

المجال الديناميكي لنظام الاتصال الضوئي CATV AM/VSب المصحح خطياً

الدكتور مخائيل سليم مخول*

تاريخ الإيداع 23 / 7 / 2006 . قبل للنشر في 15/1/2007

□ الملخص □

يتضمن البحث تحليل المجال الديناميكي (Dynamic Range, Dr) كمعيارٍ جديدٍ لتقييم أداء النظام، واشتقاق العلاقة الرياضية التي تعطي كلاً من المجال الديناميكي الحر (Spurious-Free DR, SFDR)، والمجال الديناميكي الحدي (Fundamental Limit of the DR, FLDR) للنظام المدروس، ويسلط الضوء على كيفية تقليل الآثار السلبية للتشويه الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة. حيث وجدنا أنه باختيار مناسب لنقطة عمل المعدل الليزري المصحح خطياً لن يتولد لدينا مزيدٌ من التشويه غير الخطي الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة، مما يؤدي إلى تحسين أداء النظام العام. من خلال تحليلنا الرياضي والحسابي، استنتجنا أن هناك عدة طرق لتحسين الأداء العام للنظام، كإنقاص استطاعة الضجيج، التأثيرات السلبية للضجيج النسبي (Relative-to-Intensity Noise, RIN)، وإنقاص التأثيرات السلبية للتشويه غير الخطي. كما توصلنا من خلال الدراسة إلى الحقيقة العلمية الآتية:

استخدام دائرة تصحيح خطية في بنية نظام الإرسال ($1 > \delta$)، سيؤدي إلى إنقاص التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة (Inter Modulation Distortion, IMD₃)، الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة، مما يؤدي بدوره إلى زيادة المجال الديناميكي، وتحسين الأداء العام للنظام.

الكلمات المفتاحية: الكشف المترابط، المجال الديناميكي (Dr)، SFDR.

Dynamic Range of the Am/Vsb Catv Linearized System

Dr. Mikhael Salim Makhoul *

(Received 23 / 7 / 2006. Accepted 15/1/2007)

□ ABSTRACT □

Our analysis contains definition and derivation of dynamic range, and of Spurious-Free Dynamic Range (SFDR). We found that with the proper biasing of the linearized external modulator, the coherent receiver demodulates the signal without generating extra nonlinear distortion as compared with the AM/VSB external modulator coherent detection system. From our analysis, we see that there are many ways to increase the SFDR, as, decreasing of the noise power, lower relative intensity noise (RIN) lasers, and reduction of the nonlinearities.

From the computations and mathematical analysis, as a fact as, we found: that when using the linearized circuit in the AM/VSB coherent system, the IMD_3 of the external modulator will decrease, and the dynamic range of the system will increase. Thus, the total system performance will increase.

Key words: Coherent detection, Dynamic range, SFDR.

* Associate Professor, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1. المقدمة:

تسبب مجموعة من الظواهر المختلفة تدني استطاعة الإشارات أثناء انتقالها خلال مراحل نظام الاتصالات البصري. كما أن تشويه الإشارة على خرج المعدلات الليزرية يحد من سعة المعلومات المرسله في النظام، ويحد من طوله أيضاً تخامد الإشارات بسبب خسارات الليف، الاقتران، والتوزيع.

الضياعات هي أحد أهم أسباب عدم عمل نظام الاتصال بالشكل الفعال المطلوب وليست كلها، والضياعات تنتج عن الاختلاف في نصف قطر الليف، الفتحة العددية، معامل الانكسار للضوء، الانحراف الشاقولي (إزاحة محاور الألياف)، الانزياح الأفقي، الميلان الزاوي للألياف، وضياعات الانعكاس. من الناحية العملية إن معظم هذه الضياعات (عدا الضياعات الناتجة عن طريقة تركيب مكونات النظام) يمكن التنبؤ بها من خلال المواصفات الفنية للعناصر المختارة لتكوين هذا النظام، ويلعب العامل الاقتصادي دوراً مهماً في تحديد هذه المواصفات.

بديهي أن يقودنا التفكير أنه يمكن أن يسمح بحدودٍ فقط من التخامد قبل أن تصبح الاستطاعة الواصلة إلى المستقبل صغيرة لدرجة يتعذر معها كشف الإشارة بدقة. وبديهي أيضاً أن ن فكر بأن المكبرات تستطيع أن ترفع الإشارة دائماً إلى السوية المطلوبة من الاستطاعة. إلا أن الاستنتاج الأخير يكون صحيحاً إذا لم يكن التضخيم مرتبطاً بظاهرة أخرى لتشويش الإشارة، ألا وهي ما يعرف بالضجيج الحراري للمضخمات، وعلى اعتبار أنه يرافق تكبير الإشارة دائماً تكبير الضجيج بالقدر نفسه، ويسهم المكبر ذاته بضجيج إضافي لذا قد لا يعتبر استخدام المضخمات حلاً لتحسين أداء نظم الاتصالات. يخفض الضجيج بكل أشكاله من جودة الإشارة وهو موجود دائماً (الضجيج الحراري، ضجيج الإطلاق، الضجيج النسبي، ضجيج المضخمات، ضجيج الطور... إلخ)، ويقلل من جودة أداء نظام الاتصال.

هنا لا بد من التنويه إن البحث قد تم في جامعة تشرين خلال عام 2006م.

