حساب الكسب وعامل الضوضاء في مكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم عند الحزمة (C) للاتصالات الضوئية

م.م. محمد علي عبد الخالق النعمة
قسم العلوم
كلية التربية الأساسية / جامعة الموصل

تاريخ تسليم البحث: ٢٠١١/٩/١٢ ؛ تاريخ قبول النشر: ٢٠١١/١١/٢٤

ملخص البحث:

تمت دراسة تاثير طول مكبر الليف الضوئي المطعم بالاربيوم على كل من قيم الكسب وعامل الضوضاء ضمن الحزمة (c) في الاتصالات الضوئية، وذلك عن طريق استخدام الحاسوب في حل المعادلات التفاضلية الخاصة لكل من الكسب وعامل الضوضاء حلا عدديا وايجاد حلول عددية لمعادلات المعدل والانتشار. اظهرت الدراسة بانه عند استخدام الطول الموجي (١٤٨٠ نانوميتر) في عملية الضخ، تبين بان طول الليف الضوئي يجب ان لا يقل عن (٩ م) للحصول على كسب عالي (60 dB) وعامل الضوضاء واطئ (13- dB).

Calculation of Gain and Noise Figure of EDFA at (C) band in optical communication

Asst. Lect. Muhammed Ali Abdulkhaliq
Department of Science
College of Basic Education / Mosul University

Abstract:

We have studied the influence of Erbium Doped Fiber Amplifier length on gain and noise figure values in (c) band of optical communication network. This influence had been studied using computer simulation in solving integral equations and finding numerical solution for rate and propagation equations. The study has revealed that, using of wavelength (1480 nm) in process, the optical fiber should not be less than (9m) to get a highain (60dB) and low noise figure (-13dB).

المقدمة:

إن من أهم الاختراعات في تسعينيات القرن الماضي في مجال الاتصالات الضوئية هو مكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم (EDFA) Erbium Doped Fiber Amplifier والذي بدوره ساهم بالنتيجة في ولادة لفروع عديدة تصب في مجال عمل الشبكات والإنترنت وذلك بسبب بساطة المكبرات وسهولة تعشيقها مع الألياف الضوئية وكذلك صفاتها المثالية (الكسب العالي وقلة الضوضاء) [1]، وهي جزء مهم لا غنى عنه لتعويض الفقدان(Losses) في الليف الضوئي المستخدم في أنظمة نقل الإشارات لمسافات بعيدة [2،3].

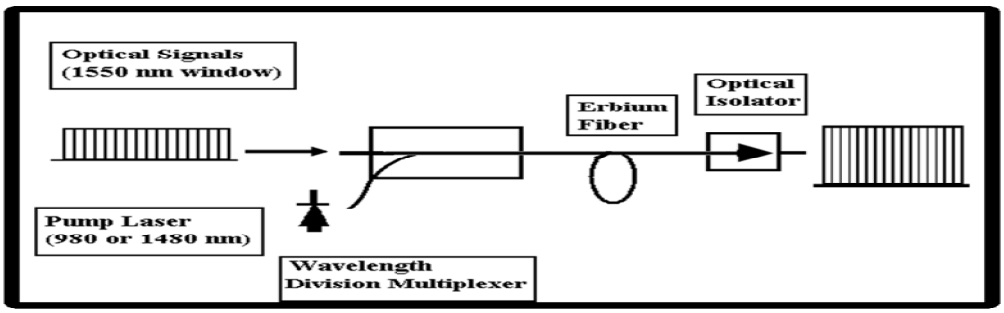
أُقترحت طرائق تكبير عديدة ومختلفة لتكبير الإشارة الضوئية ضمن الحزمة C (1530 - 1565 nm) المستخدمة في الاتصالات لتحسين كفاءة الضخ والحصول على كسب عال لوحدة الطول[8 -4].

كما جرت محاولات عديدة لتغطية أطوال موجية أعلى لتصل عند الحزمة L(1565 -1625 nm) من حزم الاتصالات وبتلازم مع طيف مستمر للكسب [9]. وهنالك عدد كبير من الدراسات النظرية والعملية قد نشرت حول اعتماد كل من قيم الكسب (gain G) وعامل الضوضاء(Noise Figure (NF على طول الليف الضوئي المطعم بالأربيوم وضمن الحزمة C [10،11]، إلا أنها لم تشر بشكل واضح وجلي إلى الحد الأدنى الذي يعمل به المكبر، ويمكن ملاحظة أكثر النتائج بأن الطول يتعدى (13m) أو أكثر. ولقد قمنا في بحثنا هذا بإيجاد حلول عددية لمعادلات المعدل (Rate equations) ومعادلات الانتشار (Propagation equations) لحساب الكسب وإيجاد عامل الضوضاء ودراسة تأثير طول مكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم على كل منهما، وتبين من هذه الدراسة وعند استخدامنا للطول الموجي 1.48µm في عملية الضخ ، أن طول الليف المكبر يجب ان يتعدى (9m) لتلافي التذبذبات أو التموجات في قدرة الإشارة المرسلة وكذلك الحصول على كسب عال وعامل ضوضاء واطئ.

