تحليل تأثير ضوضاء الطور على عرض الخط الطيفي لثنائيات الليزر المستخدمة في منظومات الاتصالات البصرية

رنا أسامة مهدي

قسم العلوم التطبيقية ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ، العراق

(تاريخ الاستلام: 26 / 4 / 2012 ---- تاريخ القبول: 16 / 9 / 2012)

الملخص

في هذا البحث ، جرى تقديم نتائج تحليل تأثير ضوضاء الطور على عرض الخط الطيفي لثنائيات الليزر المستخدمة في منظومات الاتصالات البصرية والعوامل التي تحدد تأثير هذا النوع من الضوضاء. جرى أخذ عدد من العوامل بنظر الاعتبار وأهمها معدل الانبعاث التلقائي والعدد الكلي للفوتونات داخل حجرة الليزر ومعامل اتساع الخط الطيفي وبيان تأثير كل منها في عرض الخط الطيفي الناتج. تعد هذه النتائج محاولة لبلوغ ظروف التشغيل المثلى والسيطرة على معاملات تصميم أجزاء المرسلة في منظومات الاتصالات البصرية.

المقدمة

تعد ليزرات أشباه الموصلات منفردة النمط (Single mode) العاملة عند الأطوال الموجية تحت الحمراء (وخاصة الطولين الموجيين 1300nm و 1550nm) مصادر ضوئية مثالية لمنظومات الاتصالات البصرية (Optical communications) ومنظومات مضاعفة الطول الموجي (WDM) بسبب كلفة تصنيعها الواطئة وا ٍمكانية تصنيعها على شكل مصفوفات نقطية صغيرة الحجم وكذلك إمكانية التحكم بمواصفاتها بشكل جيد نسبياً .[1]

يمكن أن تنتج الضوضاء في منظومات الاتصالات البصرية من كل من المرسلة (Transmitter) والمستلمة (Receiver) ، فبالإضافة إلى الضوضاء الحرارية (Thermal noise) التي تحدث في أية منظومة تحتوي دوائر إلكترونية فإن هنالك ضوضاء الطور (Phase noise) وضوضاء الشدة النسبية (RIN) وضوضاء تجزئة النمط (MPN) ومصدر هذه الأنواع الثلاثة هي المصادر الضوئية في منظومة الإرسال. هنالك ضوضاء القذف (Shot noise) وضوضاء الانهيار (Avalanche gain noise) التي تنشأ عن استخدام الكو اشف الضوئية في منظومة الاستلام [2,3]. في منظومات الاتصالات البصرية الحديثة ، تظهر أنواع أخرى من الضوضاء. عندما يتم استخدام عناصر التضخيم البصرية (Optical amplifiers) للتغلب على خسائر القدرة فإن هذه العناصر تصبح مصدراً لضوضاء الانبعاث التلقائي المضخم (ASE) التي تظهر في الإشارة المضخمة [4].

تنشأ ضوضاء الطور عن حالات الانبعاث التلقائي العشوائية في ثنائي الليزر. على فرض عدم حدوث الانبعاث التلقائي ، فإن طيف الحزمة الضوئية الخارجة يتألف من دوال تعرف بدوال دلتا - (functions) وكل دالة من هذه الدوال (- $_i$) تناظر نمط طولي عند التردد ($_i$) [5-7]. أما في الحالة الحقيقية حيث يحدث الانبعاث التلقائي العشوائي فإن هذا الطيف لن يتألف من عدد من دوال دلتا وا ٍنما يتسع (Broaden) ليتألف من عدد من الخطوط المحددة التي تتمركز حول كل تردد ($_i$) [8-9].

في هذا البحث، تم دراسة تأثير ضوضاء الطور على اتساع الخط الطيفي المنبعث من ثنائيات الليزر المستخدمة في منظومات الاتصالات البصرية.

التحليل

لغرض التعرف على تأثير اتساع الخط الطيفي ، نفترض موجة ضوئية مستمرة خارجة من ثنائي ليزر أحادي النمط توصف بالعلاقة الآتية [10]:

$$x(t) = e^{j[w_c t + f(t)]} = e^{jw_c t} \times y(t) \quad ....(1)$$

حيث $_c$ هو التردد المركزي للحزمة الضوئية والحد (t) يمثل ضوضاء الطور الناجمة عن الانبعاث التلقائي.

