تأثير عكسي على أداء النظام. تعد اللاخطية الليفية مهمة جداً عند الأخذ بالحسبان تضخيم رامان في ليف الإرسال. منشأ هذه اللاخطية ناتج عن كون قرينة انكسار المادة لا تعتمد على طول الموجة فقط، وإنما تعتمد أيضاً على شدة الإشارة المتغيرة مع الزمن والمنتشرة عبر المادة. وتعرف هذه الظاهرة بتأثير كير (Kerr)، وبناء عليه تعطي قرينة انكسار اللييف الضوئي على النحو [13, 18]:

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P \quad (8)$$

تمثل  $n_0$  قرينة الانكسار الخطية المعتمدة على طول الموجة،  $A_{eff}$  المساحة الفعالة لليف الضوئي،  $n_2$  قرينة الانكسار اللاخطية المعتمدة على الشدة،  $I(t)$  الشدة الضوئية (optical intensity) و  $P$  الاستطاعة الضوئية. يمثل  $\frac{n_2}{A_{eff}}$  العامل اللاخطي، أي تعتمد التأثيرات اللاخطية على المساحة الفعالة لليف الضوئي. التأثيرات الأكثر أهمية الناتجة عن تأثير كبير هي SPM و XPM و FWM والتي تسبب انخفاض أداء النظام. الأنواع الأخرى من اللاخطية هي تأثيري التبعثر الرئيسين اللذين يحدثان بسبب الخواص الجوهرية للألياف الضوئية وهما تبعثر بريلوين (Brillouin Scattering, SBS) وتبعثر رامان المحثوث (SRS).

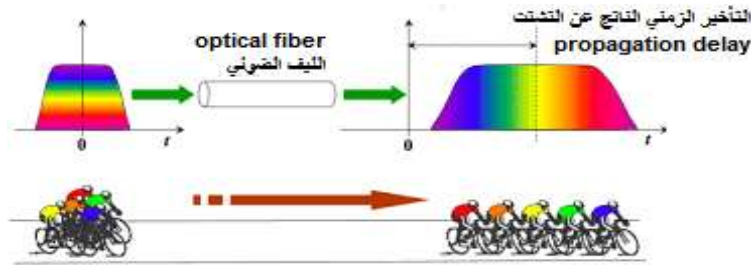
#### 4- التشتت في الليف الضوئي:

يعد التشتت عاملاً محدداً أساسياً في تقييم الأداء في الشبكات الضوئية عالية السرعة، ويعتمد على التفاعل بين الأمواج الكهرومغناطيسية والإلكترونات المقيدة في الوسط العازل (الليف الضوئي). ينتج التشتت اللوني لأن المصدر الضوئي لا يبعث أشعة بتردد واحد، وإنما بنطاق معين من الترددات. عند انتشار عدة مركبات ترددية مختلفة بسرعات مختلفة عبر الليف الضوئي تصل إلى نهايته بأزمنة مختلفة وهذا يؤدي إلى اتساع النبضة، ومن ثم تداخل النبضات المتجاورة وصعوبة في كشف واستعادة النبضات بشكل كامل عند المستقبل [19,20].

ينجم هذا الاختلاف في سرعة الانتشار عن تغير في قرينة انكسار القلب تبعاً لطول الموجة مما يؤدي إلى اتساع عرض النبضة كما هو مبين في الشكل (1)، وتظهر العلاقة (9) تابعة قرينة الانكسار للتردد الزاوي للموجة:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{\beta_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (9)$$

$\omega_j$ : التردد الزاوي للإشارة،  $\beta_j$ : معامل سيلمييه (Sellmeier) [19,20]



الشكل (1) اتساع النبضة الناتج عن التشتت اللوني

#### 5- خوارزمية تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة:

تُعرف الطريقة العددية المستخدمة لحل معادلة شرودنغر غير الخطية باسم طريقة تحويل فورييه للخطوة المجزأة (SSFM)، فهي تمثل نموذج لـ لاخطية الألياف داخل النظام. وتتطلب تحويل معادلة NLS إلى [13-17]:

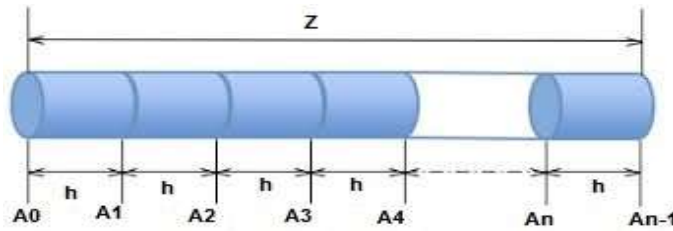
$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A(z,t) \quad (10)$$