النظرية:

مبدأ عمل:(EDFA):

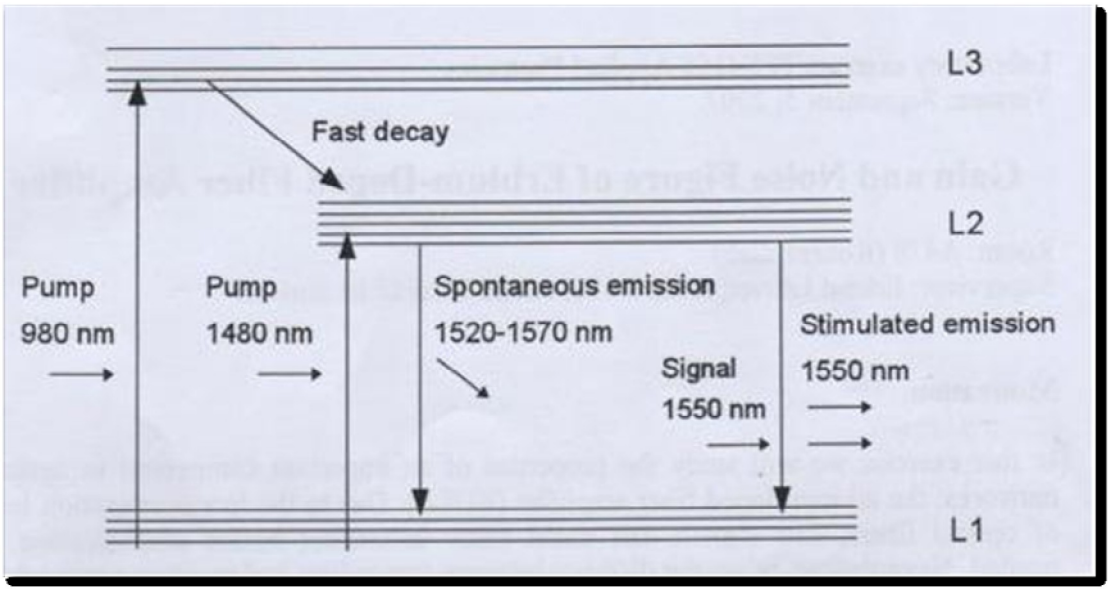
إن العناصر الأساسية لمكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم مبينة بالشكل رقم (١)، والذي يتضح منه أن وسط الكسب في المكبر مصنع خصيصاً من ليف ضوئي مطعم بعنصر الأربيوم يضخ بليزر شبه موصل ومصحوب بمزدوج لاختيار الطول الموجي ويعمل في الوقت نفسه على تجميع ضوء الليزر الضاخ و الإشارة المرسلة .



شكل رقم (١) شكل تخطيطي لمكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم [12].

علماً بأن الضوء الضاخ إما أن يتم في اتجاه الإشارة نفسه أو في اتجاه معاكس لها أو بكليهما معاً هذا فضلا عن وجود عازل بصري لمنع التذبذب الذي ينتج عنه زيادة في الضوضاء نتيجة الانعكاسات غير المرغوبة في المنظومة [12]. ومن اجل تهييج أيونات (Er^{+3}) يتم ضخ الليف بواسطة شعاع من الضوء فأذا كان الضخ عند الطول الموجي 980nm فأن(Er^{+3}) سوف يتهيج من المستوى الأرضي (L1) الى مستوى أعلى (L3) كما مبين في الشكل(٢)، وان الأيونات سوف تضمحل بسرعة الى المستوى(L2) بدون توليد فوتونات وذلك لأن زمن العمر في المستوى(L3) 1µsec تقريباً.

أما اذا تم الضخ بواسطة ضوء طول موجته 1480nm فأن الأيونات سوف تهيج مباشرةً الى المستوى(L2) وان الأضمحلال من (L2) الى(L1) سوف يحدث بعد مضي 10msec منتجاً فوتونات عند حزمة من الأطوال الموجية nm (1570 - 1520) وهذا مايسمى بالأنبعاث التلقائي [1].