أهمية البحث وأهدافه:

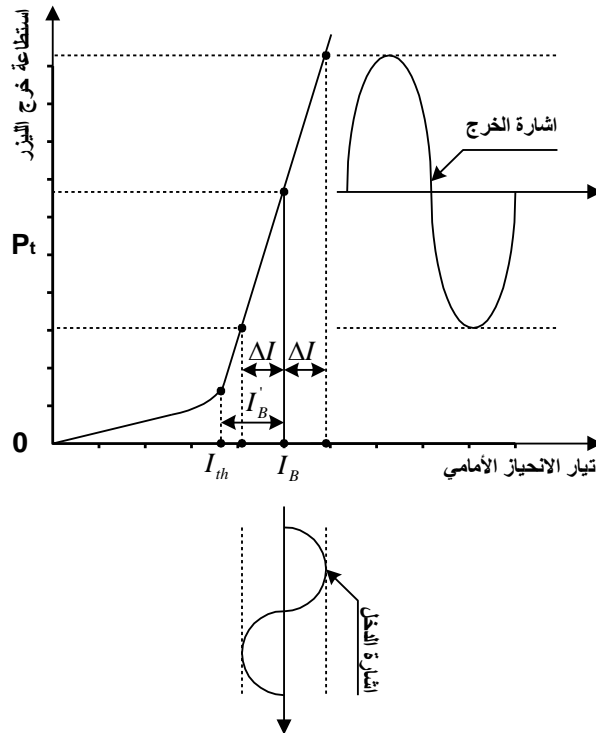
عندما تتناقص استطاعة الإشارة المستقبلية لتقارب استطاعة الضجيج تتناقص إمكانية كشفها، وعندما تتشوه بسبب عوامل مختلفة كالتعديل تتناقص إمكانية كشفها أكثر فأكثر. لذا فإن دراسة التشويه أمر مهم وهو لا يؤخذ بعين الاعتبار في العلاقات الرياضية التقليدية (Signal-to-Noise Ratio, SNR) أو (Bit Error Ratio, BER) المعنية بتقييم أداء نظم الاتصالات عامة. وبوجود كل هذه المعوقات من الضروري الحرص على وصول الإشارة إلى المستقبل دون تشويه وبمستوى استطاعة يتيح عملية الكشف. من هنا كانت القيم المختارة لعوامل النظام نابعة من هذه الحاجة.

نستخدم لتقييم جودة وأداء نظام الاتصال نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)، أو معدل خطأ البت (BER)، وهذا يعتمد على كون نظام الاتصال المدروس تمثلياً أو رقمياً. أما هنا لتقييم أداء النظام الضوئي AM/VSB فسنتبع معياراً جديداً وهو المجال الديناميكي (Dynamic Range, Dr)، وسنقوم بتقييم عمله عند استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطياً، وسنقارنه بذات النظام عند عمله بذات العوامل إذا ما استثنينا دارة تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدل الليزري المستخدم.

2. تأثير الاستجابة غير الخطية للمنابع الليزرية على عامل التعديل (m):

نعلم أن الحزم البصرية (الضوئية) التي تولدها المصادر الضوئية في الأنظمة اللييفية تقوم بحمل المعلومات، وتعتبر الثنائيات الليزرية (Laser Diode, LD) والثنائيات الباعثة للضوء (Light Emitting Diode, LED) المصادر الأكثر شيوعاً لأن أحجامها الصغيرة تتوافق مع الأقطار الصغيرة للألياف وتتوافق كذلك بنيتها المتينة ومتطلبات الطاقة البسيطة التي تعمل عليها مع الإلكترونيات الحديثة، وفي معظم الأنظمة تُحمل المعلومات على الحزمة الضوئية بواسطة تعديل مطال تيار دخل المنبع. إلا أنه من أهم مساوئ الثنائيات الليزرية هي عدم تناسب القدرة البصرية التي يولدها الثنائي الليزري خطياً مع التيار الأمامي (تيار الانحياز)، وهذا الانحراف عن الخطية يشوه الإشارة، وعندما يتطلب الأمر أن يكون التشويه صغيراً جداً يجب عندئذٍ تصحيح لا خطية استجابة المنبع الليزري المقترح للعمل في نظام الاتصال.

يبين الشكل (1.2) العلاقة بين استطاعة الخرج البصرية بتيار الدخل الأمامي لثنائي ليزري نموذجي، كما يوضح آلية التعديل التمثيلي [1, 2, 3]. في حين أن الشكل (2.2) يبين العلاقة بين قدرة الخرج البصرية بتيار الدخل الأمامي لثنائي ليزري مصحح خطياً بشكلٍ تام. حيث تتراوح استطاعة خرج الليزر بين 1mW و 10mW ويكون تيار العمل عموماً أكبر بمقدار 20mA إلى 40mA [4, 5].



الشكل (1.2) آلية التعديل التشابهي باستخدام LD غير مصحح خطياً [16].

يختلف التعديل الرقمي لثنائي ليزر عن التعديل الرقمي للثنائي الباعث للضوء، حيث يضاف تيار انحياز مستمر ليكون تيار العمل عند العتبة عندما يكون تيار الإشارة صغيراً [6, 7]. من أجل التعديل التمثيلي كما في الشكل (1.2) يحرك تيار الانحياز المستمر إلى ما وراء تيار العتبة I_{th} بحيث يكون العمل على الجزء الخطي من منحنى خواص التيار القدرة، وبذلك يجب أن نختبر بدقة خطية ثنائي الليزر إذا كان يجب استرجاع الإشارة المرسله بتشويه منخفض.

إن عامل التعديل الكهربائي m' يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية [لاحظ الشكل (1.2)]:

$$m' = \frac{\Delta I}{I_B} \quad (1.2)$$

حيث إن ΔI مقدر تأرجح التيار حول نقطة الانحياز.

العلاقة التي تربط بين عاملي التعديل البصري m والكهربائي m' هي [5]:

$$m = m' \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (2.2)$$

حيث أن τ زمن حياة الحامل، و ω التردد الزاوي.