تعطى دالة الترابط الذاتي (Autocorrelation function) للعلاقة السابقة كالآتي [11-12]:

$$R_X(t) = E[x^*(t)x(t+t)] = e^{jw_c t}\, E[e^{-jf(t)} e^{-jf(t+t)}] = e^{jw_c t}\, E[e^{j\Delta f}] \quad .....(2)$$

حيث

$$\Delta f = f(t+t) - f(t) = \sum_{i=1}^{N} \Delta f_i \quad .....(3)$$

وان N يمثل عدد الانبعاثات التلقائية عبر فترة زمنية 0< . على فرض أن عدد الانبعاثات التلقائية هو k عبر فترة زمنية ، يكون

$$P(N=k) = \frac{(R_{sp}t)^k}{k!} e^{-(R_{sp}t)} \quad .....(4)$$

يمثل R_{sp} معدل الانبعاث التلقائي ووحداته (s^{-1}) فيصبح

$$R_X(t) = e^{jw_c t} \sum_{k=0}^{\infty} E[e^{j\Delta f}]^k \frac{(R_{sp}t)^k}{k!} e^{-(R_{sp}t)} = e^{jw_c t}\, e^{R_{sp}t\,(e_f - 1)} \quad .....(5)$$

حيث $e_f = E[e^{j\Delta f}]$.

عندما يكون هنالك انبعاث تلقائي ، يحدث تغير فوري بالطور $\Delta f_i^{'}$ كما موضح بالشكل (1). عندما تكون قيمة I كبيرة فإنه

$$I^{\frac{1}{2}} + e^{jf_i} = (I+\Delta I)^{\frac{1}{2}} e^{j\Delta f_i} \quad \text{.....(6a)}$$

$$\Delta f_i^{'} = \frac{\sin(f_i)}{\sqrt{I}} \quad \text{.....(6b)}$$

المعادلة (6a)توضح أن هنالك تغيراً كبيراً بالشدة عند حدوث انبعاث تلقائي واحد فقط وهذا التغير بالشدة ينتج عنه تذبذب استرخاء (Relaxation oscillation) [13]. عند تشغيل ثنائي الليزر ، يكون هنالك تذبذب في خرج الليزر وعند تسليط تيار كهربائي أكبر من تيار العتبة فإن تركيز الإلكترونات يتنامى ويبدأ الفعل الليزري ولكن هذا الفعل يستنزف تركيز الإلكترونات إلى أن يصبح تركيزها غير كافٍ لإدامة الفعل الليزري وبالتالي يتوقف الانبعاث المحفز. بعد فترة زمنية ns(5-1) في الغالب، يعمل تذبذب الاسترخاء على إعادة الشدة إلى قيمة الاستقرار I إذ تعود الإلكترونات للتنامي من جديد وتتكرر العملية إلى أن تتحقق حالة الاستقرار في الانبعاث. يوجدتغيراً إضافياً بالطور ($_i$") ينتج بسبب عملية الاسترخاء هذه وكما موضح في الشكل نفسه فان هذا التغير يعطى بالعلاقة :

$$\Delta f_i^{''} = -\frac{a_{lw}}{2I} - \frac{a_{lw}}{\sqrt{I}}\cos(f_i) \quad \text{.....(7)}$$

حيث $_{lw}$ معامل اتساع الخط الطيفي (Linewidth broadening factor) ووحداته (s^{-1}). وعليه فإن التغير الكلي بالطور يكون

$$\Delta f_i = \Delta f_i^{'} + \Delta f_i^{''} = -\frac{a_{lw}}{2I} + \frac{a_{lw}}{\sqrt{I}}[\sin(f_i) - a_{lw}\cos(f_i)] \quad \text{....(8)}$$