شكل رقم (٢) مستويات الطاقة لأيون الاربيوم في مكبر الليف الضوئي المطعم [1]

عند إرسال إشارة معلومات بطول موجي بين nm(1570– 1520) الى الليف الضوئي فأن هنالك ثلاثة احتمالات يمكن أن تحدث لفوتونات الإشارة [1] : -

١ - تهييج (Er^{+3}) من مستوى(L1) الى مستوى أعلى ومن ثم حصول (annihilation) في العملية وتضمحل الأيونات الى المستوى الأرضي فتكون النتيجة عبارة عن انبعاث تلقائي.

٢ - تحفيز(Er^{+3}) في المستوي (L2) للانتقال الى المستوي (L1) وإنتاج فوتون آخر بنفس الطول الموجي وبنفس اتجاه فوتون الإشارة مما يؤدي الى تكبير الإشارة الداخلة.

٣ - أن تتم عملية الضخ بدون أي تأثير على الليف الضوئي.

إن الانبعاث التلقائي ليس له علاقة ترابط بالإشارة وإنما يتم توزيعه على عرض حزمة الانتقال بين (L2) و(L1) بوصفه ضوضاء يمكن أن تنتقل في نفس اتجاه المسار أو في اتجاه معاكس له ، لذلك فمن الواضح أن الناتج من الفقرة (2) أعلاه هو السلوك المرغوب في عملية الضخ والذي يمكن الحصول عليه من ضخ الليف الضوئي وحصول عملية الانقلاب المعكوس.

إن الانبعاث التلقائي موجود ويعاني دائماً تكبيرا (كما الإشارة التي تمر عبر الليف) لذلك يطلق عليه انبعاث تلقائي مكبراً(ASE) Amplified Spontaneous Emission علما بأن مستوي ASE لا يعتمد على الإشارة ذات القدرة الضعيفة بينما تزداد قيمته عند الإشارة ذات القدرة العالية مما يؤدي الى استنزاف الانقلاب العكسي أسرع من عملية الضخ المعول عليها[1] . كما أن قيمة الكسب في المكبر محدد بحقيقة كون عدد أيونات الأربيوم في الليف محدد أيضاً ، فبزيادة قدرة الضخ فوق النقطة التي عندها تتهيج كل الأيونات لا يمكن الحصول على كسب إضافي بل يحدث حالة إشباع بالكسب[1].

معاملات كسب المكبر وعامل الضوضاء :

من تعريف الكسب الذي هو النسبة بين قدرة الإشارة الخارجة الـى قـدرة الإشـارة الداخلة

$$G = \frac{P_s\ out}{P_s\ in} \quad \text{.....} \quad (١)$$

وارتباطه بمعامل الكسب (g (Z) الذي يتغير على طول الليف الضوئي المطعـم) فـأن اعتماد معامل الكسب علىZ يزداد بسبب نضوب الضخ وحصول إشباع بالكسب[12] :

$$G = exp\left(\int_0^l g(z)\,dz\right) \text{.....} \quad (٢)$$

كما أن معامل الكسب يمثل أيضاً مقياس للنمو الموضعي للقدرة الضوئية P(Z) وحـسب العلاقة التالية [12].

$$g(z) = \frac{1}{p(z)}\frac{dp(z)}{dz} = \rho\Gamma\left(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1\right) = \frac{g_0}{\left(1+\frac{P_s}{P_{sat}}\right)} \quad \text{.....} \quad (٣)$$

علماً بأن N_2 و N_1 ـــــــ عدد أيونات الأيربيوم النشطة للمستويات العليا والدنيا.

ρ ـــــــ كثافة أيون الأريبيوم.

Γ ـــــــ عامل الحصر أو التقييد (Confinement factor).

وهو مقياس للتراكب بين مجال الإشارة والقلب المطعم (doped core).

σ_a ، σ_e ـــــــــــ المقـاطع العرضـية (cross-sections) للانبعـاث σ_e والامتصاص σ_a عند التردد ν .

P_{SAT} ـــــــــ قدرة الأشباع.

P_S ـــــــــ قدرة الاشارة.

فعندما تصل قدرة الإشارة الى حد الإشباع فأن الكسب سوف يقل الى نصف معامـل كـسب الإشارة الصغير(g_0) والذي له علاقة بقدرة الضخ P_p وحسب العلاقة التالية[12] :

$$g_0 = \frac{\rho\Gamma\sigma_e(P_p - P_{th})}{P_p + P_{th}\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_a}\right)} \quad \text{.....} \quad (٤)$$

التي فيها حد العتبة لقدرة الضخ (P_{th}) يعطى بالعلاقة [12] :

$$P_{th} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e}\left(\frac{h\nu_p A}{\Gamma_p \tau \sigma_p}\right) \quad \text{.....} \quad (٥)$$

فان τ ـــــ زمن عمر الانبعاث التلقائي لمستوي الطاقة العلوي.