نستنتج من تحليلنا للعلاقة (2.2)، أنه عندما يكون $\omega\tau \ll 1$ يكون $m \cong m'$ أي إن عامل التعديل

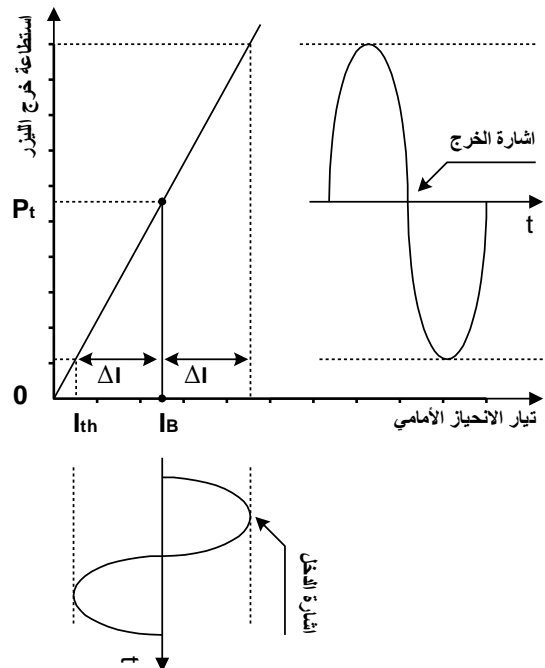
البصري يتناقص مع زيادة تردد التعديل.

يوضح الشكل (2.2) أنه عند استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطياً إن تيار الانحياز الأمامي للثنائيات

$I_B \cong I_B'$ ، وعامل التعديل تقريباً يساوي $m' \cong 100\%$ ، في حين الشكل (1.2) يوضح أن استخدام المعدلات الليزرية

في حالتها العامة (غير المصححة خطياً) إن تيار الانحياز الأمامي للثنائيات $I_B' = I_B - I_{th}$ ، وعامل التعديل في

هذه الحالة $m' \cong 25\% \div 50\%$.



الشكل (2.2) آلية التعديل التشابهي باستخدام LD مصحح خطياً بشكلٍ مثالي تام.

من أجل تقليل التشويه الناتج عن المعدل في إشارة الخرج يجب أن يكون عامل التعديل معروفاً في المنطقة

الخطية من علاقة قدرة الخرج البصرية بتيار الدخل، وإذا كانت $\Delta I > I_B'$ ، فإن عامل التعديل $m' > 100\%$ ، مما

يؤدي بدوره إلى تداخل في الإشارات، والنتيجة مزيد من التشويه. في تقنيات النظم التمثيلية إن أي جهاز غير خطي

يولد مركبات ترددية في إشارة الخرج في الأصل لم تكن موجودة في إشارة الدخل.

إذاً، إن استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطياً سيؤدي إلى زيادة عامل التعديل مما يؤدي بدوره إلى تحسن أداء النظام المستخدم لتلك المعدلات. كما هو مبين في الفقرة الآتية.

3. المجال الديناميكي (Dr):

يُعرف المجال الديناميكي (Dr) لنظام اتصال ضوئي كنسبة استطاعة الإشارة العظمى $P_{in,max}$ ذات التردد الراديوي على الاستطاعة الصغرى $P_{in,min}$ ، والتي يمكن أن ترسل عبر خط اتصال ضوئي [9, 8]، ويعبر عن ذلك بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$Dr_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{in,max}}{P_{in,min}} \right) \quad [dB] \quad (1.3)$$

بعد الأخذ بعين الاعتبار أن القيمة التربيعية لعامل التعديل تكون منسوبة إلى استطاعة إشارة التردد الراديوي، المعادلة (1.3) يمكن أن تُكتب على الشكل الآتي:

$$Dr_{dB} = 10 \log \left(\frac{m_{max}^2}{m_{min}^2} \right) \quad [dB] \quad (2.3)$$

حيث إن m_{min} و m_{max} ، هما عاملا التعديل الأعظم والأصغر اللذان يمكن للنظام أن يعمل في مجالهما. بشكلٍ آخر يمكن أن نعرف m_{min} بأنه عامل التعديل لإشارة الدخل عندما تكون نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج مساوية للواحد ($SNR=1$). في حين أن m_{max} تمثل أكبر عامل تعديل يمكن للنظام العمل عليه، وتكون m_{max} محدوداً بالتشويه (Inter Modulation Distortion, IMD) من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل. الجدير بالملاحظة أن التشويه الناتج عن عملية التعديل سوف يزداد بشكلٍ كبيرٍ نسبيٍّ عند زيادةٍ خطية بسيطة في استطاعة إشارة الدخل. بذلك أستطيع أن أعرف m_{max} بأنها عامل التعديل الذي من أجله تكون استطاعة التشويه مكافئة لاستطاعة إشارة الضجيج، عندئذٍ يمكن أن نكتب:

$$\langle i_{IMD}^2 \rangle / m_{max} = \langle i_{noise}^2 \rangle / m_{max} \quad (3.3)$$

حيث إن $\langle i_{IMD}^2 \rangle$ و $\langle i_{noise}^2 \rangle$ القيمة المتوسطة التربيعية لتيار التشويه والضجيج على التوالي على خرج المستقبل الضوئي لنظام الاتصال.