$\hat{N}$ : لاخطية الليف،  $\hat{D}$ : معامل تفاضلي يحسب من اجل التشتت في وسط خطي بالمعادلة (11):

$$\widehat{D} = \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{1}{2} [g(\xi) - \alpha] + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \beta_3}{\partial t^3} \quad (11)$$

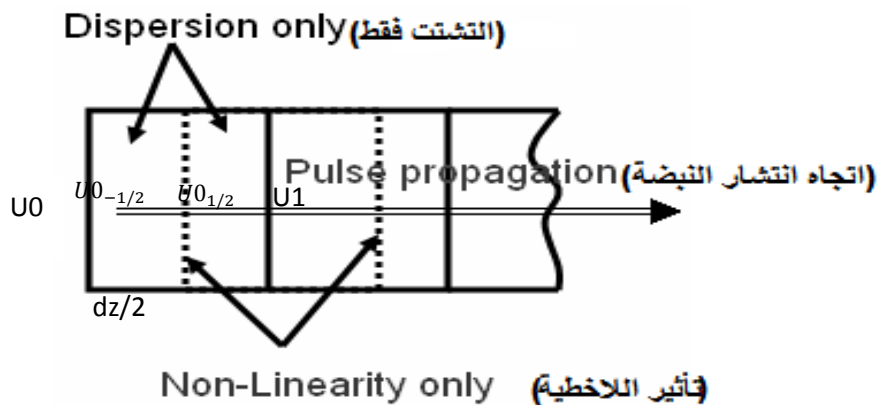
$$\widehat{N} = i\gamma|A|^2 + \text{other nonlinear terms} \quad (12)$$

لوحظ أنه من غير الممكن حل المعادلة بشكل تحليلي خاصة عندما تتواجد التأثيرات اللاخطية مع التشتت والتخميد. لذلك تستخدم الطرق العددية لحل هذه المعادلة من أجل نمذجة انتشار الإشارة عبر الوسط اللاخطي (الليف). يتم حل معادلة شرودنغر اللاخطية لتوضيح التأثيرات المختلفة التي تحدث للإشارة خلال انتشارها، وفي هذا البحث استخدمنا خوارزمية تحويل فوريير للخطوة المجزأة FFM باستخدام برمجية MATLAB.



الشكل (2) تجزئة الليف الضوئي أحادي النمط إلى مقاطع وفق خوارزمية SSFFM

تتطلب هذه الخوارزمية تقسيم الليف إلى مقاطع صغيرة يمثل كل منها  $h = \delta z$ ، و بالتالي خلال طول ما من الليف  $Z$  فإن كل مقطع  $\delta z$  يمثل تأثيرات مختلفة للليف ويفترض أن المقاطع تعمل بشكل مستقل عن بعضها أي يتم حل معادلة الانتشار بشكل عددي بطريقة تحويل فوريير السريع للخطوة، حيث يتم حل تأثيرات التشتت، التخميد، واللاخطية بشكل منفصل في مجال التردد للأولى والزمن للثانية، حيث يعتبر التشتت في كل مقطع أما اللاخطية تطبق فقط على نقطة منتصف كل مقطع. ويوضح الشكل التالي مراحل انتشار الإشارة في أحد المقاطع المجزأة [18]:



الشكل (3) يمثل مقطع من الليف الضوئي أحادي النمط

بداية يتم إدخال حقل الدخل ممثلاً نبضة غوص في دخل المرحلة الأولى (الجزء الأول من الليف) ويتم تحديد الحقل الناتج على خرج الليف بتطبيق عاملين على حقل الدخل وهما: العامل الخطي والعامل اللاخطي فالأول يأخذ بالحسبان تأثير التشتت والتخميد والثاني يمثل اللاخطية الناتجة عن تأثير  $Kerr$ ، وبما أن الموجة المنتشرة خلال المجال الخطي الأول تمثل في مجال التردد لذا يطبق تحويل فوريير على الإشارة الداخلة باستخدام الأمر fft ضمن برنامج MATLAB، ومن ثم جداولها بتابع النقل  $e^{-j\beta(w)\frac{\delta z}{2}}$  الممثل للجزء