A ـــــ مساحة قلب الليف .

h ـــــ ثابت بلانك.

والكسب يكون ذا قيمة سالبة عندما تكون قدرة الضخ أقل من P_{th} ويصل قيمته العظمى $\rho\Gamma\sigma_e$ عند قدرة ضخ عالية.

ولإيجاد عامل الضوضاء (NF) الذي هو مقياس لقيمة الضوضاء التي أضافها المضخم للإشارة الداخلة يمكن استخدام العلاقة[12] :

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad \text{.....} \qquad (٦)$$

حيث SNR ـــــ نسبة الإشارة إلى الضوضاء (Signal to noise ratio) وللانبعاث التلقائي المكبر(ASE) فأن قيمة SNR_{out} (عند خرج المضخم) أقل من SNR_{in} ، أما اذا كانت الأشارة أقوى من الضوضاء فأن (NF) يمكن كتابتها بالشكل التالي[1].

$$NF = \left(1 + \frac{2P_{ASE}}{h\upsilon\Delta\upsilon_{sp}}\right)\frac{1}{G} \quad \text{.....} \qquad (٧)$$

علماً بأن P_{ASE} ـــــ قدرة الضوضاء للانبعاث التلقائي المكبر.

$\Delta\upsilon_{sp}$ ـــــ عرض الحزمة لمكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم.

υ ـــــ تردد الضوء

ان مقدار كل من الكسب وعامل الضوضاء غالباً ما تعطى بوحدة dB أي :

$$G\ (dB) = 10\ Log_{10}\ (G) \quad \text{.....} \qquad (٨)$$

$$NF\ (dB) = 10\ Log_{10}\ (NF) \quad \text{....} \qquad (٩)$$

بسبب كون زمن عمر الأيون في المستوي الثالث 1µsec أقل بكثير من زمن عمر الأيون في المستوى الثاني فمن المعقول إهمال الكثافة العددية N_3 للمستوي الثالث مقارنة بالمستوي الثاني وتقليل نظام مستويات الطاقة الثلاثي لأيون الأربيوم وجعله نظاماً ثنائياً عندما يتم الضخ بطول موجي (1480 nm) [13] .

وبما أن معادلات المعدل والانتشار مبنية على أساس مستويات الطاقة وتوضح تأثير الامتصاص والانبعاث المحفز والتلقائي على عدد الأيونات في المستوى الأول N_1 والمستوى الثاني (شبه المستقر) N_2 فأن معادلات الانتشار تعطى بالعلاقة الاتية [13].

$$\frac{dP_p}{dz} = -\Gamma\sigma_a(\lambda_p)N_1(z)P_p \ldots\ldots\ldots \quad (١٠)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \Gamma(N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))P_s \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١١)$$

علماً بأن P_P و P_S قدرة الضخ والإشارة على التوالي.

النتائج والحسابات

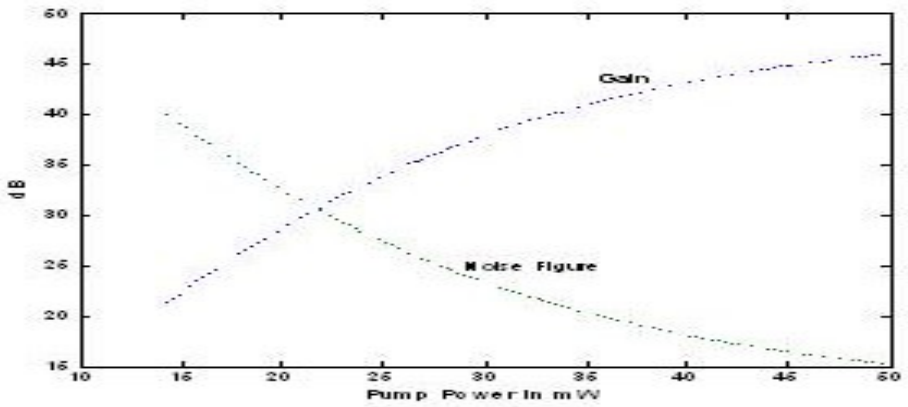
لتوضيح تأثير قدرة الضخ وطول مكبر الليف الضوئي المطعم بالأربيوم على كل من قيم الكسب وعامل الضوضاء عند الحزمة(C)، قمنا باستخدام الحاسوب بحل المعادلات المذكورة آنفا والخاصة بقيم الكسب وعامل الضوضاء (بعد التعويض عن قيم جميع الثوابت المستخدمة في المعادلات) وحسب ما مذكور بالجدول رقم(١) أدناه.