المجال الديناميكي الحر (Spurious-Free Dynamic Range, SFDR) كمعيار تغير مستوى استطاعة إشارة التردد الراديوي التي يمكن أن ترسل عبر خط اتصال ضوئي يُعرف كنسبة الاستطاعة العظمى لإشارة التردد الراديوي المحدودة بسبب التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل إلى الاستطاعة الدنيا لتلك الإشارة المحدودة باستطاعة الضجيج [8, 5]، ويعبر عن ذلك بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$SFDR_{dB} = 10 \log \left(\frac{RF \text{ Power} |_{IMD=Noise}}{RF \text{ Power} |_{Signal=Noise}} \right) \quad [dB] \quad (4.3)$$

$$= 10 \log \left(\frac{m^2 |_{IMD=Noise}}{m^2 |_{Signal=Noise}} \right) \quad [dB]$$

في حالة الخطية التامة إن عامل التعديل يمكن أن يكون أعظماً ($m_{\max}=1$)، وفي هذه الحالة سنحصل على أكبر مجال ديناميكي نظري، والذي يدعى المجال الديناميكي الأساسي الحدي (Fundamental Limit of the DR, FLDR)، والمعادلة (2.3) المعبرة عن ذلك يمكن أن نعيد كتابتها على الشكل الآتي:

$$FLDR_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{m_{\min}^2} \right) [dB] \quad (5.3)$$

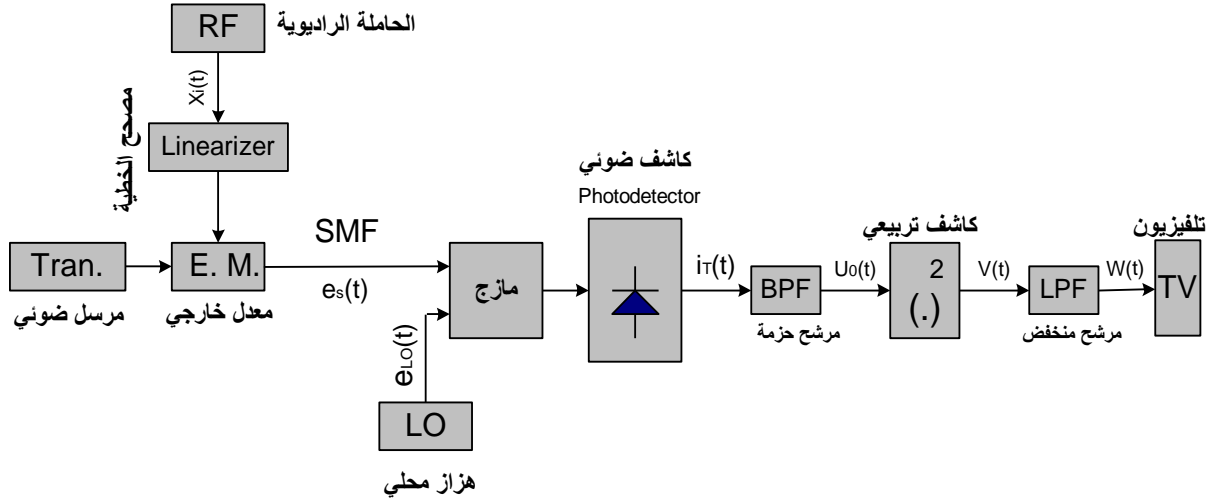
4 . بنية النظام البصري AM/VSB CATV المتلائم وتأثير المعدلات المصححة خطياً على أدائه:

يوضح الشكل (1.4) بنية كل من نظام الإرسال والاستقبال للنظام التلفزيوني الضوئي المستخدم للألياف البصرية (Cable TV, CATV) المترابط الكشف (Coherent Detection, CD) ذي مرشح الحزمة الترددي المصحح العرض، والمعدل الليزري المطالي (Amplitude Modulation Vestigial Sideband, AM/VSB) المصحح خطياً.

تُطبق الإشارة الراديوية $X_i(t)$ على مصحح الخطية بغية إنقاص التشويه الناتج عن عدم خطية عملية التعديل. والغاية الأساسية إداً من المصحح إلغاء التشويه الذي سينتج عن عملية التعديل لاحقاً [4]. يُعدل المعدل الخارجي الضوء القادم من المنبع الضوئي (المرسل) بما يتفق مع نموذج التعديل المطالي AM/VSB.

يتم إرسال إشارة خرج المعدل $e_s(t)$ وتوزيعها عبر نواقل ضوئية وحيدة النمط (Single Mode Fiber, SMF). ويتم تضخيم الإشارة المرسله عبر الناقل الضوئي قبل أو بعد عملية التوزيع على المشتركين المستثمرين.

كما هو واضح على الشكل (1.4). يقوم المستقبل باستقبال الإشارة المرسله باستخدام مرشح حزمة (Band Pass Filter, BPF)، كاشف تربيعي $(.)^2$ ، ومرشح تمرير منخفض (Low Pass Filter, LPF). إشارة الهزاز الضوئي المحلي $e_{LO}(t)$ من المفروض أن تكون ملائمة ومناسبة الطور والتردد لعملية الكشف.



الشكل (1.4) النظام الضوئي التلفزيوني المترابط المصحح خطياً AM/VSB CATV.

لدراسة المجال الديناميكي الحر نفترض أن إشارة الحاملة الراديوية (RF) تُعطى بالعلاقة [4, 9]:

$$X_i(t) = \frac{1}{2} [\cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + \cos(2\pi f_2 t + \theta_2)] \quad (1.4)$$

حيث إن f_1 ، f_2 ، θ_1 ، و θ_2 تردد والطور إشارتي الإرسال.

بضبط نقطة عمل المعدل على انحياز زاوي $\Phi=0$ ، وبالأخذ بعين الاعتبار عدم الخطية، فإن مربع إشارة

الغلاف للتيار $I_T(t)$ في مرحلة التردد المتوسط (IF) يعطى بالعلاقة الآتية [4]:

$$|I_T(t)|^2 \approx 2 A_0^2 [1 + m x(t) - \frac{m^3}{3!} x^3(t)] \quad (2.4)$$

و عند استخدام معدل ليزري خارجي مصحح خطياً المعادلة $|I_T(t)|$ تُكتب على الشكل التالي [3, 4]:

$$|I_T(t)|^2 \approx 2 A_0^2 [1 + m x(t) - \frac{\delta m^3}{3!} x^3(t)] \quad (3.4)$$

حيث إن δ عامل تصحيح الاستجابة غير الخطية للمعدل $0 < \delta < 1$ ، $A_0 = R\sqrt{2P_s P_{LO}}$ ، P_s استطاعة الإشارة المستقبلية، P_{LO} استطاعة الهزاز الليزري المحلي، و R الاستجابة للتنائي الليزري المستخدم.

