

دراسة تأثير المزج رباعي الموجات على أداء المضخم الليفي المشاب بالأربيوم EDFA

فائق عراج*

عفيف صقور**

هديل عيسى***

نغم عباس****

(تاريخ الإيداع ١٣ / ١١ / ٢٠١٩ . قبل للنشر ٢٧ / ١ / ٢٠٢٠)

الملخص

تتطلب أنظمة الاتصالات الضوئية الحالية والمستقبلية العمل بمعدلات بت مرتفعة لتلبية المتطلبات المتزايدة لنطاق ترددي عريض. لذا تم استخدام نظم التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف (Dense Wavelength Division Multiplexing DWDM). لكن وبنفس الوقت لن يكون تنفيذ DWDM ممكناً دون تطوير المضخم الليفي المشاب بالأربيوم (Erbium Doped Fiber Amplifier EDFA) لتعويض تخميد الإشارة الضوئية المرسل. كما لوحظ أن سعة وأداء النظام الضوئي محدودة بشكل أساسي بسبب عدة تأثيرات سلبية في نظام الاتصالات الضوئية عالية السرعة. حيث تؤدي اللاخطية الليفية مثل تبعثر بريللوين المحفز (Stimulated Brillouin Spontaneous SBS) وتبعثر رامان المحفز (Stimulated Raman Spontaneous SRS) والتعديل الطوري الذاتي (Self Phase Modulation SPM) وتعديل الطور المتقاطع (Cross Phase Modulation XPM) والمزج رباعي الموجات (Four Wave Mixing FWM) إضافة الى ضجيج الاصدار التلقائي المضخم (Amplified Spontaneous Emission ASE) والتشتت اللوني (chromatic dispersion CD) في الليف الضوئي إلى تدهور أداء النظام، ويعد FWM أحد العوامل الرئيسية المحددة لأداء أنظمة الاتصالات الضوئية الخاصة بـ WDM والتي تستخدم المضخم الضوئي.

سنعرض في هذا البحث دراسة عن تأثير المزج رباعي الموجات في مضخم EDFAs C-band نظراً لأهميته في نظم WDM من خلال اجراء محاكاة لنظام ارسال ضوئي.

الكلمات المفتاحية: المضخم الضوئي، مضخم ليفي مشاب بالأربيوم، مزج رباعي الموجات، تأثيرات لاخطية.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.
** أستاذ مساعد في قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.
*** مدرس في قسم هندسة الاتصالات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والالكترونيات-جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.
**** طالبة دكتوراه قسم هندسة الاتصالات -كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والالكترونيات-جامعة تشرين- اللاذقية- سورية. ٤

Studying The Effect of Four Wave Mixing on Erbium Doped Fiber Amplifier Performance

FAEK ARRAJ*
AFIF SAKKOUR**
HADEEL ISSA ***
NAGHAM ABBAS****

(Received 13 / 11 / 2019 . Accepted 27 / 1 / 2020)

ABSTRACT

Current and future optical communication systems require high bit rates to meet the growing demands of broadband. Therefore, Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) was used. At the same time, the implementation of DWDM would not be possible without developing the Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) to compensate the transmitted signal attenuation. Fiber nonlinearity such as Stimulated Brillouin scattering (SBS), Stimulated Raman scattering (SRS), Self Phase Modulation (SPM), Cross Phase Modulation (XPM), Four Wave Mixing (FWM) in addition to the noise of Amplified Spontaneous Emission (ASE) and chromatic dispersion (CD) in optical fiber, lead to system performance degradation.

FWM is one of the key determinants of WDM system performance that use the optical amplifier.

In this paper we will present a study of FWM effect on C-band EDFAs amplifier due to its importance in WDM systems by simulating an optical transmitter system.

Key Word: Optical Amplifier, EDFA, FWM, Nonlinear Effect.

*Assistant Professor in Mechanical and Electrical Faculty, Telecommunication and Electronic Engineering Department, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Assistant Professor in Mechanical and Electrical Faculty, Telecommunication and Electronic Engineering Department, Tishreen University, Lattakia, Syria.

***Associate Professor in Mechanical and Electrical Faculty, Telecommunication and Electronic Engineering Department, Tishreen University, Lattakia, Syria.

****PHD Student in Mechanical and Electrical Faculty, Telecommunication and Electronic Engineering Department, Tishreen University, Lattakia, Syria.

المقدمة:

يعد نظام التجميع بتقسيم طول الموجة من افضل الأنظمة الضوئية المستخدمة في ايامنا هذه وذلك لقدرته العالية على تحقيق معدل ارسال مرتفع والاستخدام الناجح للمضخمات الضوئية. لكن تتعرض الاشارة الضوئية عند ارسالها عبر الشبكات الضوئية إلى ضياعات التخمد، التشتت، واللاخطية، ففي نظام التجميع بتقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM) تلعب التأثيرات غير خطية دوراً مهماً مثل SPM و XPM و SRS و SBS و FWM [1]. تحدث الظواهر الكهرومغناطيسية اللاخطية نتيجة لكون استجابة الوسط العازل تابع لخطي لمطال كل من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي. ويعود منشأها إلى الحركة الاهتزازية للإلكترونات عند تطبيق حقل عالي. [2] كما أن التزايد الكبير في عدد القنوات في الأنظمة المتعددة القنوات يرافقه تزايد مماثل في التأثيرات اللاخطية، مثل تأثير XPM, FWM التي تتواجد فقط في الأنظمة المتعددة القنوات و SPM الذي يتواجد في الأنظمة وحيدة القناة. والسبب المباشر لهذه التأثيرات هو حقيقة أن قرينة انكسار المادة تتغير وفق شدة الإشارة المتغيرة مع الزمن والمنتشرة عبر المادة وهذا يسمى تأثير كبير. وكما نعلم أن سرعة الموجة الضوئية ضمن وسط نقل ما تعتمد على قرينة انكساره، وبالتالي تغير قرينة الانكسار يجعل القيم اللحظية للشدة تنتشر بسرعات مختلفة وتصل بأزمنة مختلفة إلى نهاية الليف. وهكذا تتحول تغيرات استطاعة الاشارة الضوئية مع الزمن إلى تغيرات في الطور نسمي هذه العملية تعديل الطور الذاتي SPM. [3,4]

يتشابه XPM مع SPM من حيث المبدأ إلا أن الإزاحة الطورية اللاخطية الناتجة عن الـ XPM في إشارة ما S تعتمد على استطاعة قناة أخرى مجاورة لها تدعى قناة ضخ (pump) P. ويحدث المزج رباعي الموجات FWM عندما يتم ارسال اشارتين ضوئيتين او اكثر عبر الليف الضوئي فينتج مركبات ترددية جديدة (تختلف عن الاطوال الموجية المرسله)، ويعتبر FWM التأثير الاكثر سلبية في نظم التجميع بتقسيم طول الموجة WDM. [3,4-6] شكل آخر للظواهر اللاخطية التي تحدث بالألياف الضوئية وتسبب انخفاض في أداء النظام هو ظاهرة التبعثر اللامرر والذي يمثل انتقال الاستطاعة من الإشارة الضوئية إلى الوسط اللاخطي، أحد أنواعه هو تبعثر رامان المحثوث SRS حيث تقوم جزيئات المادة بامتصاص قدرة كافية لتحريض الاهتزازات الجزيئية أما القدرة المتبقية فتتبعثر كفوتون ذو قدرة منخفضة. إضافة إلى أن الحزمة الضوئية ذات طول الموجة الأكبر يمكن أن تخضع لتضخيم ضوئي على حساب الحزمة ذات طول الموجة الأقصر. وفي تبعثر بريللوين SBS ينتج اهتزازات صوتية نتيجة تفاعل الضوء مع جزيئات الوسط ويكون اتجاه الشعاع الناتج باتجاه عكس اتجاه الاشارة المرسله. [7, 8]