بما أن الدالة $_I$ تتوزع بشكل منتظم عبر الفترة [2 ,0] فيمكن أن نكتب

$$E[e^{j\Delta f}] = e^{-\frac{ja_{lw}}{2I}} E[e^{-\frac{j(\sin f_i - a_{lw}\cos f_i)}{2I}}] \approx e^{-\frac{ja_{lw}}{2I}} E[1 - \frac{(\sin f_i - a_{lw}\cos f_i)^2}{2I}]$$

$$= e^{-\frac{ja_{lw}}{2I}}[1 - \frac{1+a_{lw}^2}{4I}] \approx 1 - j\frac{a_{lw}}{2I} - \frac{1+a_{lw}^2}{4I} \quad \text{.....(9)}$$

عندما تكون الشدة I عالية فإن العلاقة (5) يمكن أن تكتب بالشكل الآتي:

$$R_X(t) = e^{jw_c t} e^{-j(a_{lw}R_{sp}/2I)t} e^{-[R_{sp}(1+a_{lw}^2)/4I]t} \quad \text{.....(10)}$$

وبما أن $R_X(t) = R_X^*(-t)$ يصبح

$$R_X(t) = e^{jw_c t} e^{-j(a_{lw}R_{sp}/2I)t} e^{-[R_{sp}(1+a_{lw}^2)/4I]|t|} = e^{j(w_j - a_{lw}R_{sp}/2I)t} e^{-|t|/t_{coh}} \quad (11)$$

حيث t_{coh} هو زمن التشاكه (Coherence time) للإشارة الخارجة ويعطى كالآتي:

$$t_{coh} = \frac{4I}{R_{sp}(1+a_{lw}^2)} \quad \text{.....(12)}$$

من العلاقة الأخيرة نلاحظ أن زمن التشاكه يتناسب مع العدد الكلي للفوتونات وبالتالي مع القدرة البصرية الخارجة ، لذلك كلما كانت القدرة البصرية الخارجة أكبر كلما كان زمن التشاكه أطول.

من خلال إجراء تحويل فوريير على المعادلة (11) من مدى الزمن (Time-domain) إلى مدى التردد (Frequency-domain) [14] نحصل على العلاقة الآتية:

$$S_X(w) = \frac{2t_{coh}}{1 + t_{coh}^2(w - w_c + a_{lw}R_{sp}/2I)^2} \quad \text{.....(13)}$$

عندما تكون قيمة الحد $\square(t)$=0 فإن الدالة $x(t)$تمتلك تردداً منفرداً وا ٍن كثافة القدرة الطيفية (PSD) له يوصف بالدالة في العلاقة (1) سابقة الذكر. أما في حالة وجود ضوضاء الطور فإن كثافة القدرة الطيفية (PSD) تعطى بالعلاقة أعلاه. إن عرض الحزمة لهذه الدالة عند أعظم قيمة لمنتصف العرض الكامل (FWHM) لها ، والذي يمثل العرض الطيفي ما بين نقطتين عند نصف قيمتيهما ، يعطى كالآتي:

$$\Delta w_{3dB} = \frac{2}{t_{coh}} = \frac{2R_{sp}}{4I}(1 + a_{lw}^2) \quad \text{.....(14)}$$

وعليه فإنه كلما كانت القدرة البصرية الخارجة أكبر كان عرض الخط الطيفي عند 3dB أضيق. إن ثنائيات الليزر ذات النمط المنفرد والمواصفات التشغيلية الجيدة يمكنها أن تعطي عرض حزمة بحدود 100kHz [15].

النتائج والمناقشة

لغرض حل المعادله (14) والحصول منها على نتائج عددية ، جرى اعتماد القيم التالية المبينة في الجدول (1) [16] للمعاملات الواردة في العلاقة لمنظومة ليزر ثنائي الوصلة منفرد التردد.