من الملاحظ أنه لا وجود للتوافقيات من الدرجة الثانية في كلتا المعادلتين (2.4) و (3.4). حيث إن الحد الأول من المعادلة (3.4) يمثل المركبة المستمرة DC، في حين أن الحد الثاني من ذات المعادلة يمثل الإشارة المفيدة، بينما

الحد الثالث يمثل إشارة التشويه من الدرجة الثالثة متأثرة بعامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة، وهكذا إذاً باختيار مناسب لنقطة عمل المعدل الخارجي، فإن الكاشف المترابط سوف يكشف الإشارة

المرسلة دون أية إضافة في التشويه IMD's من الدرجة الثانية [1, 2, 3, 4, 16]، وإن التشويه من الدرجة الثالثة يمكن إنقاظه بإنفاص عامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية (δ) للمعدلات الليزرية المستخدمة في بنية نظام

الإرسال. في حين هذا غير محقق في خطوط الاتصال ذات المعدلات غير المصححة خطياً، سواء أكانت ذات

مستقبلات الكشف المباشر أو المترابطة ضوئياً (متلائمة).

إذا أخذنا بعين الاعتبار الحد الثاني من المعادلة (3.4)، وبافتراض أن القيمة المتوسطة الإحصائية $E[x^2(t)] = 1$ ، يمكن أن نحسب استطاعة الإشارة المفيدة، وذلك من العلاقة الآتية:

$$P_{c-sig} = \frac{4 A_0^4 m^2}{2} = 2m^2 A_0^4 \quad (4.4)$$

بالأخذ بعين الاعتبار الحد الثالث من المعادلة (3.4)، والمعادلة (1.4)، يمكن أن نحسب ببساطة استطاعة التوافقيات غير الخطية، على النحو الآتي [12, 13, 15]:

$$P_{S-IMD} = \frac{9}{64} \cdot \frac{\delta^2 4 A_0^4 (m^2)^3}{6^2} \quad (5.4)$$

من أجل حساب استطاعة الضجيج الإضافي $n(t)$ ، دعنا نبدأ من إشارة التيار $i_T(t)$ في مرحلة التردد المتوسط التي تكون مشوهة بالضجيج الإضافي. إن الإشارة الإجمالية للإشارة المفيدة وإشارة الضجيج على خرج مرشح التمير الحزمة (BPF) تعطى بالعلاقة الآتية:

$$U_0(t) = i_T(t) * h_{BPF}(t) = S_{BPF}(t) + n_{BPF}(t) \quad (6.4)$$

حيث إن * تشير إلى تابع الطي أو الالتفاف، $U_0(t)$ هي الإشارة المفيدة على خرج مرشح الحزمة (BPF) المكونة من الاستجابة على خرج المرشح $S_{BPF}(t)$ مضافاً إليها إشارة الضجيج $n_{BPF}(t)$ ، في حين أن حين أن $h_{BPF}(t)$ استجابة مرشح تمرير الحزمة.

و بالأخذ بعين الاعتبار أن خرج الكاشف التربيعي $v(t) = [U_0(t)]^2$ (لاحظ الشكل 1.4)، إن خرج مرشح التمير المنخفض (LPF)، وخرج خط الاتصال الضوئي $W(t)$ يعطى بالعلاقة الآتية:

$$W(t) = v(t) * h_{LPF}(t) \quad (7.4)$$

حيث إن $h_{LPF}(t)$ هي الاستجابة لمرشح التمير المنخفض (LPF).

في النتيجة نجد أن استطاعة الخرج الإجمالية تعطى بالعلاقة الآتية [10, 11, 13, 15]:

$$P_{out} = P_{c-sig} + P_{noise} \quad (8.4)$$

حيث إن P_{noise} استطاعة الضجيج الإجمالية، و P_{c-sig} استطاعة الإشارة المفيدة المرسل، والتي تعطى بالعلاقة (4.4).

بافتراض أن عامل التعديل صغير، وعرض الحزمة الترددي لإشارة التردد المتوسط (IF) مناسب، يكون عامل ضجيج الطور $\Gamma_\phi \approx 1$ ، واستطاعة ضجيج الطور يمكن إهماله $P_\phi \approx 0$ [9, 10, 11]، وعلى اعتبار أن الضجيج الإضافي أبيض غاوسي التوزيع، فإن استطاعة الضجيج الإجمالية تعطى بالعلاقة الآتية [15]:

$$P_{noise} \approx 2 \Gamma_\phi^{-1} [16 A_0^2 N(f) B_2 + 4 N(f)^2 B_2 (4 B_1 - B_2)] \quad (9.4)$$

حيث إن B_1 عرض الحزمة الترددي لمرشح تمرير الحزمة، B_2 عرض الحزمة الترددي لمرشح التمير المنخفض، Γ_ϕ عامل ضجيج الطور، و $N(f)$ الضجيج الإضافي في مجال التردد.

لأجل تحليل SFDR دعنا نبدأ من حساب عامل التعديل الأعظم (m_{max}) منسوباً إلى الاستطاعة العظمى لإشارة الدخل ذات التردد الراديوي $P_{in,max}$ والتي يمكن أن تُقل عبر خط الاتصال الضوئي. وهكذا يكون عامل التعديل الأعظمي محكوماً بالتشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل (IMD)، إذاً:

$$P_{S-IMD} = P_{noise} \quad (10.4)$$

حيث إن P_{S-IMD} استطاعة إشارة التشويه، و P_{noise} استطاعة إشارة الضجيج الإضافي.