تسبب جميع التأثيرات السلبية انخفاض اداء نظام WDM الضوئي. وهذا يجعلها بحاجة للتضخيم الضوئي والمضخم الضوئي الاكثر استخداماً هو مضخم EDFA نظراً لكونه يضخم بشكل فعال في المجال 1550nm الحزمة C حيث تبدي انظمة الاتصالات الضوئية عندها فقد اصغري. كما يملك خصائص افضل من حيث الضجيج وحساسية الاستقطاب. إن أحد التأثيرات الرئيسة للتضخيم هي وجود انبعاث تلقائي مضخم ASE يحدث بشكل متزامن مع تضخيم الإشارة ويقلل من نسبة الإشارة إلى الضجيج OSNR، كما انه ومع استخدام مضخم EDFA يحدث التضخيم في كل من الاشارات المرسله والمركبات الجانبية المتولدة بفعل FWM. [9]

اجريت محاكاة لنظام ضوئي يستخدم تقنية التجميع DWDM لـ ٣٢ قناة من اجل استطاعات ضخ تتراوح من 40mW-120mW ودرس تأثير استطاعة الضخ وطرق الضخ الامامي وثنائي الاتجاه على اداء النظام، حيث تبين زيادة العامل Q مع زيادة استطاعة الضخ من اجل كلا تقنيتي الضخ، لكن الزيادة كانت اكبر في حالة الضخ الثنائي،

كانت قيمة العامل Q تساوي ١١,٤٣، ١٢,٤١ عند طول 8m واستطاعة ضخ 120mW، اهمل هذا البحث تأثير عامل التشتت على قيم FWM وعلى اداء النظام الذي يستخدم مضخم EDFA. [10]

اقترحت احدى الدراسات استخدام فاصل غير متساوي بين القنوات المجمع لتقليل تأثير FWM لكن على حساب زيادة عرض الحزمة [11]، حيث درس البحث [11] تأثير فاصل القناة على FWM من اجل ١٦ قناة في نظام DWDM من اجل فواصل (50,100,150,200)GHz كل قناة تعمل بمعدل 20Gb/s.

تضمن البحث [12] تحليل استطاعة FWM من اجل التضخيم الهجين عند اطوال مختلفة لمضخم رامان في نظام ضوئي بـ ٨ قنوات يستخدم شبكة ليف براغ FBG لتعويض التشتت، لكن لوحظ ان وجود FBG يزيد من تأثير اللاخطية، كما تبين ان زيادة طول مضخم رامان يسبب تناقص تأثير FWM، كما قدم البحث [13] دراسة لتخفيض تأثير FWM بتصميم نظام اتصالات ضوئي مكون من 32 قناة بفاصل 200GHz بمعدل ارسال وصل حتى 40Gb/s عبر ليف ضوئي بطول 480km مقسم الى ثلاث مقاطع استخدم هذا التصميم ٣ مضخات EDFA لتخفيض التخمد واستخدم ليف DCF بطول 30km حيث تم اختيار مناسب للبارامترات التصميمية بعد اجراء المحاكاة في برنامج Optisystem لتحسين عامل الاداء Q.

وسيتم في هذا البحث تصميم وتقييم اداء عمل شبكة ضوئية لإرسال اربع موجات بتقنية DWDM تستخدم مضخم EDFA ودراسة أداءه بوجود تأثير FWM مع الأخذ بالاعتبار ASE من اجل استطاعات دخل مختلفة باستخدام المحاكى Optisystem، ودراسة تأثير تركيز ايونات الاربوم على اداء النظام والذي أغفلت دراسته في الابحاث والمرجعيات المذكورة. سيتم استنتاج كل من Gain, OSNR, BER, Q من اجل كل حالة مدروسة لتقييم اداء النظام الضوئي المصمم. كما سيتم دراسة تأثير استخدام ليف معوض التشتت DCF يضاف الى وصلة الارسال على مركبات FWM الناتجة، كما تمت دراسة تأثير استخدام التضخيم الهجين.

أهمية البحث واهدافه:

بعد التخمد، التشتت واللاخطية الذي تتعرض له الاشارة عند ارسالها عبر الليف الضوئي من المشاكل الاساسية في الاليف الضوئية التي تستخدم ليزرات عالية الاستطاعة للإرسال لمسافات طويلة، مما يتسبب بانخفاض جودة الاداء، لا نستطيع منع هذه التأثيرات لكن يجب علينا اخذها بالحسبان عند دراسة هذه المنظومة، حيث ان اختيار البارامترات المستخدمة في منظومة اتصالات تستخدم تقنية DWDM سيكون له تأثير كبير على الميزات والاداء والتقييم الفيزيائي لنظام الاتصالات.

يهدف هذا البحث دراسة تأثير الظاهرة اللاخطية (المزج رباعي الموجات) في نظام ضوئي DWDM يستخدم مضخم EDFA، واجراء دراسة تجريبية وفق سيناريوهات مختلفة باستخدام المحاكى Optisystem لمراقبة أداء عمل مضخم EDFA وتحديد خصائصه مع الاخذ بالاعتبار التأثيرات السلبية، وتقييم أداء النظام من حيث عامل Q، معدل الخطأ في البت (BER)، استطاعة الخرج، الريح، وOSNR.

طرائق البحث ومواده:

نظراً لتعقيد وتكلفة تركيب الشبكات الضوئية اصبح اجراء التجارب عبر النمذجة والمحاكاة غاية في الاهمية حتى في المجال التعليمي والاكاديمي في المعاهد والجامعات التقنية.

يعتمد هذا البحث على استخدام المحاكى Optisystem والذي يعتبر اداة تقييمية يقدم الادوات التصميمية والتجهيزات اللازمة لتصميم النظام المدروس ومحاكاته لتحصيل المعطيات وتحليل النتائج لأجل ذلك، حيث يتم تحديد

بارامترات وخصائص العناصر المستخدمة في تصميم نظام الاتصالات ومن ثم دراسة تأثير تغيير هذه البارامترات على الأداء وفق عدة سيناريوهات حيث يتم في السيناريو الاول تصميم نظام ضوئي DWDM يستخدم ليف SMF قياسي يوصل بعده مضخم EDFA، في السيناريو الثاني يستخدم ليف معوض التشتت DCF يوصل مع ليف SMF ومضخم EDFA على التسلسل، يتم في السيناريو الثالث استخدام تضخيم مختلط يتضمن المضخمين EDFA ورامان ومن اجل كل حالة يتم دراسة اداء النظام بوجود تأثيرات التشتت، التخميد و FWM.

١- المزج رباعي الموجات FWM:

يحدث عند استخدام تقنية WDM حيث ينتشر عدد من الأمواج الضوئية بأطوال موجة مختلفة معاً في الليف الضوئي وهذا يؤدي الى توليد حزم جانبية بترددات جديدة، كما هو مبين بالشكل (1)، إذا انتشرت 3 مركبات ترددية f_i, f_j, f_k عبر ليف ضوئي ستتولد مركبات ترددية جديدة f_{ijk} تحقق العلاقة: [13]

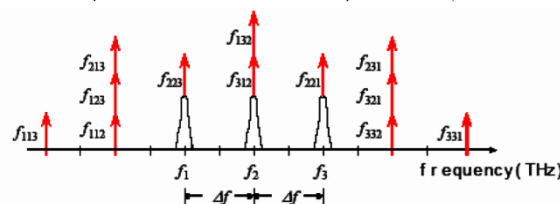
$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (i, j, k=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

هذه الإشارات المتولدة يمكن أن تتداخل مع الإشارات الأصلية إذا كان لبعضها نفس التردد أو قريب منه، حيث تؤدي إلى تشويش أو تداخل.

يزداد تأثير FWM مع زيادة عدد القنوات في نظام WDM. ففي نظام تجميع ذي N قناة يظهر عدد كبير من المركبات الترددية الجديدة الناتجة من تأثير FWM، ويعطي عدد هذه المركبات الجديدة المتولدة بالعلاقة [3]:(2)

$$M = \frac{N^2(N-1)}{2}$$

N هو عدد القنوات و M عدد الحزم الجانبية (المركبات الترددية الجديدة) المتولدة.