جدول رقم (١) يبين قيم الثوابت المثالية المستخدمة في حل المعادلات [14].

الثابت	الرمز	القيمة	الوحدة
- نصف قطر الليف	r	2	µm
عامل الحصر	Γ	0.4	
المقطع العرضي للامتصاص	σ_a	$2.4X10^{-25}$	m^2
المقطع العرضي للانبعاث	σ_e	$3.8X10^{-25}$	m^2
الطول الموجي الضاخ	λ_p	1480	nm
الطول الموجي للإشارة	λ_s	0٤15	nm
زمن الانبعاث التلقائي	τ	10	msec
كثافة أيون الأربيوم Er^{+3}	ρ	$1X10^{25}$	m^{-3}
قدرة الإشباع	P_{sat}	90	mW
قدرة الضخ	P_P	40	mW
عرض الحزمة لمكبر الليف الضوئي	$\Delta\upsilon_{sp}$	90	nm

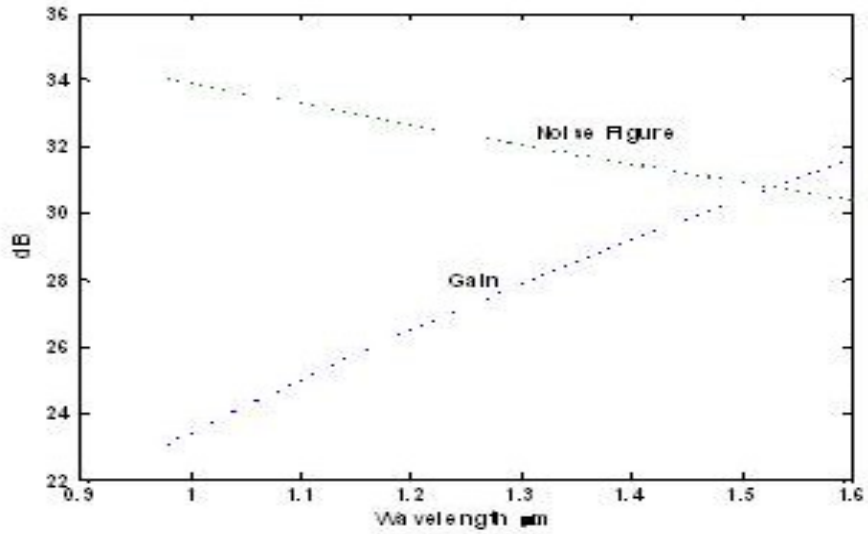
ومن ثم رسم تلك العلاقات والأشكال والتي سيتم توضيحها في أدناه :

الشكل رقم (٣) يوضح العلاقة بين الكسب وعامل الضوضاء وعند الحزمة C كدالة لقدرة الضخ، وعند طول ليف قدره (8m) وفيه قدرة الأشباع (90mw) والطول الموجي للأشارة 1540nm . كما متوقع فأن الكسب يزداد ويقل عامل الضوضاء بزيادة قدرة الضخ ويبدأ بالوصول الى حد الأشباع عند قدرة تزيد عن 50mW كما يتضح من الشكل بأنه يجب الأبتعاد عن قيمة ضخ اقل من 22mW لكون عامل الضوضاء كبيرا جداً وأكبر من الكسب وهذه النتائج تتفق مع العديد من البحوث والمقالات المنشورة في هذا المجال [14].



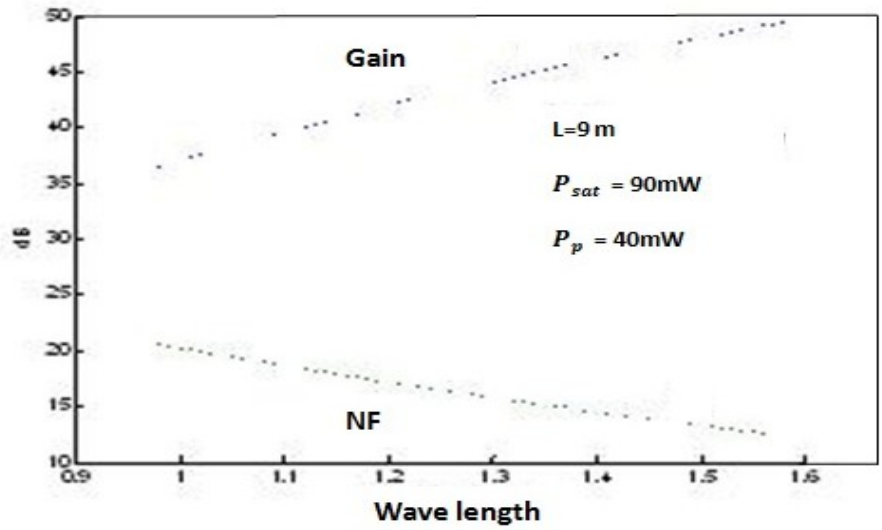
شكل رقم (٣) : العلاقة بين الكسب و عامل الضوضاء كدالة لقدرة الضخ