بتعويض المعادلتين (5.4) و(9.4) في المعادلة (10.4) نحصل على العلاقة التي تعطي قيمة عامل التعديل الأعظم (m_{\max}^2) الآتية:

$$m_{\max}^2 = \frac{8 [16 A_0^2 N(f) B_2 + 4 N(f)^2 B_2 (4 B_1 - B_2)]^{1/3}}{\Gamma_{\phi}^{1/3} \delta^{2/3} (4 A_0^4)^{1/3}} \quad (11.4)$$

بالتدقيق في المعادلة (11.4) نلاحظ أن عامل التعديل الأعظم لا يمكن أن يكون أكبر من الواحد. الآن، سنقوم بحساب عامل التعديل الأصغر (m_{\min}) منسوباً إلى الاستطاعة الدنيا لإشارة الدخل ذات التردد الراديوي ($P_{in,min}$) التي يمكن أن تُثقل عبر خط الاتصال الضوئي. من تعريف عامل التعديل الأصغر، والذي هو عبارة عن عامل التعديل للإشارة المرسله عندما تتساوى استطاعة الإشارة المرسله مع استطاعة إشارة الضجيج، وبعبارة أخرى نكتب:

$$P_{noise} = P_{c-sig} \quad (12.4)$$

عندئذٍ، بتعويض المعادلتين (4.4) و(9.4) في المعادلة (12.4) نحصل على العلاقة التي تعطي قيمة عامل التعديل الأصغر m_{\min}^2 الآتية:

$$m_{\min}^2 = \frac{2 [16 A_0^2 N(f) B_2 + 4 N(f)^2 B_2 (4 B_1 - B_2)]}{4 \Gamma_{\phi} A_0^4} \quad (13.4)$$

أخيراً، للحصول على SFDR نقسم المعادلة (11.4) على المعادلة (13.4) فنحصل على:

$$SFDR = \frac{m_{\max}^2}{m_{\min}^2} = 4 \Gamma_{\phi}^{2/3} \delta^{-2/3} \left(\frac{4 A_0^4}{16 A_0^2 N(f) B_2 + 4 N(f)^2 B_2 (4 B_1 - B_2)} \right)^{2/3} \quad (14.4)$$

نستنتج من العلاقة المعبرة عن SFDR أن هناك عدة طرق لتحسين الأداء العام للنظام، وهي:

1. زيادة استطاعة الإشارة المستقبلية، بزيادة استطاعة المنبع الليزري المستخدم في دارة الإرسال.
2. زيادة استطاعة الهزاز المحلي الضوئي (LO)، باستخدام هزاز ليزري عالي الاستطاعة في دارة المستقبل.
3. إنقاص استطاعة الضجيج، باستخدام مضخمات قليلة الضجيج الإضافي، وإنقاص الضجيج النسبي (RIN) الليزري.
4. إنقاص التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل.
5. إنقاص عرض الحزمة الترددي لإشارة التردد الراديوي (B_2).
6. استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطياً ($1 \gg \delta$).

القيمة الحدية للمجال الديناميكي FLDR بالتعريف هي أكبر قيمة نظرية يمكن أن يأخذها المجال الديناميكي. إن أصغر استطاعة يمكن إرسالها عبر خط اتصال ضوئي محدودة بسبب الضجيج الإضافي، بينما أكبر استطاعة يمكن إرسالها عبر خط اتصال ضوئي محدودة بعامل التعديل الذي هو الآخر محدود بسبب التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل [4, 15]. وهكذا فإن قيمة FLDR تعطي بالعلاقة الآتية:

$$FLDR = \frac{P|_{m=1}}{P|_{P_{c-sig}=P_{noise}}} \quad (15.4)$$

بالأخذ بعين الاعتبار المعادلة (17.4)، وتعويض المعادلة (15.4) في المعادلة (5.3) ينتج لدينا:

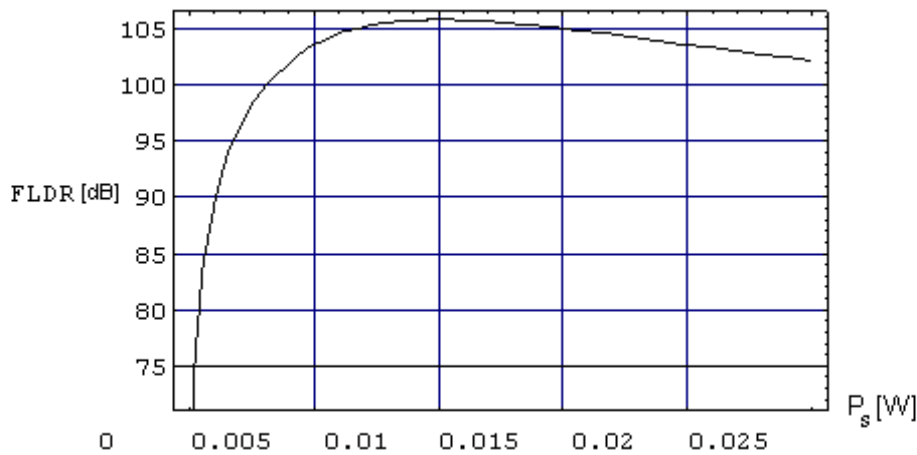
$$FLDR \cong \frac{2 \Gamma_{\phi} A_0^4}{16 A_0^2 N(f) B_2 + 4 N(f)^2 B_2 (4 B_1 - B_2)} \quad (16.4)$$

بدراسة العلاقتين (14.4) و (16.4) المعبرتين عن المجال الديناميكي الحدي (FLDR) والمجال الديناميكي الحر (SFDR)، نستنتج أنه إذا كان عامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية (δ) صغيراً لدرجة كافية فإن المجال الديناميكي الحر يأخذ أكبر قيمة له ليساوي تقريباً قيمة المجال الديناميكي الحدي، وبتعبير رياضي أن: $SFDR \approx FLDR$

5. دراسة المجال الديناميكي وتقييم أداء النظام برمجيًا:

بهدف تقييم أداء النظام المدروس حسابياً سنستخدم برنامج (Mathematica)، وسنأخذ بعين الاعتبار المعادلات (2.3)، (14.4)، و (16.4).