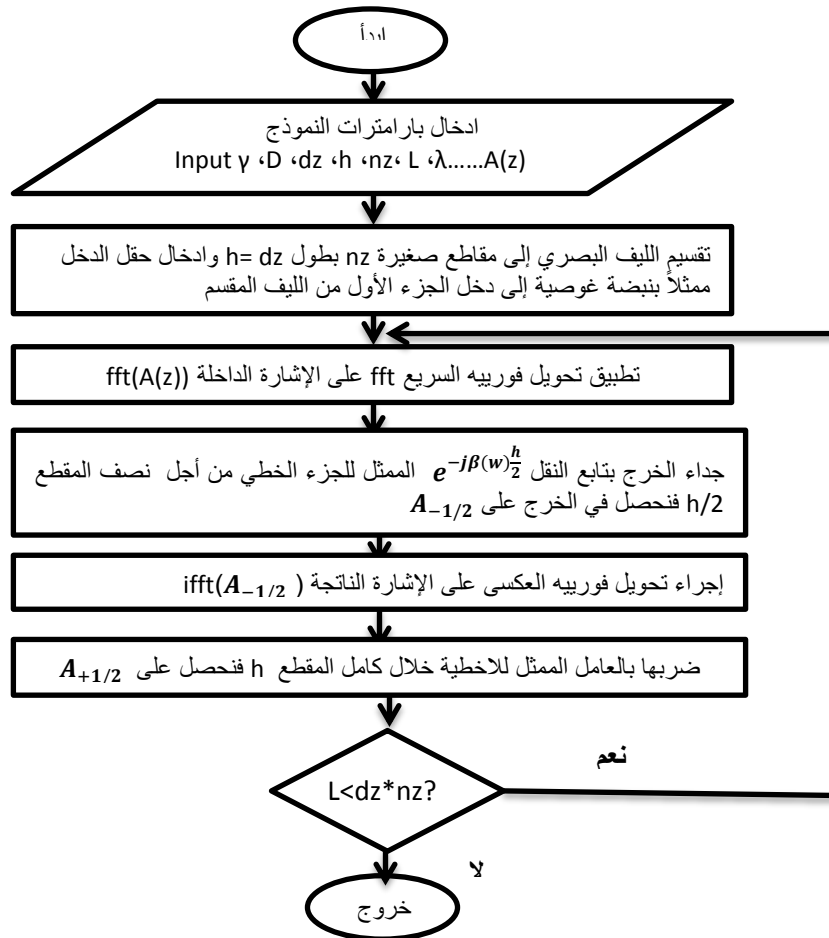
الخطي فتمثل الإشارة الناتجة  $U_{-1/2}$  إشارة دخل للمرحلة التالية، حيث يطبق عليها تحويل فوريير العكسي باستخدام تعليمة ifft في MATLAB وجدها بالعامل الممثل للاخطية حيث يمثل انتقال النبضة بالمجال اللاخطي الواقع بين مجالين خطيين في مجال الزمن، والإشارة الناتجة  $U_{+1/2}$  تعود لتدخل الجزء الخطي الثاني فيطبق عليها تحويل فوريير ويتم جدها بتابع النقل مرة أخرى بحيث تمثل الإشارة الناتجة على خرج هذه المرحلة  $U1$ . تبعاً لذلك فإن الإشارة عندما تنتشر في مقاطع الليف فإنها ستنتقل بين مجالي الزمن والتردد بشكل تعاقبي. عندما تدخل الإشارة  $U1$  المقطع التالي فإنها تعود لتصبح حقل الدخل  $U0$ . وهكذا يتم تكرار العمليات السابقة ضمن كل مقطع على طول الليف والمعادلات التالية تمثل الاشارات الناتجة على خرج كل جزء من المقطع [21,22].

$$U_{-\frac{1}{2}} = F^{-1} \left[ F(U0) e^{-j\beta(w)\frac{\partial z}{2}} \right] \quad (13)$$

$$U_{+\frac{1}{2}} = e^{-j\gamma|U|\partial z} \quad (14)$$

$$U_{+\frac{1}{2}} = F^{-1} \left[ F(U_{1/2}) e^{-j\beta(w)\frac{\partial z}{2}} \right] \quad (15)$$

يتم تضمين تأثير تضخيم رامان في تصميم هذه الخوارزمية واختباره باستخدام Simulink. واختبار الانتشار باستخدام نبضة غوصية نظرية من خلال الألياف والتحقق فيما إذا كانت النبضة الغوصية المنتقلة نظرياً ستعود إما مع ربح أو خسارة، اعتماداً على بارامترات ابتدائية. ويبين الشكل (4) المخطط النهجي (الالغاريتم) لطريقة SSFFTM المستخدمة:



الشكل (4) المخطط النهجي لخوارزمية SSFFM

يمكن استخدام المخطط العيني لتقدير معدل خطأ البت (BER) الخاص بالنظام. باستخدام العلاقة [22]:

$$BER = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{I_1 - I_D}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right] \quad (16)$$