الشكل (١) يمثل ثلاث إشارات دخل بترددات f_1, f_2, f_3 والمركبات الترددية الجديدة الناتجة عن FWM [6]

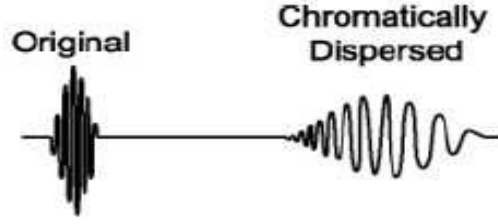
٢- التشتت اللوني (Chromatic Dispersion):

يعتبر التشتت اللوني عامل محدد أساسي في تقييم الأداء في الشبكات الضوئية العالية السرعة وينتج عن كون المصدر الضوئي لا يبعث أشعة بتردد واحد وإنما بنطاق معين من الترددات، وعند انتشار عدة مركبات ترددية مختلفة بسرعات مختلفة عبر الليف الضوئي تصل إلى نهاية الليف بأزمنة مختلفة هذا الاختلاف في سرعة الانتشار ناجم عن تغيير في قرينة انكسار القلب التابع لطول الموجة مما يؤدي إلى اتساع في عرض النبضة. هذا يؤدي إلى تقاطع بين النبضة والنبضات المجاورة ومن ثم صعوبة في كشف واستعادة النبضات المتجاورة بشكل كامل عند المستقبل، يعطى معامل التشتت اللوني D وفقاً للعلاقة:

$$D = \frac{\lambda d^2 n}{cd \lambda^2} \quad (3)$$

D واحدته [ps/nm.km]، λ طول الموجة بال [nm]، c سرعة الضوء في الخلاء [m/sec]، $\delta \lambda$ عرض

الطيف (nm). [14]



الشكل (2) اتساع النبضة الناتج عن التشتت اللوني [14]

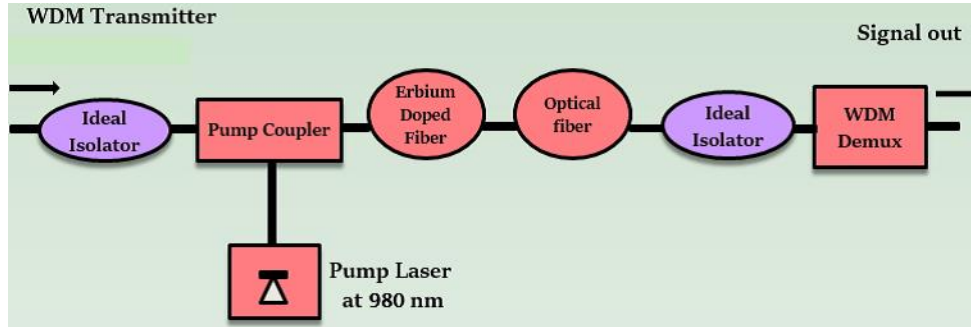
تملك الاليف معوضة التشتت عامل تشتت يتراوح بين -70ps/nmkm حتى -90ps/nmkm ويمكن استخدامها لتعويض التشتت الايجابي الناتج عن اليف الارسال. وعند وضع DCF واحد مع تشتت سلبي بعد SMF ذو التشتت الايجابي، يجب أن يكون مجموع التشتت صفراً، على سبيل المثال ، يجب تحقيق المعادلة ٤. [15,11]

$$D_{SMF} \times L_{SMF} = -D_{DCF} \times L_{DCF} \quad (4)$$

٣- مضخم اليف المشاب بالاربيوم EDFA:

إن مضخم EDFA هو أكثر مضخات الألياف الضوئية المستخدمة في مجال الاتصالات طالما أن نافذة التضخيم تتوافق مع نافذة الإرسال الثالثة 1550nm للألياف الضوئية، حيث يكون تخميد اليف الضوئي اصغري، ولذا معظم مضخات EDFA التجارية تعمل في الحزمة $C(1530\text{nm}-1565\text{nm})$ ، علماً عرض الحزمة توسع ليضم الحزمة $L(1565\text{nm}-1625\text{nm})$ في السنوات الأخيرة. [16]

يتكون مضخم EDFA بشكل أساسي كما هو مبين في الشكل (٣) من ليف ضوئي مشاب بالاربيوم، مضخة ليزرية تحرض ايونات الاربوم في المضخم، قارن طول موجة انتقائي.



الشكل (3) مكونات نظام التضخيم الضوئي باستخدام مضخم EDFA

يتم توجيه الموجة الضوئية داخل اليف الضوئي المشاب بالاربيوم بواسطة قارن WDM، والذي يستخدم لتجميع وقرن الإشارة والمضخة داخل اليف الضوئي المشاب، ويوضع عازل Isolator على الخرج لمنع الانعكاس. يتم الحصول على الربح من خلال عملية الانبعاث المحثوث. يوجد عدة أطوال موجية مناسبة للضخ من اجل ضخ ايونات الاربوم إلى سوية طاقة أعلى، وتستخدم حالياً أطوال الموجة 980nm , 1480nm ، إن الضخ بـ 980nm أكثر فاعلية حيث يتطلب استطاعة ضخ اقل بكثير للحصول على نفس الأداء من حيث الضجيج مقارنة مع طول موجة الضخ 1480nm أو 800nm . [17]

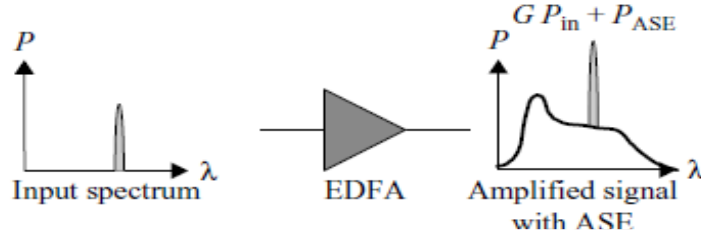
٣-٣-١- ربح مضخم EDFA:

الربح هو الخاصية الرئيسية للمضخم، يتم تعريف ربح EDFA على أنه نسبة استطاعة إشارة الخرج إلى استطاعة إشارة الدخل كما هو موضح في المعادلة (٥). [18]

$$G(\lambda) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5)$$

٣-٣-٢ - الضجيج في مضخم EDFA:

إن أيونات الإربيوم التي تشغل أعلى مستوى للطاقة يمكنها أيضًا إجراء انتقالات عفوية للحالة الأرضية وانبعث إشعاعات تماما مثل الإشارة الضوئية المرسل، ويمكن أن يتم تضخيم الانبعث العفوي المتولد في أي نقطة على طول الليف وهذا يسمى ضجيج الاصدار التلقائي المضخم ASE. ولا يمكن ترشيح ASE عندما يتوضع داخل حزمة الإشارة، كما هو موضح بالشكل أدناه. [19]



الشكل (4) طيف الإشارة المضخمة بوجود ضجيج ASE

يمكننا تحديد نسبة استطاعة الإشارة الضوئية إلى الضجيج (OSNR) كنسبة استطاعة الإشارة الضوئية بالخارج

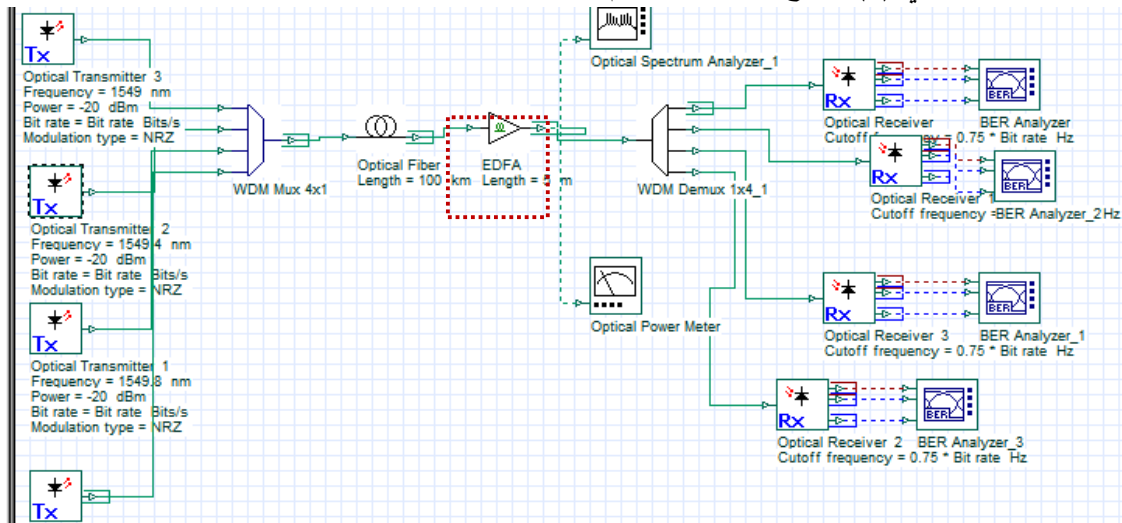
إلى استطاعة ASE:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}} \quad (6)$$

النتائج والمناقشة:

ينطوي سيناريو المحاكاة على تصميم نظام اتصال ضوئي باستخدام برنامج Optisystem 7.0. من اجل اجراء دراسة تحليلية لتأثير FWM في مضخم EDFA يعمل في الحزمة C، يتكون النموذج من نظام DWDM بأربع قنوات مختلفة ذات اطوال الموجة 1549nm, 1549.4nm, 1549.5nm, 1550.2nm مع مسافة بينية قدرها 50GHz تكافئ 0.4nm تعمل كل قناة بمعدل بيانات 10Gb/s، مجمع، ليف احادي النمط (Single Mode Fiber (SMF)، مضخم EDFA، واربع مستقبلات من اجل كل مرسل. تم استخدام محلل طيفي Optical Spectrum ومخطط عيني Eye Diagram لتقييم الاداء من خلال العامل OSNR, BER, Q. تعطي البارامترات التصميمية الخاصة بالنموذج المصمم وفق الجدول (1).