يوضح الشكل (1.5) دراسة المجال الديناميكي الحدي (FLDR) كتابع للاستطاعة الضوئية المستقبلية (P_s) في النظام الضوئي ذي التعديل AM/VSB. بدراسة دقيقة للشكل (1.5)، نلاحظ أن FLDR يزداد ليصل تقريباً 107 dB عندما تكون الإشارة المستقبلية حوالي $P_s \cong 15 \text{ mW}$ ، بعد ذلك FLDR يبدأ بالتناقص مع زيادة الاستطاعة المستقبلية. من هنا نستنتج أن هناك قيمة نموذجية للاستطاعة المرسله لا بد من أخذها بعين الاعتبار لتحسين أداء النظام.

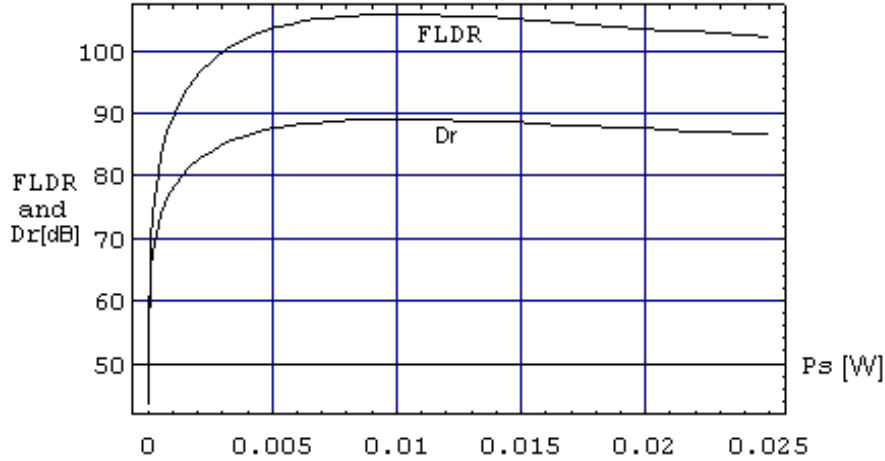


الشكل (1.5) المجال الديناميكي الحدي (FLDR) كتابع للاستطاعة المستقبلية (P_s) عندما تكون عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF) مساوية لـ 10 MHz، واستطاعة الهزاز اليزري المحلي $P_{Lo} = 10 \text{ mW}$.

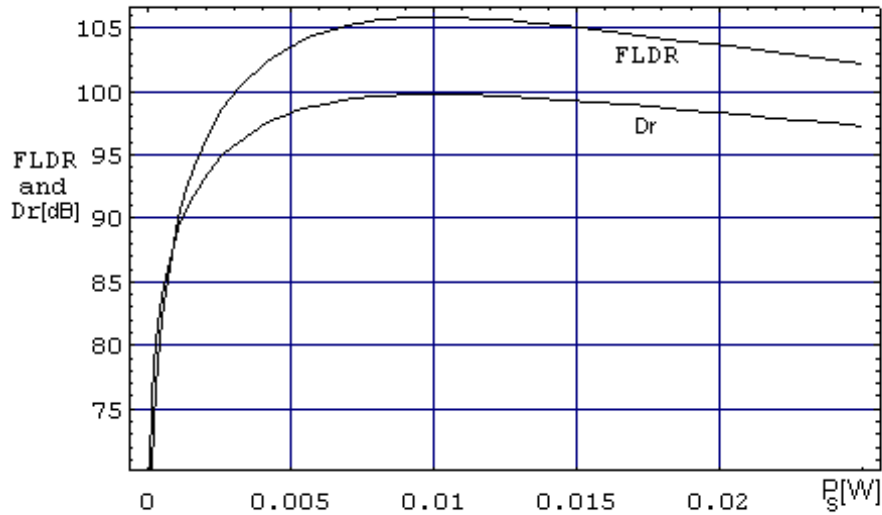
يوضح الشكل (2.5)، و (3.5) دراسة لكل من FLDR، و Dr كتابع للاستطاعة الضوئية المستقبلية (P_s) في النظام الضوئي البصري المترابط ذي التعديل AM/VSB، مأخوذ بعين الاعتبار أن $\delta = 1$ (حالة عدم التصحيح)، و $\delta = 0.2$. بملاحظة كل من الشكلين (2.5) و (3.5)، نرى أن هناك تأثيراً واضحاً للتشويه غير الخطي من الدرجة

الثالثة (IMD₃) الناتج عن عملية التعديل. التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة في عملية التعديل قد أثر على المجال الديناميكي بمقدار 12 dB. من الملاحظ أيضاً أن قيمة FLDR مساوية تقريباً لـ 107 dB في كلا الحالتين ($\delta=1$) و ($\delta=0.2$).

كنتيجة علمية إذاً، استخدم دائرة تصحيح خطية في بنية نظام الإرسال ($\delta < 1$)، سيؤدي إلى زيادة المجال الديناميكي، و تحسين الأداء العام للنظام الضوئي المترابط AM/VSF.