يتضح من الشكل (2) أن عرض الخط الطيفي عند 3dB يتأثر بشكل كبير بالتغير الحاصل في معدل الانبعاث التلقائي إذ يتضاعف عرض الخط الطيفي بمقدار 375% ما بين القيم الدنيا والقيم القصوى للعد الكلي للفوتونات ومعامل اتساع الخط عند معدل انبعاث تلقائي مقداره (720GHz). يتوجب إبقاء معدل الانبعاث التلقائي عند حدوده الدنيا لمنع حدوث تغير كبير في الطور مما قد يفقد الموجة الضوئية الخارجة صفة التشاكه ويمكن أن يتم ذلك من خلال تقليل زمن الضخ إلى أقل من الزمن اللازم لحدوث الانبعاث التلقائي. ومع أن هذا الإجراء ليس ممكناً بشكل تام إلا أنه بالإمكان الاعتماد على تقنيات الضخ فائقة السرعة لتحقيق القيم الدنيا المطلوبة لزمن الضخ. كذلك يتوجب استخدام التقنيات التي تسبب أقل تغير بالطور سواء عند بناء الموجة الضوئية أو عند انتقالها داخل حجرة الليزر.

يوضح الشكل (3) تغير عرض الخط الطيفي عند 3dB مع العدد الكلي للفوتونات داخل حجرة الليزر. يبدو أن عرض الخط الطيفي لا يتأثر بشكل كبير جداً بالتغير الحاصل في العدد الكلي للفوتونات إلا أن الحالة الأكثر ملائمة هي استخدام عدد أكبر من الفوتونات إذا أريد تضييق الخط الطيفي بشكل ملحوظ ولكن يصاحب هذا الإجراء

عادة مشاكل أخرى تتمثل في تعدد الأطوار المتذبذبة (MPO) والتي يضعف حدوثها التشاكه للفوتونات المتذبذبة ، كذلك قد تحدث مشاكل أخرى مثل تضخيم الانبعاث التلقائي (ASE) وظهور الفوتونات الطفيلية (Parasitic) التي تستهلك جزء من طاقة الضخ وتنتشر خارج المحور البصري لحجرة الليزر بالإضافة إلى المحدد الهندسي لمثل هذا الإجراء والذي يقتضي تقليل درجة حرارة الوسط الفعال المنتج لليزر لتجنب حالة الإفراط الحراري (Excess heating) التي يمكن أن تؤدي إلى تلف الوسط الفعال.

يوضح الشكل (4) ، تأثير معامل اتساع الخط على عرض الخط الطيفي عند قيم محددة للمعاملات الأخرى إذ يزداد عرض الخط الطيفي مع ازدياد قيمة معامل الاتساع الذي يعتمد أساساً على الانحدار في قيمة معامل انكسار الوسط الفعال لليزر والذي يتحدد بدوره بدرجة حرارة الوسط الفعال. لذلك يمكن السيطرة على تأثير معامل الاتساع على عرض الخط الطيفي من خلال التحكم الجيد بدرجة حرارة الوسط الفعال.

تظهر نتائج المعالجة الرياضية اعتمادا كبيرا لعرض الخط الطيفي عند 3dB في حالة وجود ضوضاء الطور في طيف الانبعاث لثنائي الليزر المستخدم في منظومة الاتصالات البصرية على معدل الانبعاث التلقائي للوسط الفعال المنتج لليزر.كذلك هنالكتغير ا ضئيلا عند تغير العدد الكلي للفوتونات وتغيرمعامل الاتساع. يمكن أن يعزى سبب ذلك إلى أن القيمة الدنيا لعدد الفوتونات والتي تمثل حد العتبة للخرج الليزري هي التي تؤثر بشكل كبير على عرض الخط الطيفي الناتج أما الأعداد الأكثر من هذه الفوتونات فإنها تساهم في تقليل عرض الخط الطيفي بشكل ضئيل. ان اعتماد معامل الاتساع على قيمة معامل الانكسار للوسط الفعال المنتج لليزر هو الذي يحد من تأثيره على عرض الخط الطيفي لأنه في الغالب يتم إبقاء درجة حرارة الوسط الفعال المنتج لليزر عند قيم واطئة لا يتم تجاوزه من خلال التبريد وهذا بدوره يحد من التغير في قيمة معامل الانكسار الذي يؤثر بشكل كبير على قيمة عامل الاتساع. بناء على ذلك ، فإن تغير معدل الانبعاث التلقائي يمثل العامل الأهم في الحد من ضوضاء الطور لمثل هذه المنظومات.