يبين الشكل التالي (٥) نموذج المحاكاة المصمم للشبكة الضوئية:



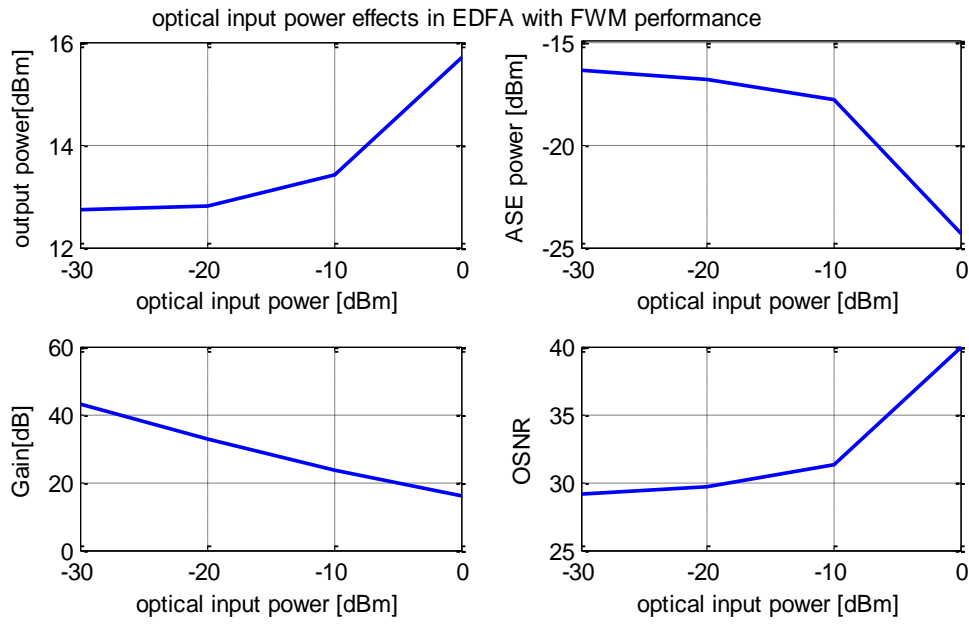
الشكل (٥) مخطط المحاكاة للنظام الضوئي DWDM

الجدول (1) قيم البارامترات التصميمية المستخدمة في نموذج المحاكاة للنظام الضوئي: [10]

| | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|
| تركيز أيونات الأربيوم | $10^{-25} [m^{-3}]$ | طول الليف SMF | 100[km] |
| طول مضخم EDFA | 5[m] | عامل التشتت | 17.5[Ps/nmkm] |
| استطاعة الضخ | 100Mw | طول موجة الضخ | 980nm |

٤-١- دراسة تأثير استطاعة الدخل على خصائص مضخم EDFA:

تمت دراسة تأثير تغيير استطاعة الدخل الضوئية على مركبات FWM وعلى أداء النظام الضوئي من خلال استنتاج قيم كل من BER, OSNR والعامل Q. من أجل كل قيمة لاستطاعة الدخل الضوئية تم قياس استطاعة الخرج و ASE من خلال مقياس استطاعة Power Meter على خرج مضخم EDFA، أما ربح المضخم و OSNR حسبت وفق العلاقات (٥)، (6)، فحصلنا على النتائج التالية المبينة في الشكل أدناه.



الشكل (٦) يبين تأثير استطاعة الدخل على خصائص EDFA (الربح، OSNR، استطاعة ASE، استطاعة الخرج)

تزداد استطاعة خرج مضخم EDFA من القيمة 12.74dBm حتى 15.7dBm بزيادة استطاعة الدخل الضوئية التي تقدمها الليزر المتوفرة تجارياً من -30dBm حتى 0dBm، بينما تتناقص استطاعة ضجيج الاصدار التلقائي للمضخم من -16.4dBm حتى -24dBm ويفسر ذلك لأنه مع زيادة استطاعة الدخل تتناقص الانتقالات العفوية الى الحالة الأرضية ومن ثم يتناقص ضجيج الاصدار التلقائي للمضخم ASE، وهذا سيزيد نسبة استطاعة الإشارة الى الضجيج OSNR من 29.14 حتى 40.

أما بالنسبة لربح المضخم سينخفض من 42.74dB الى 15.7dB مع زيادة الاستطاعة وذلك لبلوغه حد الاشباع عند استطاعة دخل -40dBm، حيث يزداد الربح مع زيادة استطاعة الدخل حتى قيمة عظمى 52dB عند الاستطاعة -40dBm ثم يتجه نحو الاشباع مع زيادة الاستطاعة، فبعد هذه القيمة لاستطاعة الدخل تكون أيونات الأربيوم المثارة محدودة مما يحد من عدد الفوتونات المنبعثة نتيجة عملية الاصدار المحثوث، فينخفض ربح المضخم، وهذا يفسر تناقص الربح مع زيادة الاستطاعة بعد هذه القيمة.

ووفقاً لمتطلبات أنظمة الاتصالات تعتبر قيمة -10dBm لاستطاعة الدخل مناسبة وتوافق ربح كبير 20dB ونسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج OSNR كبيرة 31.26 كما هو موضح في الشكل (٦).

٤-٢- تقييم أداء النظام الضوئي:

تم تقييم أداء النظام الذي يستخدم مضخم EDFA مع الأخذ بالاعتبار وجود تأثير FWM، التشتت، التخميد، وضجيج ASE من خلال بارامترات عامل الأداء Q، و BER المستنتجة من المخطط العيني، حيث يعتبر مخطط العين تقنية قديمة تستخدم لتقييم الإشارة المستقبلية.

٤-٢-١- دراسة تأثير استطاعة الدخل الضوئية على الأداء:

تم اختبار عدة قيم لاستطاعة الدخل الضوئية لدراسة تأثيرها على أداء النظام الضوئي الموجود في الشكل (٥) تم الحصول على النتائج المبينة بالجدول (٢)