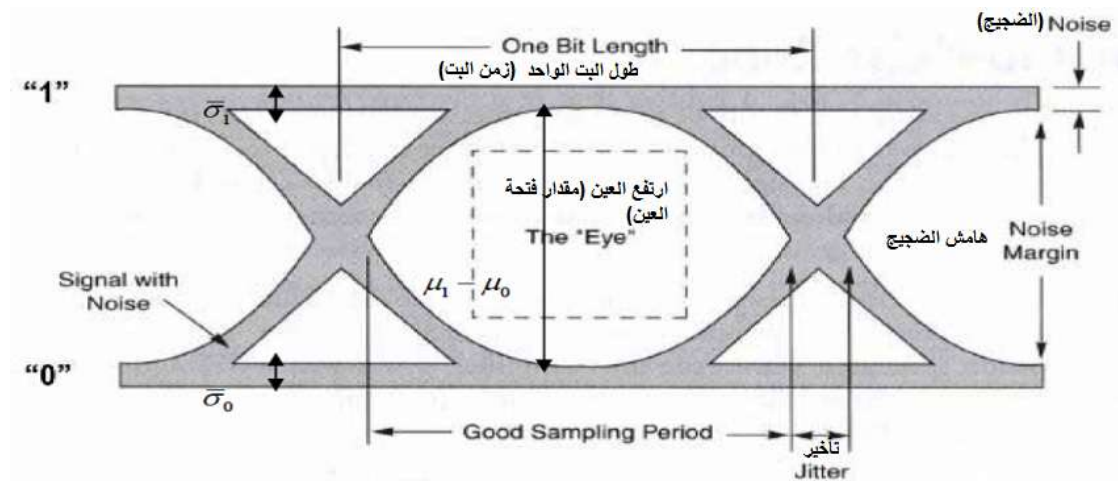
يؤثر التشوه الحاصل مباشرة في شكل العين الذي يعني أن الأداء يتراجع عند الخرج، وهذا يزيد المستخدم بحجم التشوهات الحاصلة، يقدر عامل الأداء Q باستخدام العلاقة  $Q = \frac{(I_1 - I_0)}{\sigma_1 + \sigma_0}$  حيث  $\sigma$  الانحراف المعياري،  $\mu$  تعادل 34.1% من المعلومات.

يمثل  $I_1, I_0$  متوسط مطال الرموز (0) و(1)، أما  $\sigma_1, \sigma_0$  فتتمثل الانحرافات المعيارية للرمزين (0) و (1)، من أجل التوزيع الغوسي حيث  $\sigma_0 = 0.68\bar{\sigma}_0, \sigma_1 = 0.68\bar{\sigma}_1$ ، ويحسب BER كما في العلاقة:

$$BER = \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (17)$$

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

إذا كان المخطط العيني غير مشوه فان العين تبدو مفتوحة وواضحة، لكن مع وجود محددات (معوقات) مثل التأخير وقلة التزامن، فإن النموذج العيني سيصبح مشوهاً ويتناقص حجم فتحة العين عمودياً وأفقياً، أي يحدث التشوه المطالي والطوري معاً، كما في الشكل (5):



الشكل (5) النموذج العيني في حال وجود تشوه وضجيج.

يحسب تشتت الليف بالعلاقة  $D_\lambda = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)$ ، حيث  $S_0 = 0.093 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ ،  $\lambda_0 = 1302 \text{ nm}$ ، وبالتالي التشتت المحسوب بشكل تقريبي  $17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ . في محاكاة ربح مضخم رامان، يتم افتراض القيم التالية  $\alpha_p = 0.24 \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]$ ،  $\alpha_s = 0.19 \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]$ ، المساحة الفعالة لقلب الليف  $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$ ، معامل ربح رامان  $g_R = 0.72 [\text{W}^{-1} \text{km}^{-1}]$ .

## النتائج والمناقشة:

يتم تضمين خصائص وبارامترات مضخم رامان مثل التشتت والتخميد واللاخطية وطول المقطع وعدد المقاطع وطول الموجة وغيرها باستخدام ملف تابعي في برنامج MATLAB، وتعالج ضمن MATLAB Function Block،

ويتلقى النموذج هذه البيانات من فضاء عمل MATLAB لتكوين تشكيلات مضخم رامان الأمامي والخلفي والثنائي الاتجاه، تم اشتقاق حل تحليلي من المعادلات المزوجة التي تتجاهل ما يسمى بضوب المضخة. تم تشكيل تابعي ode45 للمضخ الخلفي والأمامي على التوالي. وقد تحقق ذلك عن طريق تغيير اتجاه المضخة. وللتحقق فيما إذا كانت معادلة NLS قد نجحت في تضمين ربح رامان وباستخدام برنامج الانتشار SSFM، تم استخدام نبضة غوسية واحدة في النظام كحل دخل.