تم رسم الشكل رقم(٤) لبيان تأثير الطول الموجي لليزر الضخ على كل من الكسب وعامل الضوضاء عند قدرة ضخ ثابتة (40mW) وطول ليف قدره (6m) حيث يلاحظ من الشكل بأن قيمة عامل الضوضاء تكون عالية والكسب واطئ عند الأطوال الموجية دون منطقة الحزمة C (والتي يتم العمل فيها في هذا البحث) ، والذي يؤكد صحة المحاكاة النظرية للمعادلات المستخدمة.



شكل رقم (٤): العلاقة بين الكسب وعامل الضوضاء كدالة لطول موجة الضخ ولطول(6m).

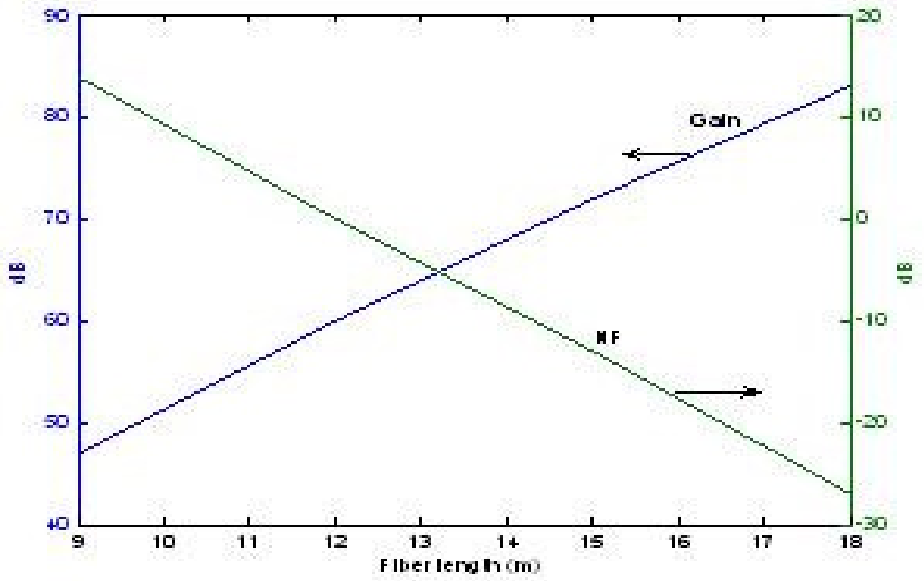
تم الحصول على اكبر كسب ممكن وأقل عامل ضوضاء عند قدرة ضـــخ (40mW) ولطـــول (9m) من خلال الرسم البياني الموضح بالشكل رقم (٥) الذي يلاحظ فيـــه بـــأن الكسب قد أزداد(في منطقة الحزمة C) أكثر من (47dB) وعامل ضوضاء (13dB).



شكل رقم (٥) : العلاقة بين الكسب وعامل الضوضاء كدالة لطول موجة الضخ ولطول(9m).

ويتبين من هذه النتائج بأن طول الليف المكبر يجب أن لا يقل عـــن (9m) ، وهـــذا ينطبق مع معظم نتائـــج البحوث المنشورة التي يكون فيه طول الليف الضوئي المكبر دائمـــاً بحدود 13m أو أكثر [15].

رسم الشكل رقم (٦) لبيان العلاقة بين الكسب وعامل الضوضاء كدالة لطول الليف الضوئي المطعم بمادة الأربيوم والذي سيعمل كمكبر عند ضخه بقدرة ثابتة (40mW) وطول موجي (1480nm) ، اذ يلاحظ أن الكسب يزداد مع الطول بينما عامل الضوضاء في حالة نقصان عند الأطوال التي تزيد عن (9m)، وعليه يمكن القول أن من الأفضل استخدام طول الليف المكبر بما يزيد عن 9m والأفضل أن يكون أكثر من (13m) ليصبح مقدار الكسب يزيد عن (60dB) وعامل الضوضاء أقل من (10dB-).