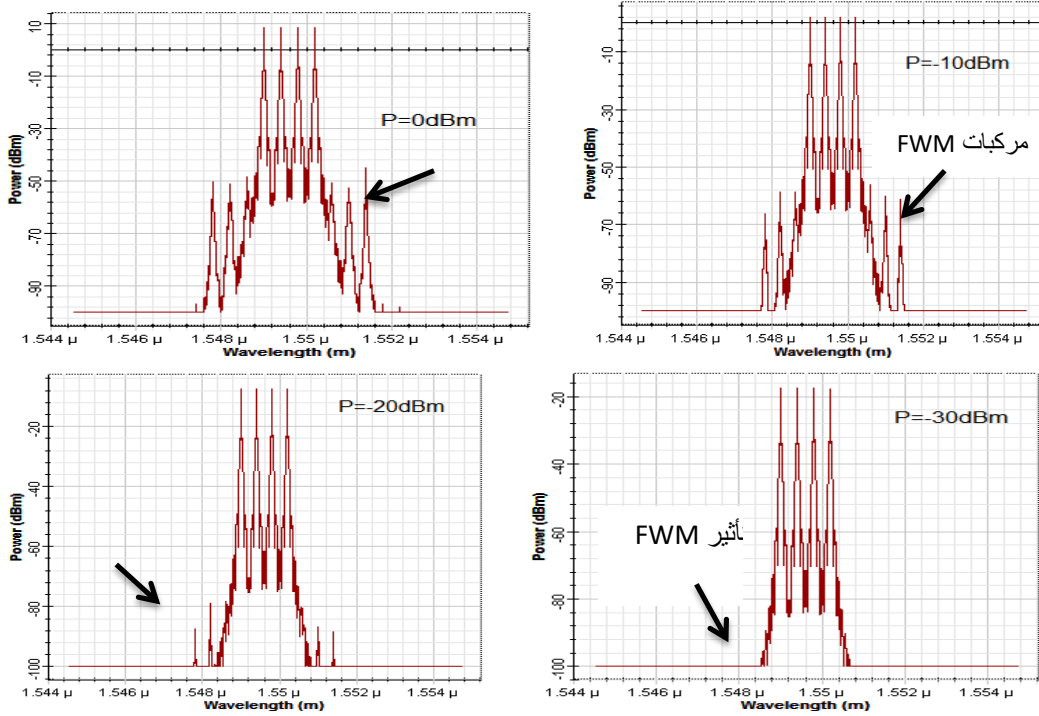
الجدول (٢) يبين قيم عامل الأداء ومعدل خطأ البت من أجل استطاعة دخل $-10\text{dBm}, 0\text{dBm}$:

| $P_{in} = 0\text{dBm}$ | | | $P_{in} = -10\text{dBm}$ | | |
|------------------------|----------|-------|--------------------------|----------|-------|
| $\lambda[\text{nm}]$ | BER | Q | $\lambda[\text{nm}]$ | BER | Q |
| ١٥٤٩ | ٠,٠٠١١٧٥ | ٣,٦٦ | ١٥٤٩ | ٠,٠٠٠٨٨٤ | 3.126 |
| ١٥٤٩,٤ | ٠,٠٠٠١٤٣ | ٣,٦١٥ | ١٥٤٩,٤ | ٠,٠٠٠٩٧٦ | ٣,٠٩ |
| ١٥٤٩,٨ | ٠,٠٠٠٢٢٩ | ٣,٤٩ | ١٥٤٩,٨ | ٠,٠٠٠٢٨٩ | ٢,٧٥ |
| 1550.2 | ٠,٠٠٠١٣٢ | ٣,٦٣ | 1550.2 | ٠,٠٠١ | ٣,٠٨ |

من أجل استطاعة دخل -30dBm و -20dBm كان التشوه في المخطط العيني كبير بسبب ضجيج ASE نتج عنه عامل أداء Q معدوم، أما من أجل استطاعة دخل $-10\text{dBm}, 0\text{dBm}$ كانت قيمة العامل Q أفضل عند القناة ch1 من أجل استطاعة الدخل -10dBm ، ومن أجل استطاعة دخل ضوئية $P=0\text{dBm}$ كانت قيمة العامل Q أعلى من أجل القناتين ch1, ch4، أي أنه بزيادة استطاعة الدخل يزداد عامل الأداء Q وينخفض BER من أجل جميع الأطوال الموجية المدروسة. ويمكن الحصول على قيم Q أعلى من خلال استخدام نمط التعديل (Return to Zero) RZ [20].

وبمقارنة المخطط الطيفي: من أجل استطاعة $-30\text{dBm}, -20\text{dBm}, -10\text{dBm}, 0\text{dBm}$:

تردد استطاعة خرج مضخم EDFA ومطال المركبات الترددية الناتجة عن تأثير FWM أي يزداد تأثير FWM اللاخطي مع زيادة استطاعة الدخل الضوئية، فعندما تزداد شدة الأمواج الكهرومغناطيسية تبدي استجابة الوسط العازل (الليف الضوئي) سلوك لاخطي ومنشأ هذه اللاخطية يعود إلى الحركة الاهتزازية للالكترونات عند تطبيق حقل عالي. حيث تحدث الظواهر الكهرومغناطيسية اللاخطية بشكل أساسي نتيجة لكون استجابة الليف الضوئي تابع لاخطي لمطال كل من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي، ولذا يزداد تأثير المزج رباعي الموجات FWM مع زيادة استطاعة الدخل كما هو مبين في الشكل (7).



الشكل (7) يبين الطيف الترددي للإشارة الناتجة على خرج مضخم EDFA من أجل قيم مختلفة لاستطاعة الدخل

الجدول (3) يبين خصائص الطيف الترددي للإشارة على خرج EDFA:

| استطاعة الدخل Pin[dB] | 0 | -10 | -20 | -30 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| استطاعة مركبات FWM P_{FWM} [dB] | 53 | 39 | 19 | 0 |
| استطاعة الخرج Pout[dB] | 108 | 97 | 92 | 76 |

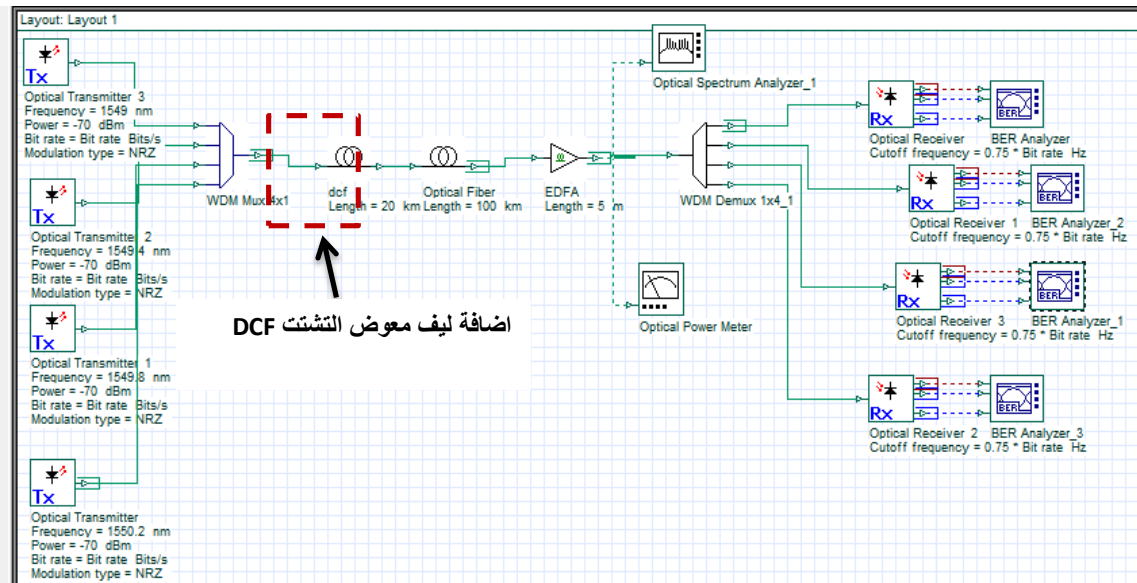
تم حساب مقدار انخفاض استطاعة الاشارات المرسله واستطاعة المركبات الترددية الناتجة عن FWM بطرح قيمة الاستطاعة العظمى من الاستطاعة الدنيا لهذه الاشارات المبينة في المخطط الطيفي في الشكل (7).

٤-٣- تأثير استخدام ليف DCF على FWM:

يتكون الليف المعوض التشتت DCF من ليف ضوئي يملك تصميم خاص حيث يكون فيه معامل التشتت سالب عندما يكون التشتت في ليف الإرسال SMF موجب. الطول المناسب للليف DCF يسمح بتعويض التشتت اللوني الناتج عن ليف الإرسال. حيث تم استخدام ليف DCF الذي يملك البارامترات التصميمية المذكورة في الجدول (4)، وتم وصله على التسلسل مع ليف الإرسال SMF المستخدم في نظام الإرسال المصمم بحيث يحقق المعادلة (4) [11,15].