استطاعة الذروة القصوى للنبضة الغوسية 1mW، تم تصميم كل تشكيلات المضخات من أجل ليف ضوئي بطول 90km، باستخدام مقاطع بطول الخطوة 450m وبعدد 200 خطوة.

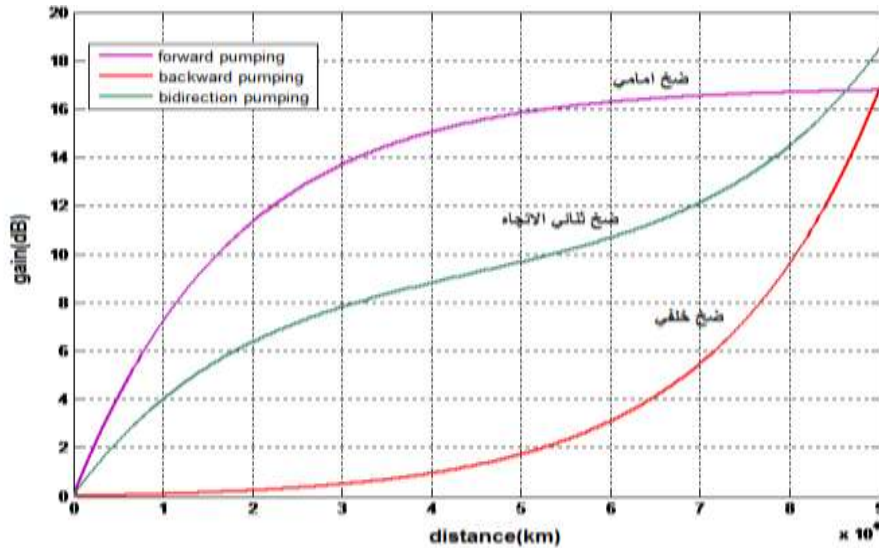
الجدول (1) قيم بعض البارامترات الخاصة بالليف الضوئي SMF المستخدم

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

### 5-1- ربح مضخم رامان من أجل تشكيلات ضغ مختلفة:

من أجل نمذجة مضخم رامان في حالات الضخ الثلاثة استخدم تابعي MATLAB ode45 من أجل الضخ الامامي والخلفي، حيث بقى اتجاه انتشار الاشارة الضوئية نفسه في كلا الحالتين، ومن أجل الضخ الثنائي الاتجاه تم جمع خرج الضخ الامامي والخلفي.

يبين المخطط البياني في الشكل (6) ربح الاشارة الضوئية على طول الليف. وفقا لتقنيات الضخ الثلاث بالاتجاه الامامي (الزهري)، الخلفي (الاحمر)، ثنائي الاتجاه (الاخضر).

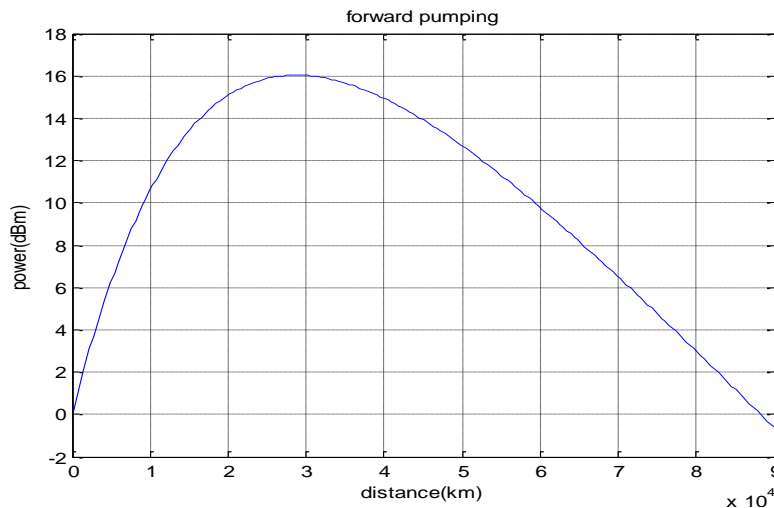


الشكل (6) يبين ربح الاشارة الناتج عن تضخيم رامان في حالات الضخ الامامي، الخلفي والثنائي الاتجاه من اجل استطاعة ضغ