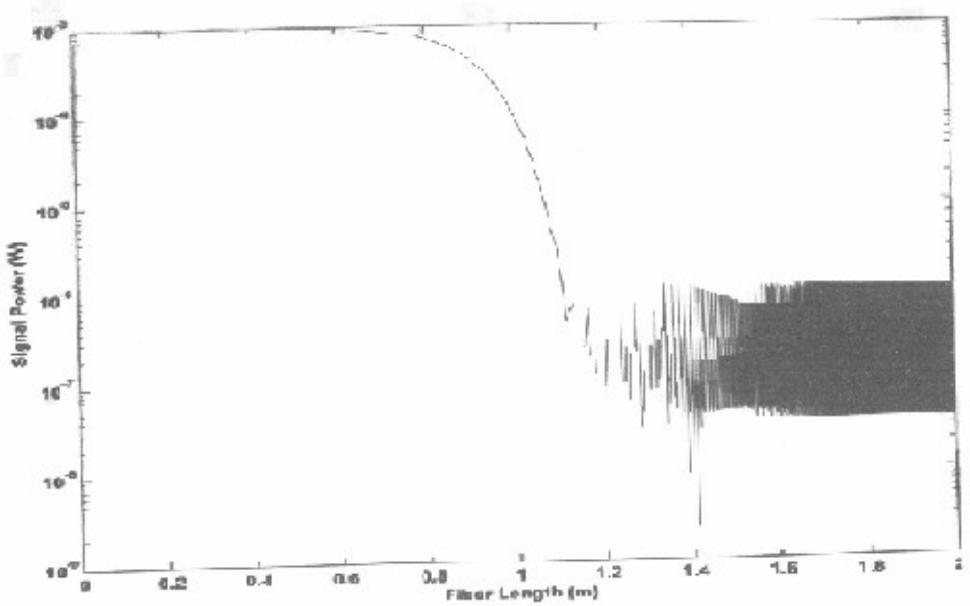


شكل رقم (٦): العلاقة بين الكسب وعامل الضوضاء كدالة لطول الليف الضوئي المكبر

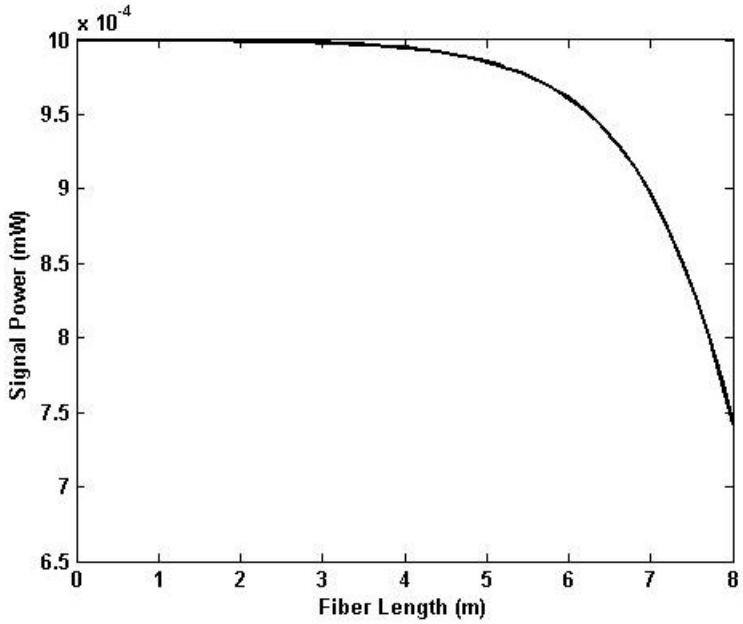
تم حل معادلات الانتشار(١٠ و١١) عدديا لإظهار تأثير طول الليف على قدرة الإشارة الداخلة الى المكبر والشكل رقم (٧) يمثل النتائج العددية لهذه المحاكاة ، ويلاحظ منه أن الإشارة الداخلة بقدرة (1mW) قد تناقصت بشكل كبير مع ظهور تذبذبات (fluctuations) عند طول مكبر(1m) وتلاشت هذه القدرة الى أقل من(1µ W).