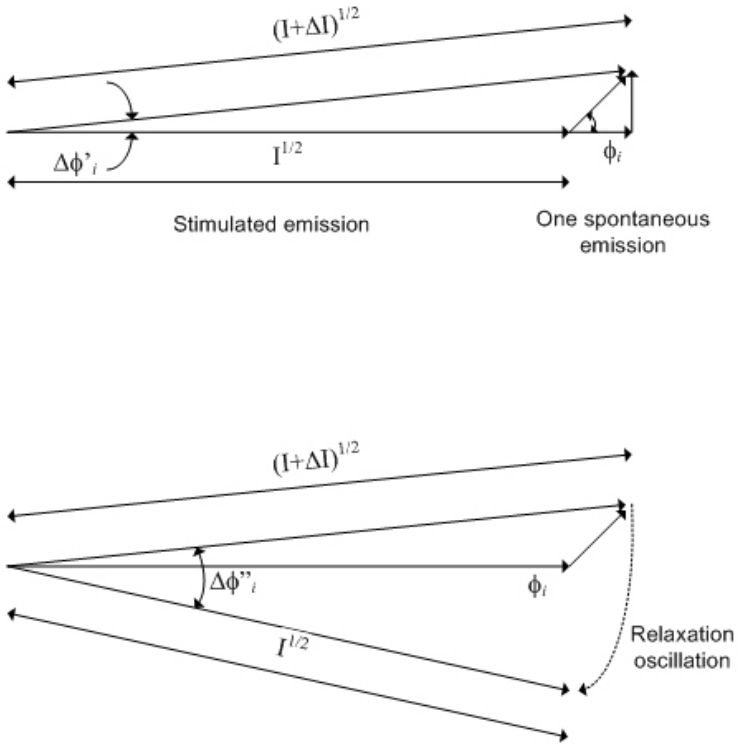
من أبرز الإجراءات الكفيلة بالتحكم بمعدل الانبعاث التلقائي هو تقليل زمن ضخ الوسط الفعال أي استخدام إشارات انسياق كهربائي قصيرة الأمد لتشغيل ثنائي الليزر وكذلك الاهتمام بالنوعية البصرية وتصميم تراكيب مثل هذه الثنائيات للحد من تأثير الانبعاث التلقائي الذي يمثل أحد أهم المشاكل البصرية المقترنة بعمل الليزرات.

الاستنتاجات

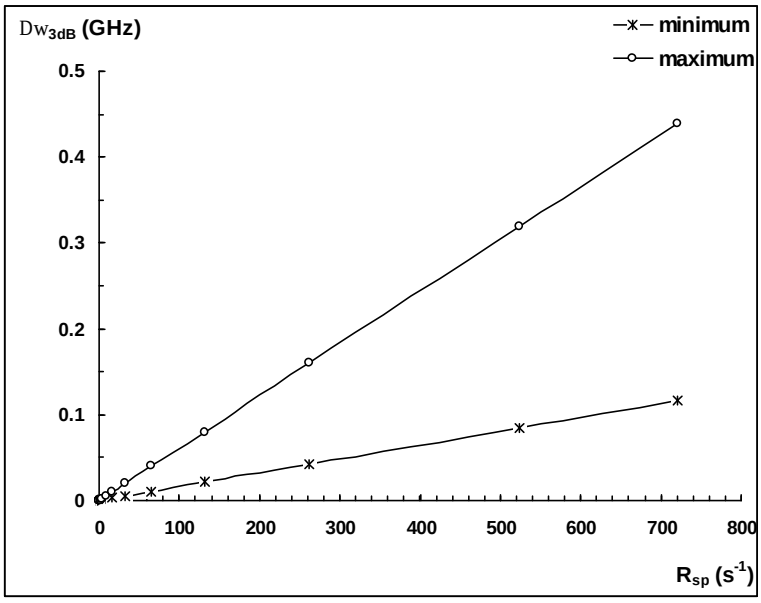
يعد تغير معدل الانبعاث التلقائي العامل الأكثر أهمية في تحديد وجود ضوضاء الطور في طيف انبعاث ثنائي الليزر المستخدم في منظومات الاتصالات البصرية إذ أنه يعمل على تحفيز أطوار أخرى تصاحب الطور الأصلي لحزمة الفوتونات المنبعثة وخروجها خارج حجرة الليزر. يمكن أن يقترن التغير في معدل الانبعاث التلقائي بتغير العدد الكلي للفوتونات وكذلك معامل اتساع الحزمة إلا أنهما يمتلكان تأثيراً أقل أهمية مقارنة بالانبعاث التلقائي. تعد ضوضاء الطور أحد مصادر الضوضاء في منظومات الاتصالات البصرية التي يتوجب الحد منها لزيادة كفاءة هذه المنظومة أكثر.