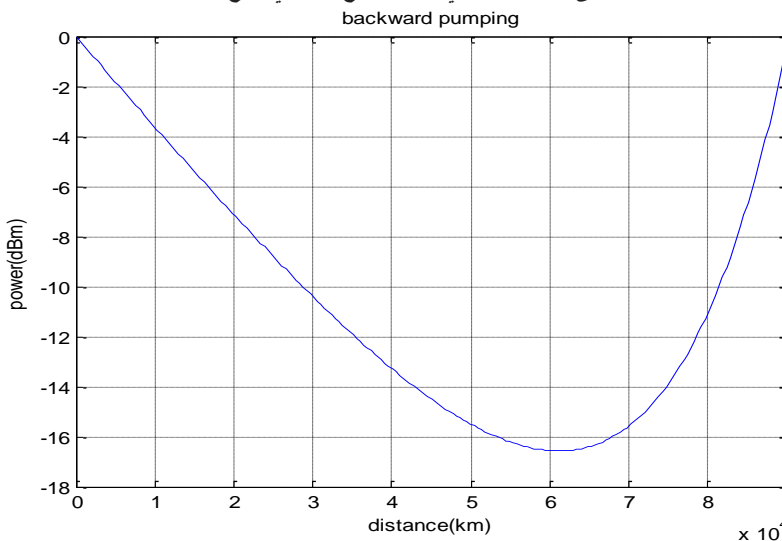
$$\lambda_p = 300mW \text{ و } 1450nm$$

يكون الريح في حالة الضخ الامامي كبيراً في بداية الليف وهذا يسبب زيادة اللاخطية في الليف نتيجة اعتماد قرينة انكسار القلب والغلاف على الاستطاعة، يحدث الريح في حالة الضخ الخلفي في نهاية الليف بعد حصول خسارة كبيرة على طول الليف حيث يؤدي فقدان الاستطاعة إلى زيادة احتمال تغيير جودة الاشارة بسبب هذا الضجيج. أما الضخ الثنائي يبدي توازناً من حيث الضجيج واللاخطية، وبلغت قيمة الريح في حالتي الضخ الامامي والخلفي 16dB و 18.5dB في حالة الضخ الثنائي عند 90km، يكون الريح في هذه الحالة أعلى في بداية ونهاية المقطع، ومن ثم قد تحد اللاخطية من استطاعة الإشارة التي أرسلت عبر الليف في منتصف مسافة الارسال. وتمثل المنحنيات في الاشكال التالية تغير استطاعة الاشارة على طول الليف في حالات الضخ الامامي والخلفي والثنائي والاتجاه حيث تم تقييم استطاعة الإشارة على طول الليف الضوئي ذو التخميد  $\alpha = 0.19\text{dB/km}$ .

يلاحظ في الضخ الامامي من الشكل (7) أن استطاعة الاشارة الضوئية المرسله تتراد في بداية الليف حتى طول 30km لتبدأ بعدها بالتناقص بسبب تأثيرات التخميد واللاخطية. بينما على العكس من ذلك نلاحظ من منحنى تغير الاستطاعة عند الضخ بالاتجاه الخلفي الشكل (8) تتناقص الاستطاعة حتى مسافة 65km تبدأ بعدها بالتزايد.

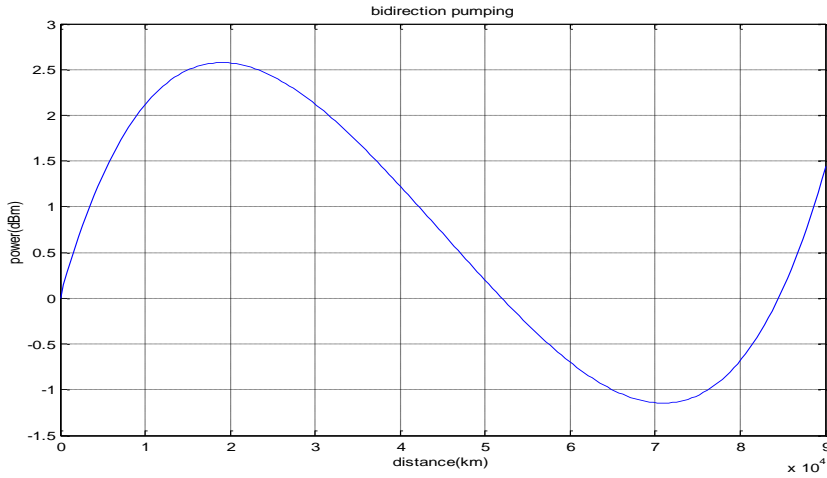


الشكل (7) تغير استطاعة الاشارة على طول الليف في حالة الضخ الامامي ضخ 300mW و  $\lambda_p = 1450\text{nm}$



الشكل (8) تغير استطاعة الاشارة على طول الليف في حالة الضخ الخلفي ضخ 300mW و  $\lambda_p = 1450\text{nm}$

يتم في الضخ الثنائي حقن اشارتي ضخ كل منها باستطاعة 150mW من منتصف مقطع الليف باتجاهين متعاكسين والشكل التالي (9) يبين تغير استطاعة الاشارة على طول الليف في هذه الحالة.