حُلت المعادلات مرة أخرى ولنفس العلاقة السابقة ولكن طول المكبر يمتد الى (8m) وكما موضح بالشكل رقم (٨) والذي يتضح منه أن قدرة الإشارة الخارجة من المكبر والبالغة (1mW) أصبحت بحدود (0.75mW) وهي لاتمثل الحالة المثالية التي نحن بصددها ولكن فقط لبيان أن الأطوال الصغيرة من الليف تولد ذبذبات كثيرة في الخرج مما يستدعي التركيز على الأطوال التي تزيد على (8m) . إن هذه الذبذبات التي ظهرت في طيف الإشارة الخارجة ليست ناشئة من (ASE) بل هي تذبذبات أو ضوضاء مُتأصلة في مادة

الليف المطعم بمادة الأربيبيـــوم والتي تجعل القدرة تتناقص بشكل كبير مسببةً قصور في نقل الإشارة الى مسافات بعيدة .



شكل رقم (٧) : يمثل العلاقة بين قدرة الأشارة الداخلة الى المكبر وطول الليف الضوئي لايتجاوز2M



شكل رقم(٨) : يمثل العلاقة بين قدرة الإشارة الداخلة الى المكبر وطول الليف الضوئي يمتد الى 8M

الاستنتاجات

أظهرت هذه الدراسة العديد من الاستنتاجات من أهمها :

عندما يكون طول موجة الإشارة المنتقلة خلال الليف الضوئي الأحادي النمط ضمن الحزمة (C) فأن قدرة الأشباع للمكبر الضوئي المقترن مع الليف تصل الى (50 mW) .

عند استخدام طول موجي للضخ (١٤٨٠ nm) وقدرة ضخ (40 mW) يمكننا الحصول على كسب يزيد عن (60dB) وعامل ضوضاء أقل من (10dB-) بشرط أن لا يقل طول المكبر عن (9m).

بينت المحاكاة النظرية لمعادلات المعدل وجود تذبذبات (Fluctuations) عند استخدام أطوال صغيرة لمكبر الليف EDFA بطول (2m).

المصادر:

1) P.C Becker , N.A.Olsson,J.R.Simpson : Erbium-Doped Fiber Amplifiers; Fundamentals and Technology,Academic Press,San Diego,1999.
2) Y.Sun,A.K.Srivastava,J.Zhou and J.W.Sulhoff, "Optical fiber amplifiers for WDM optical networks",Bell Labs Tech.J.,VOL. 4,pp. 187-206,1999.
3) M.N.Islam,"Raman amplifier for tele communications", IEEE ,VOL 8,2002.
4) M.A. Mahdi, F.R.M Adikan , S.Selvakennedy, W.Y. Chan, "Long wavelength EDFA gain enhancement through 1550nm band signal injection" Optics Comm.,VOL.176,pp.125-129, 2000.
5) Y.Zhang,X.Liu,J. Peng, X. Feng, W.Zhang, "Wavelength and power dependence of injected C-band laser on pump conversion efficiency of L-band EDFA",IEEE Photon. Technol.Lett.,VOL. 14,pp.290-292, 2002.
6) C.Jiang,W.Hu, Q.Zeng ,S.Xiao ,"Novel split-band erbium doped fiber amplifier",Optics and Laser Technol,VOL.35,pp.251-256,2003.
7) H. Chen, M. Leblanc , G.W. Schinn," Gain enhanced L-band optical fiber amplifiers and tunable fiber lasers with erbium doped fibers ", Opt.Commun.,VOL.216,pp.119-125,2003.
8) A.Altuncu, A.Başgümüş, M.A. Ebeoğlu, " Gain enhancement in L band loop EDFA through C band signal injection", IEEE Photon.Technol.Letters.2005.
9) F.A. Flood,"L-band erbium doped fiber amplifiers",Tech. Digest OAA99,1999.

10) E.Desurvire, Erbium-doped fiber amplifier principles and application, New York: Wiley,1994.
11) C.R.Giles and E.Desurvire."Modeling erbium doped fiber amplifiers". IEEE J.Light Wave Technol.VOL 9, pp. 271, 1991.
12) A.K.Dutta, WDM Technologies Passive Optical Components, Academic Press, VOL2 ,USA, 2006 .
13) A.Yariv, Photonics . Optical Electronics in Moderen Communications ,6th Edition,Oxford University Press ,USA,2007.
14) A.c.Okrak,A.Altuncu ," Gain and Noise Figure Performance of Erbium Doped Fiber Amlifieres ". Journal of Electrical and Electronics Engineering.VOL4 , pp.1111-1122 , 2004.
15) A.A.Rieznik,W.A.Aremano,G.S.Wiederhecker, " Gain and Noise Figure Dependence on the fiber length",IEEE,pp115-120, 2003 .

This document was created with Win2PDF available at http://www.daneprairie.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.