الجدول (4) مواصفات ليف DCF المستخدم: [15]

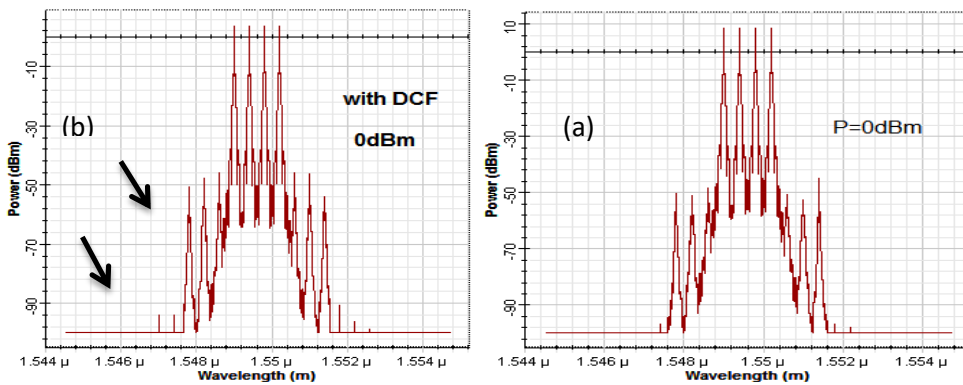
| Parameter | Unit | Description |
|--------------------------------|-----------|----------------------|
| D=-80 | ps/nm.km | عامل تشتت الليف |
| $\alpha = 0.4$ | dB/km | عامل التخميد (الفقد) |
| $A_{eff} = 50 \times 10^{-12}$ | μm^2 | السطح الفعال للقلب |
| $\lambda = 1550$ | nm | طول الموجة |



الشكل (8) مخطط المحاكاة للنظام الضوئي DWDM يستخدم ليف DCF

٣-٣-٢ - تأثير طول ليف DCF على اداء النظام:

تمت مقارنة اداء النظام الضوئي من اجل عدة اطوال للليف DCF (5m, 20m, 30m)، وبالمقارنة بين القيم المدروسة في الحالات الثلاث تبين انه تم الحصول على افضل النتائج من اجل الطول 20km للليف DCF مقارنة مع باقي الاطوال كونه يحقق العلاقة (7)، فكانت عنده قيم معاملات الاداء $Q=3.05$, $BER=0.00102$. يبين الشكل (9) المخطط الطيفي لإشارة خرج مضخم EDFA مع وبدون استخدام ليف DCF من أجل استطاعة دخل 0dBm، حيث يزداد عدد واستطاعة مركبات FWM عند استخدامه، وذلك لان ليف DCF معوض التششت يسبب زيادة التوافق الطوري بين الاشارات أي انخفاض فرق الطور بينها، وبالتالي يزداد مردود FWM والذي يتناسب عكساً مع الفرق الطوري بين الاشارات، ولذا يزداد تأثير FWM مع تناقص تأثير التششت عند استخدام ليف DCF.

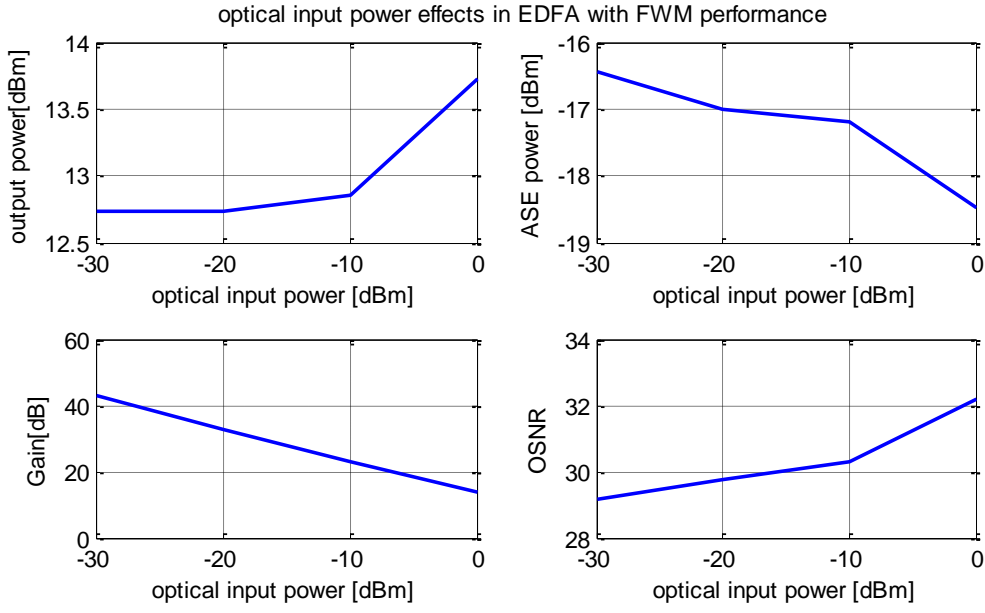


الشكل (9) يبين الطيف الترددي للإشارة المجمع بعد EDFA (a) دون استخدام DCF (b) مع استخدام DCF بطول 20km

٣-٣-٣ - دراسة تأثير استطاعة الدخل الضوئية على اداء نظام عند استخدام ليف

DCF:

عند استخدام ليف DCF بطول 20km، يزداد الريح مع تناقص استطاعة الدخل الضوئية وتتناقص نسبة استطاعة الاشارة الى الضجيج OSNR. والشكل التالي (10) يوضح النتائج التي تم الحصول عليها.



الشكل (10) يبين تأثير استطاعة على خصائص مضخم EDFA عند استخدام DCF

والمقارنة نتائج استخدام ليف DCF مع حالة عدم استخدامه اي مقارنة النتائج في الشكلين (6)، (10) يظهر تقارب في قيم الربح و OSNR في كلا الحالتين، علماً أن الربح و OSNR اعلى بمقدار طفيف في الحالة الاولى (عدم استخدام DCF) يعلل ذلك بالضجيج الذي يضيفه استخدام ليف DCF والذي يسبب انخفاض الربح ونسبة استطاعة الاشارة الى الضجيج. كما تم استنتاج قيم Q, BER من اجل قيم مختلفة لاستطاعة الدخل للإشارات الاربعة المدروسة، والتي تضمنت ضمن الجدول (5) الاتي:

الجدول (5) قيم بارامترات الاداء لخرج النظام الضوئي عند استخدام DCF:

| $P_{in} = 0dBm$ | | | $P_{in} = -10dBm$ | | |
|-----------------|------------------------|-------|-------------------|----------|-------|
| $\lambda[nm]$ | BER | Q | $\lambda[nm]$ | BER | Q |
| 1549 | 2.19×10^{-6} | 4,56 | 1549 | 0,000403 | 3,316 |
| 1549,4 | 2.818×10^{-6} | 4,518 | 1549,4 | 0,00054 | 3,24 |
| 1549,8 | 2.72×10^{-6} | 4,53 | 1549,8 | 0,00239 | 2,79 |
| 1550.2 | 1.6×10^{-6} | 4,6 | 1550.2 | 0,00104 | 3,05 |

نجد أنه بإضافة ليف DCF يبدي النظام أداء مماثل لحالة عدم استخدامه، فمثلاً عند الاستطاعات -20، -30dBm يكون التشوه كبير في المخطط العيني $Q=0$ ، بينما تكون قيم الربح وOSNR اعظمية. ويتناقص أيضاً العامل Q ويزداد BER مع تناقص استطاعة الدخل.