جدول (1) القيم المستخدمة لمعاملات ثنائي الليزر للحصول على النتائج العددية من العلاقة (14)

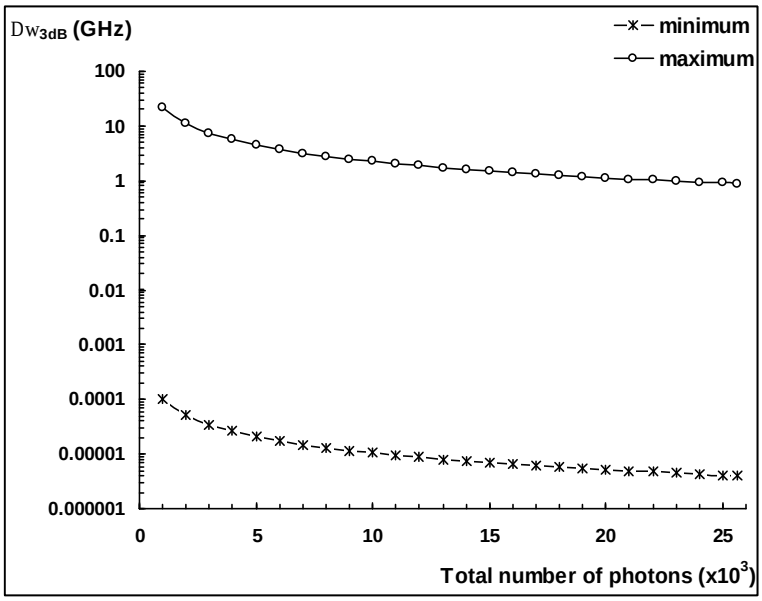
Parameter	Symbol	Value range
Total photon number	I	10^4 - 2.56x10^4 photons
Linewidth broadening factor	$\square_{lw}$	1.5 - 5.5 cm^{-1}
Spontaneous emission rate	R_{sp}	64MHz - 720 GHz



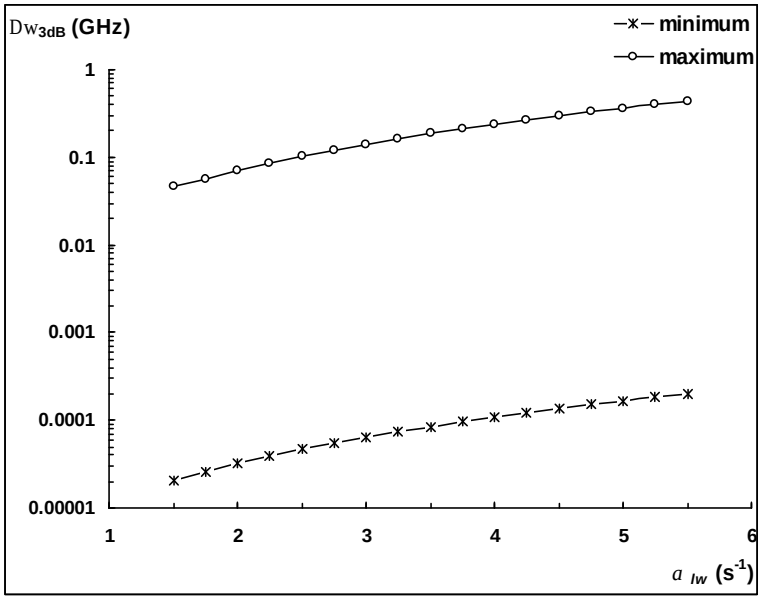
شكل (1) توضيح تأثير الانبعاث التلقائي على طور الموجة الضوئية المتذبذبة داخل حجرة الليزر



شكل (2) تغير عرض الخط الطيفي عند 3dB مع معدل الانبعاث التلقائي



شكل (3) تغير عرض الخط الطيفي عند 3dB مع العدد الكلي للفوتونات



شكل (4) تغير عرض الخط الطيفي عند 3dB مع معامل تعريض الخط

المصادر

[1] T. Katsuyama Development of semiconductor laser for optical communication sei. Technical review No.69,October 2009

[2] Intensity Noise and linewidth of laser Diodes with integrated semiconductor optical amplifier, IEEE Photonics technology letters, Vol. 14, No. 12, December 2002.