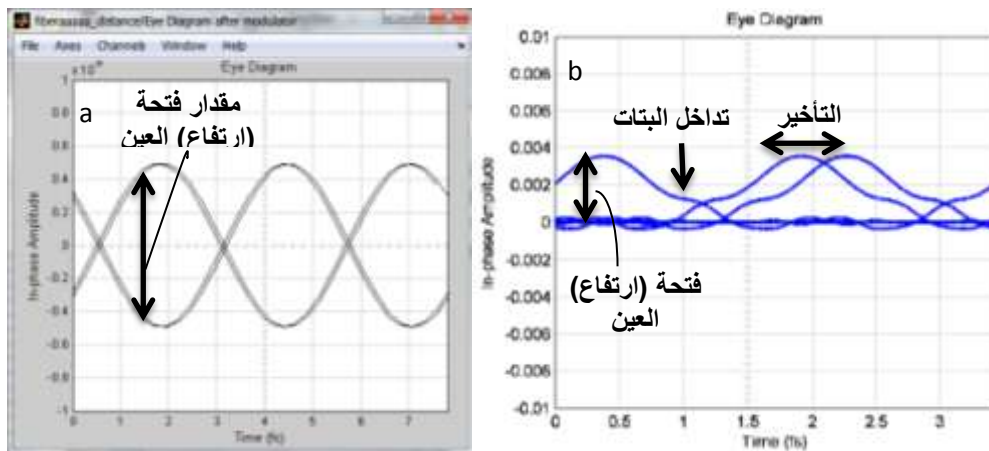


الشكل (9) تغير استطاعة الاشارة على طول الليف في حالة الضخ الثنائي ضخ 300mW و  $\lambda_p = 1450nm$

## 5-2- تقييم أداء الارسال بوجود مضخم رامان:

بعد تنفيذ ملف التهيئة m-file وتشغيل نموذج المحاكاة مع ضبط بارامترات الليف ونظام العمل على القيم المطلوبة، نحصل على النموذج العيني للإشارة الضوئية المرسله قبل وبعد دخولها الليف الضوئي، كما في الشكل (10) والذي يبين حدوث تشوه في المخطط (النموذج) العيني للإشارة بتأثير التشتت واللاخطية بعد مرورها عبر الليف الضوئي. وقد تم تحليل أداء النموذج من خلال معدل خطأ البت والعامل Q. تم أخذ عينات من المنطقة التي تكون فيها فتحة العين كحد أقصى، والتي عادة ما تكون من 40% إلى 60% فقط من مجال العين، لتقدير معدل الخطأ في البتات (BER)، وذلك باستخدام فضاء عمل Simulink والملف التنفيذي في MATLAB.

تم حساب معدل خطأ البت BER وعامل الاداء الموافق Q من المخطط العيني في الشكل (10) كما في المعادلات (16, 17) لنجد أن  $BER=1.5e-10$  وعامل الاداء  $Q=6.3$ ، وتبلغ استطاعة الخرج  $10\log(3.8)=5.7dB$  أي 3.8mW من أجل استطاعة دخل الليف 1mW.



الشكل(10)النموذج العيني (a) للإشارة الضوئية قبل دخولها الليف الضوئي، (b) لإشارة خرج ليف ضوئي بطول 100km

**الاستنتاجات والتوصيات:**

- 1- قمنا في هذا البحث بدراسة تحليلية لخوارزمية تحويل فورييه السريع ذات الخطوة المجزأة المستخدمة في حل معادلة الانتشار اللاخطي الجزئية التفاضلية بعد دمج ربح مضخم رامان في معادلة الانتشار. وقد ترجمت هذه الخوارزمية إلى تعليمات بلغة MATLAB مكننتنا من تصميم نموذج محاكاة (block) لليف ضوئي SMF يعمل كمضخم رامان، وقد أثبتت الدراسة أن هذا النموذج يؤمن مرونة ودقة في التعامل مع معطيات كثيرة، ويتيح اختبار أداء المضخم الضوئي من أجل مجال واسع من القيم المحددة لمواصفاته.
- 2- أجريت الدراسة على نظام إرسال ضوئي يعمل في النافذة الضوئية (C-Band)، وتم اختبار أداء هذا النظام بوجود تأثيرات التشتت والتخميد واللاخطية، وقيم أداء الليف الضوئي بحساب قيمة BER والعامل Q.
- 3- اختيرت خوارزمية SSFFM من أجل تشكيلات ضخ مختلفة لمضخم رامان.
- 4- 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 بوجود التأثيرات اللاخطية.
- 5- يمكن الاستفادة من نموذج المحاكاة اختبار أداء مضخم مختلط مكون من مضخم رامان ومضخم EDFA.