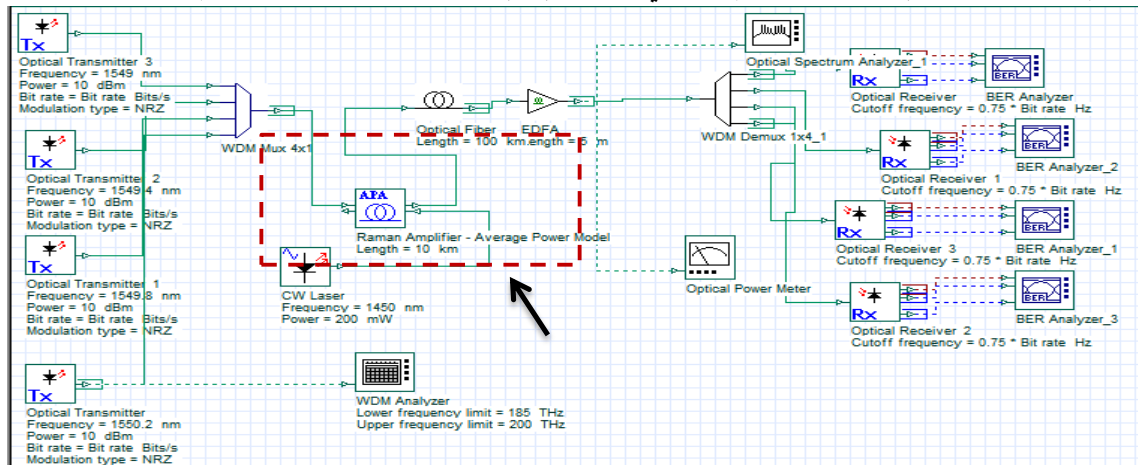
كما نجد ان استخدام DCF يسبب زيادة عامل الاداء Q من 3.126 الى 3.316 مقارنة مع حالة عدم استخدامه يرافقه تناقص في معدل خطأ البت وذلك نتيجة الحد من تأثير التشتت. كما نلاحظ زيادة عدد استطاعة الحزم الجانبية لمركبات FWM عند استطاعة دخل -10dBm كما هو مبين في الشكل (9) بسبب تعويض التشتت الذي يسبب زيادة تأثير FWM، مع تناقص طفيف في استطاعة الاشارات الاساسية المرسله ناتج عن تخميد ليف DCF المضاف، وتكون قيمة استطاعة مركبات FWM تساوي 53dB من اجل استطاعة دخل 0dBm مماثلة لحالة استخدام ليف SMF فقط، بينما تنخفض استطاعة مركبات FWM عند استخدام ليف DCF من 19dB حتى 12dB من اجل استطاعة دخل -20dBm، لتتعدم عند -30dBm في كلا الحالتين.

الجدول (٦) يبين خصائص الطيف الترددي للإشارة على خرج EDFA عند استخدام DCF:

| استطاعة الدخل Pin[dB] | ٠ | -10 | -20 | -30 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| استطاعة مركبات FWM P_{FWM} [dB] | ٥٣ | ٤١ | ١٢ | ٠ |
| استطاعة الخرج Pout[dB] | ١٠٢ | ٩٥ | ٨٤ | ٧٥ |

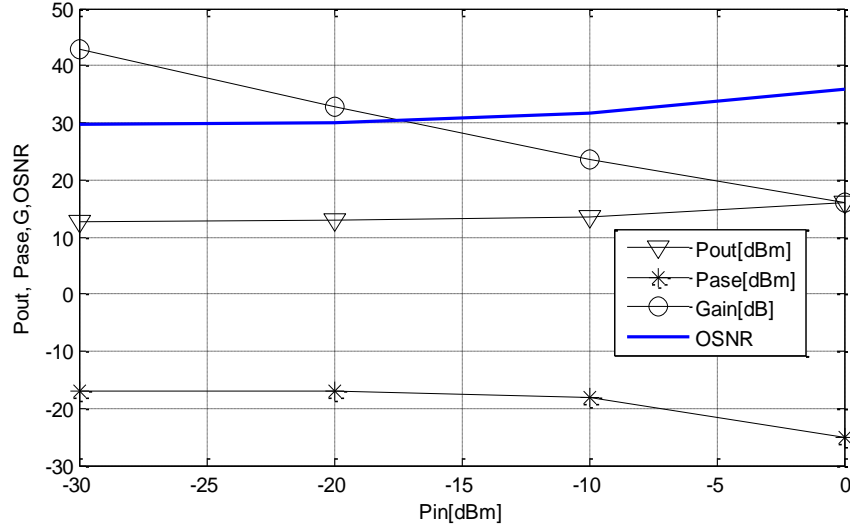
٣-٤- تأثير استخدام التضخيم الهجين (مضخم رامان مع مضخم EDFA) على أداء النظام:

حالياً يعتبر التضخيم الهجين تقنية واعدة ومستخدمة بشكل واسع في الوقت الراهن من اجل التطبيقات عريضة الحزمة عالية السرعة لتحسين أداء النظام دون استخدام تقنيات مكلفة، لذا تم دراسة تأثير استخدام التضخيم الهجين (مضخم رامان + EDFA) على أداء النظام الضوئي والشكل (11) يبين مخطط المحاكاة المصمم.



الشكل (11) مخطط المحاكاة للنظام الضوئي DWDM يستخدم تضخيم مختلط

باستخدام التضخيم الهجين (مضخم رامان + EDFA) يتناقص مطال المركبات الجانبية الناتجة عن FWM أي يتناقص تأثير FWM وهذا ناتج عن زيادة التشتت عند اضافة مضخم رامان على التسلسل مع مضخم EDFA وما يسببه من زيادة الفرق الطوري بين الاشارات المنتشرة معاً وبالتالي تناقص تأثير FWM.



الشكل (١٢) تأثير استطاعة الدخل على خصائص المضخم في حالة التضخيم الهجين

أيضاً تزداد قيمة الربح ونسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج OSNR بسبب زيادة استطاعة الخرج الناتجة عن ربح مضخم رامان المضاف، وتتناقص قيم العامل Q ويزداد معدل خطأ البت BER عند الاستطاعات - 0dBm, 10dBm بالمقارنة مع حالة استخدام التضخيم بمضخم EDFA فقط نتيجة تأثير ضجيج مضخم رامان المضاف كما هو مبين في الشكل (12).

الجدول (٧) قيم بارامترات الاداء لخرج النظام الضوئي عند استخدام التضخيم الهجين

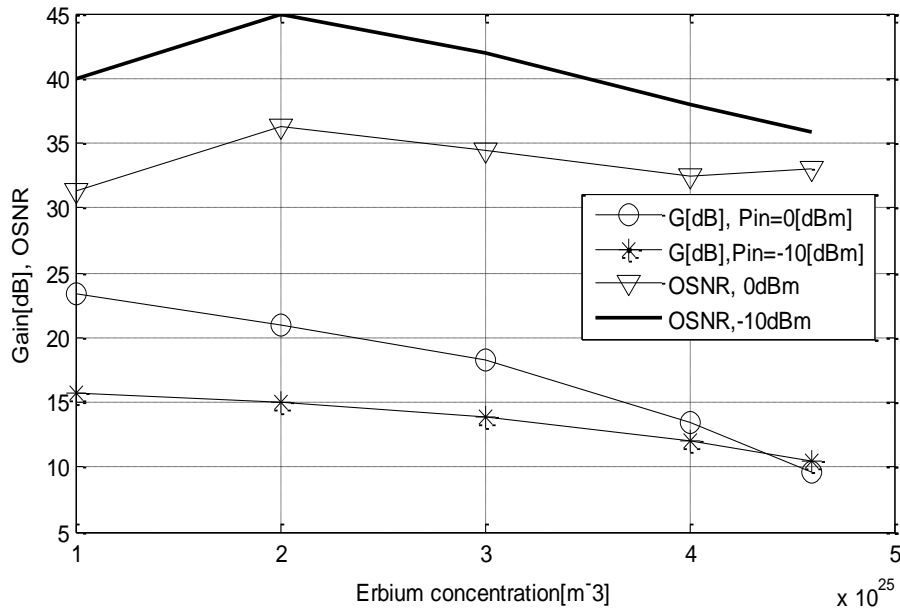
| $P_{in} = 0dBm$ | | | $P_{in} = -10dBm$ | | |
|-----------------|----------|------|-------------------|----------|------|
| $\lambda[nm]$ | BER | Q | $\lambda[nm]$ | BER | Q |
| 1549 | 0,000174 | 3,56 | 1549 | 0,00115 | 3,04 |
| 1549,4 | 0,00136 | 3,62 | 1549,4 | 0,00067 | 3,2 |
| 1549,8 | 0,000148 | 3,6 | 1549,8 | 0,000896 | 3,1 |
| 1550.2 | 0,000116 | 3,66 | 1550.2 | 0,00055 | 3,2 |

وعند استطاعة دخل اقل من -10dBm يحدث تشوه كبير في المخطط العيني وتتنقص قيمة العامل Q.