[3] A. Yariv, **"Optical Electronics in Modern Communications"**, 5th edition, Oxford University Press (NY), 1997.

[4] W. Zhang, N. Cue and K.M. Yoo, Emission linewidth of laser action in random gain media, *Opt. Lett.*, Vol.20, No.9, 1995, pp.961-963.

[5] Y. Yamamoto, T. Mukai and S. Saito, Quantum phase noise and linewidth of a semiconductor laser, *Electron. Lett.*, Vol.17, 1981, pp.327-328.

[6] K. Vahala and A. Yariv, Semiclassical theory of noise in semiconductor lasers, *IEEE J. Quntum Electron.*, Vol.QE-19, 1983, pp.1096-1099.

[7] Z. Xu, T. Cheng, Y. Yea, Y. Wang, D. Wang & J. Liu , Simultaneous erasure and rewriting of a subcarrier-multiplexed label in an all-optical label swapping scheme ,Optics Express, Vol.18,lssue 3, pp.1974-1980 (2010)

[8] O. Emile, D. Chauvat, A. Le Floch, and F. Bretenaker, Temporal behavior of an unstable optical cavity, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.1, 1999, pp.22-24.

[9] N. Kikuchi, S. Sasaki, S. Tsuji and H. Tsushima, Novel Phase Noise Cancellation Method for Optical Frequency Conversion, *Electron. Lett.*, Vol.28, No.3, 1992, pp. 266-267.
[10] A. Wax, S. Bali, and J.E. Thomas, Optical phase-space distributions for low-coherence light, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.17, 1999, pp.1188-1190.
[11] H. Shi, I. Nitta, A. Schober, P.J. Delfyett, G. Alphonse and J. Connolly, Demonstration of phase correlation in multiwavelength mode-locked semiconductor diode lasers, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.4, 1999, pp.238-240.
[12] A. Pe'er, D. Wang, A.W. Lohmann and A.A. Friesem, Optical correlation with totally incoherent light, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.21, 1999, pp.1469-1471.
[13] C. Harder, K. Vahala and A. Yariv, Measurement of the linewidth enhancement factor in semiconductor lasers, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.42, 1983, pp.328-330.
[14] M. Hyodo, N. Onodera and K.S. Abedin, Fourier synthesis of 9.6-GHz optical-pulse trains by phase locking of three continuous-wave semiconductor lasers, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.5, 1999, pp.503-505.
[15] C.H. Henry, Theory of the linewidth of the semiconductor lasers, *IEEE J. Quntum Electron.*, Vol.QE-18, No.2, 1982, pp.259-262.
[16] R.M. Williams, J.F. Kelly, J.S. Hartman and S.W. Sharpe, Kilohertz linewidth from frequency-stabilized mid-infrared quantum cascade lasers, *Opt. Lett.*, Vol.24, No.24, 1999, pp.1844-1846.

Analysis of Phase Noise Effect on the Spectral Line width of the Laser `Diodes Used in Optical Communications Systems

Rana Osama Mehdi
Department of Applied Sciences , University of Technology
(Received: 26 / 4 / 2012 ---- Accepted: 16 / 9 / 2012)

Abstract
In this work, analytical results for the effect of phase noise on the spectral line width of laser diodes used in optical communications systems and the factors determining the effect of such type of noise are presented. Three factors: spontaneous emission rate, total number of photons inside laser cavity and line width broadening factor were considered with an explanation of their effect on the spectrum of the laser output. These results are an attempt to achieve the optimum operation conditions and control design parameters of the transmitter in optical communications systems.