**References:**

- [1] KARTHICK, J.; SANJAI, V., *Transmission of NG-PON for Long Haul Networks Using Hybrid Amplifier*, National Conference on Emerging Technologies for Sustainable Engineering & Management (NCETSEM'18), 2018, 1-7.
- [2] ESSIAMBRE R., TKACH, R. "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks", PROCEEDINGS OF THE IEEE, 100(5), 2012, 1035-1055.
- [3] UDALCOVS, A.; BOBROVS, V.; IVANOV, G., *Investigation of Allowed Channel Spacing for Differently Modulated Optical Signals in Combined HDWDM Systems*. Electronics and Electrical Engineering, Vol. 6(112), 2011, 6.
- [4] KHAYER, M. A.; AZAD, M.; ISLAM, S., *Performance Limitations of WDM Optical Transmission System Due to Cross-Phase Modulation in Presence of Chromatic Dispersion*, Bangladesh, 2009, 1877-1881.
- [5] BAYVEL P., KILLEY R., *Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission*. In: *Optical Fiber Communications*. Elsevier Science (USA), United Kingdom, 2002, 611-641.
- [6] DEITERDING, R., GLOWINSKI, R., OLIVER, H. *A Reliable Split-Step Fourier Method for the Propagation Equation of Ultra-Fast Pulses in Single-Mode Optical Fibers*, Journal Of Lightwave Technology, 2013, 10.
- [7] Suarez, Pablo, U. An introduction to the Split Step Fourier Method using MATLAB, Research Gate, 2013, 15.
- [8] MAYROCK, M., *Analysis and Compensation of Non-linear Signal Distortion in Optical OFDM*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Cauerstr, 2010, 5.
- [9] WESSON A., *Calculation of the effect of pump depletion in WDM systems with distributed Raman gain*. Electronic and Electrical Engineering, London, 2001, 4.
- [10] KALYVAS M., BINTJAS C., *Experimental and Theoretical Investigation of Nonlinear-Crosstalk in SCM-WDM CATV Systems*. Optical and Quantum Electronics, 2(36), 2004, 413-430.

- [11] EMPILT P.; COEN S.; VANHOLSBECK F., *Coupled-Mode Analysis of Stimulated Raman Scattering and Four-Wave Mixing In Wavelength Division Multiplexing Systems*. *Optical Communication*, 250, 2005, 191-201.
- [12] HAHN D., *Raman Scattering Theory*. University of Florida, 2007, 13.
- [13] AL-HAMDANI, A.H.; *Stationary and Solitary Solutions in a Nonlinear Medium*. 4th Class Optoelectronics Branch, 2011, 20.
- [14] ANUPAM S.; SACHIN K. G.; VIJAY R.K., *Effect of ASE on Raman Gain in 800nm band*, Kuala Lumpur (Malaysia), Int'l Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2016, 21-22.
- [15] WANG, Z. B.; YANG, H. Y.; LI, Z. Q., *The Numerical Analysis of Soliton Propagation with split-Step Fourier Transform Method*. Institute of Physics Publishing, International Symposium on Instrumentation Science and Technology, China, Vol. 48, 2006, 878-882.
- [16] MOHSAN N. CH., *Nonlinear Phase Noise in Fiber Optical Communication*. Communication Systems Group Department of Signals and Systems, Sweden, 2009, 40.
- [17] 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.
- [18] GOVIND P., *Nonlinear Fiber Optics*. Elsevier Science, 4<sup>th</sup> Ed, United State of America, 2007, 534.
- [19] SLAVOV, D., *Chromatic dispersion compensation in conventional single-mode fibers*. Technical University of Varna, 2004, 4.
- [20] MORIN, M. , TRÉPANIÉ, F., *Dispersion control for ultrafast optics*. White Paper, TeraXion, 2009, 1- 10.
- [21] THYAGARAJAN, K. AND GHATAK, A., *Some important nonlinear effects in optical fibers*. Guided wave optical component and devices Elsevier, 2007, 16.
- [22] Laboratory exercise., *Nonlinearity measurement of optical fibers using continuous-wave SPM method*. Optical Communications and Instruments, 2004, 13.