٣-٥ - دراسة تأثير تركيز ايونات الارييوم على أداء النظام:

تم اجراء محاكاة باستخدام نموذج المحاكاة السابق في الشكل (٥) مع الاخذ بالاعتبار المواصفات المذكورة في الجدول (١) من اجل عدة قيم لتركيز ايونات الارييوم، وجدنا انه بزيادة التركيز من $10^{24}[m^{-3}]$ الى $N = 10^{25}[m^{-3}]$ يزداد عامل الاداء من $Q=3.24$ الى $Q=3.66$ من اجل استطاعة دخل 0dBm، كما يزداد مطال الحزم الجانبية ل FWM، وذلك لأنه بزيادة تركيز ايونات الارييوم يزداد الربح نتيجة زيادة عدد الايونات المثارة والتي تساهم في عملية الانبعاث المحثوث، وهذا بدوره يزيد من استطاعة الإشارة المرسله الخاضعة للتضخيم ويسبب زيادة تأثير FWM.

أيضاً تمت دراسة الاداء عند التراكيز $10^{24}, 10^{25}, 2 \times 10^{25}, 3 \times 10^{25}, 4 \times 10^{25}, 4.6 \times 10^{25}$ اي تتناقص قيمة العامل Q من 3.16 حتى 2.45، ويتناقص أيضاً مطال مركبات FWM أي يتناقص تأثير التداخل.



الشكل (13) يبين قيم الربح G و OSNR الناتجة من اجل قيم مختلفة لتركيز ايونات الارييوم عند استطاعة -10dBm, 0dBm

الجدول (8) يبين قيم العامل Q الناتجة من اجل قيم مختلفة لتركيز ايونات الارييوم: من اجل استطاعة -10dBm

| $N[m^{-3}]$ | 10^{25} | 2×10^{25} | 3×10^{25} | 4×10^{25} | 4.6×10^{25} |
|-------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Q | 3,16 | 3,13 | 3,13 | 3,11 | 2,45 |
| BER | 0,00088 | 0,00096 | 0,00094 | 0,00094 | 0,0066 |

من اجل استطاعة 0dBm

| $N[m^{-3}]$ | 10^{25} | 2×10^{25} | 3×10^{25} | 4×10^{25} | 4.6×10^{25} |
|-------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Q | 3,66 | 3,661 | 3,66 | 3,65 | 3,65 |
| BER | 0,000119 | 0,000121 | 0,000121 | 0,000122 | 0,000123 |

يتضح من النتائج ان قيم البارامترات Q, BER, G, OSNR المدروسة تتأثر بتركيز ايونات الارييوم من اجل استطاعات دخل مختلفة، حيث تم اختبار عدة قيم لتركيز الايونات اعتباراً من القيمة المرجعية $10^{25}[m^{-3}]$ وقيم ادنى واعلى منها، حيث تناقص عامل الاداء Q مع زيادة التركيز N أعلى من $10^{25}[m^{-3}]$ ، كما تناقص كل من الربح G و OSNR عندما ازداد التركيز فوق القيمة $10^{25}[m^{-3}]$ ، وبزيادة التركيز اعلى من 4.6×10^{25} نتج تشوه كبير في المخطط العيني وانعدام العامل Q، أي إنه يجب اختيار قيمة تركيز ايونات الارييوم بدقة للحصول على اداء وريح مقبولين.

الاستنتاجات والتوصيات:

- ١-إن زيادة استطاعة الدخل الضوئية تؤدي الى زيادة OSNR لكن تسبب تناقص ربح المضخم ينتج عنها أيضاً زيادة في عامل الاداء Q وتناقص في معدل خطأ البت، كما تسبب زيادة في عدد واستطاعة مركبات FWM أي تزيد من تأثيرها.
- ٢-إن استخدام ليف معوض التشنت DCF يوصل قبل ليف الارسال SMF يسبب زيادة في عدد ومطال مركبات FWM، كما تزداد قيمة عامل الاداء Q ويبقى الربح و OSNR مماثلاً لحالة عدم استخدامه.
- ٣-باستخدام التضخيم الهجين (مضخم رامان / EDFA) ازداد الربح و OSNR وتناقصت استطاعة المركبات الجانبية FWM، لكن تناقصت قيمة العامل Q.
- ٤-تزداد قيمة العامل Q مع زيادة تركيز الاربوم حتى القيمة 10^{-25} حيث لا يحدث ربح عند قيمة تركيز أقل منها، كما يتناقص الربح و OSNR والعامل Q مع زيادة تركيز الاربوم فوق 10^{-25} .
- ٥-يمكن دراسة اداء نظام ضوئي يستخدم EDFA مع الاخذ بالاعتبار كل التأثيرات اللاخطية ضمن الليف الضوئي.

المراجع:

- [1] BAYVEL P. 2002, *Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission. In: Optical Fiber Communications*. Elsevier Science (USA), United Kingdom, 611-641.
- [2] KOSHY S. M., 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, 1700-1703.
- [3] IVANIGA T.; IVANIGA P., 2019, *Suppression of Nonlinear XPM Phenomenon by Selection of Appropriate Transmit Power Levels in the DWDM System*, International Journal of Optics, 8.
- [4] GARG, P.; VERMA, R., 2012, *Comparative analysis of self-phase modulation (SPM) and cross phase modulation (CPM)*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering, Vol. 1, Issue 3, 6.
- [5] MAYROCK M., 2010, *Analysis and Compensation of Non-linear Signal Distortion in Optical OFDM*. Friedrich-Alexander-Universitat, 5.
- [6] BASS M.; DECUSATIS C.; STRYLAND E., 2002, *Fiber Optics Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill Companies. United States of America, 398.
- [7] CHUNG Y.C.; 2001, *Performance Limitation of Hybrid WDM Systems Due To Stimulated Raman Scattering*. Photonic Technology Letters, Vol.13, No.10, 1118-1120.
- [8] COEN S.; EMPILT P. 2005, *Coupled-Mode Analysis of Stimulated Raman Scattering and Four-Wave Mixing in Wavelength Division Multiplexing Systems*. Optical Communication, 250, 191-201.
- [9] AMIT KUMAR, G.; KUMAR, M. V. 2015, *Simulation Analysis of Four Wave Mixing Effect in WDM Optical System*, International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME), Vol.3 Issue.7, 50-53.
- [10] KUMAR, S.; SHARMA, D., 2018, *Analyzing EDFA Performance using different Pumping Techniques*, International Journal of Computer Sciences and Engineering, Vol. 6, Issue-5, 195-202.
- [11] GOEL, A. K.; SINGH, N. 2016, *Analysis of Four Wave Mixing Effect at Different Channel Spacing in DWDM Systems Using EDFA with Single Pump Source*. An International Journal of Engineering Sciences, Vol. 17, 382-389.

[12] ANU SH.; KAUR, R. SINGH, H. 2016, *Analysis of 8 x 10 GB/s WDM System using Hybrid Amplifier + FBG in Presence of Fiber Nonlinearities*, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development,| Vol. 4, Issue 03, 1776-1779.

[13] MALLICK B.; PRADHAN S.; PRASAD B., 2016, *An Improved Methodology to Optimize Four Wave Mixing Effect in 32*40 Gbps DWDM Optical Systems*, International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 4, Issue 4, 6861-6868.

[14] SLAVOV, D. 2004, *Chromatic dispersion compensation in conventional single-mode fibers*. Technical University of Varna, 4.

[15] RAJASEKAR, R.; RAMACHANDRAN, R.; SENTHAMIZHSELVAN, V., 2014, *Performance Analysis of DWDM Based Fiber Optic Communication with Different Modulation Schemes and Dispersion Compensation Fiber*. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol.: 03 Issue: 03, 287-290.

[16] JAYA, V.; KABILAN T. 2017, *Performance Analysis of 48 Channels DWDM System using EDFA for Long Distance Communication*. GRD Journals- Global Research and Development Journal for Engineering, Vol. 2, Issue 3, 39-47.

[17] PAREKHAN, M., 2008, *Design Optimization for Efficient Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Science Index, Vol:2, No:10, 36-39.

[18] BANDHOPADHYA1, T. K.; SAXENA, M.; TIWARI, A. 2013, *Gain Equalization of EDFA*. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), Vol. 3, Issue 1, 21-24.

[19] KAUR, A.; SINGH, J. 2012, *Measurement of ASE in an in-line EDFA*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering (IJARCSEE), Vol. 1, Issue 7, 9.

[20] Sharma D.; Singh R. 2017, *Performance Comparison of Hybrid Optical Amplifiers with Different Modulation Formats*. International Journal of Electronics, Electrical and Computational System IJEECS, Vol. 6, Issue 11, 315-320.