الشكل (2.5) المجال الديناميكي الحدي (FLDR)، والمجال الديناميكي (Dr) للنظام الضوئي المترابط AM/VSF كتابع للاستطاعة المستقبلية (P_S) عندما تكون عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF) مساوية لـ 10 MHz، ورقم ضجيج المضخم $\delta=1$ و $RIN=-125$ [dB/Hz]، $P_{LO}=10$ mW، $F=7$ [dB]

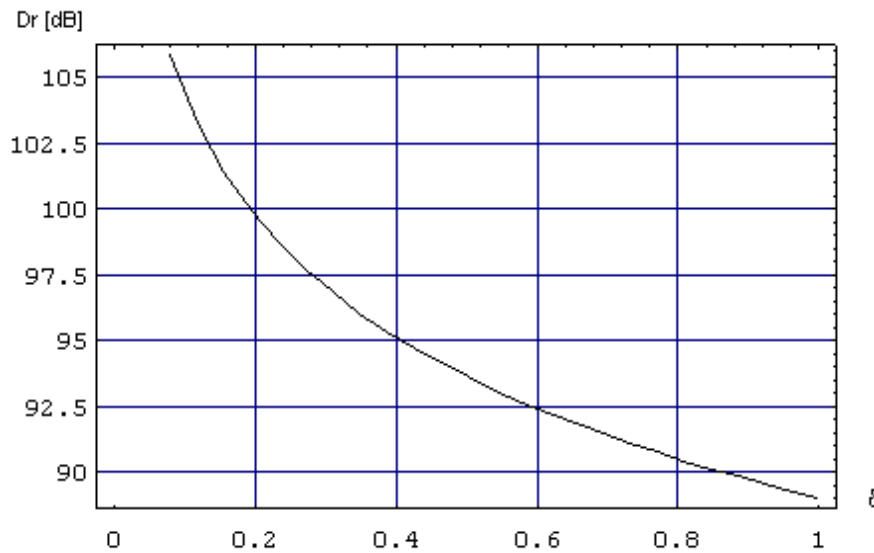


الشكل (3.5) المجال الديناميكي الحدي (FLDR)، والمجال الديناميكي (Dr) للنظام الضوئي المترابط AM/VSF كتابع للاستطاعة المستقبلية (P_S) عندما تكون عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF) مساوية لـ 10 MHz، ورقم ضجيج المضخم $\delta=0.2$ و $RIN=-125$ [dB/Hz]، $P_{LO}=10$ mW، $F=7$ [dB]

1.5. تأثير عامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية (δ):

يوضح الشكل (1.1.5) دراسة المجال الديناميكي (Dr) كتابع لعامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية (δ) المستخدمة في بنية النظام الضوئي AM/VSB المترابط. واضح من الشكل أن هناك منطقتي عمل لنظام الاستقبال المترابط. عندما يكون عامل تصحيح عدم الخطية δ صغيراً لدرجة كافية ($\delta \ll 1$)، الأداء العام لنظام الاتصال الضوئي AM/VSB المترابط يكون أفضل لأن التأثيرات السلبية للتشويه من الدرجة الثالثة تكون قليلة لدرجة الإهمال، وعندما تزداد δ لتساوي تقريباً الواحد، فإن تأثيرات التشويه الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية تزداد أيضاً لدرجة تؤدي إلى تشويه عمل النظام وقلّة مردودة.

كنتيجة علمية، عند زيادات كبيرة لـ δ يؤثر التشويه على أداء النظام لدرجة لا يمكن إهماله، مما يؤدي إلى قلّة المردود وسوء الأداء العام للنظام.



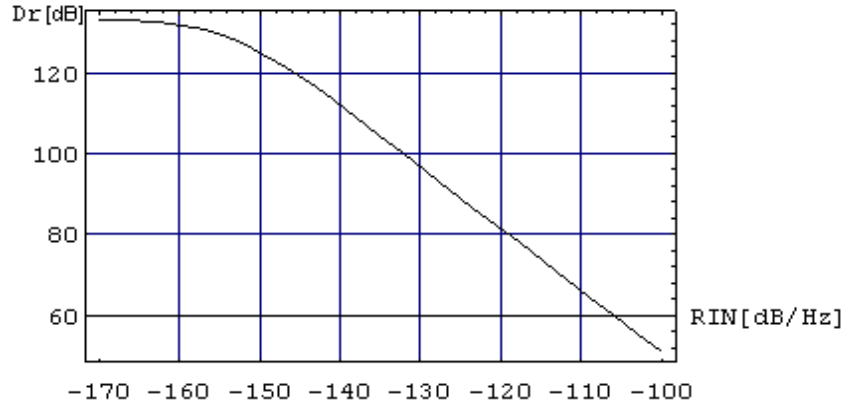
الشكل (1.1.5) المجال الديناميكي (Dr) للنظام الضوئي المترابط AM/VSB المصحح خطياً كتابع لعامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية (δ)، عندما تكون عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF) مساوية لـ 10 MHz، والاستطاعة الليزرية المستقبلة $P_s = 10 \text{ mW}$.

2.5. تأثير الضجيج النسبي لكل من المرسل الضوئي والهاز الضوئي المحلي (RIN):

عند دراسة تأثيرات الضجيج النسبي (Relative Intensity Noise, RIN) على أداء نظام الاتصال الضوئي، قمنا بتغيير عامل الضجيج النسبي، وظلت بقية عوامل النظام ثابتة. لقد وجدنا أن هناك سوية ضجيج لكل مستوى استطاعة خرج سواء كان ذلك للمرسل الضوئي أو الهاز الضوئي المحلي.

يوضح الشكل (1.2.5) دراسة تغيرات المجال الديناميكي (Dr) كتابع للضجيج النسبي (RIN) عندما تكون استطاعة كل من الإشارة الضوئية المستقبلة، والاستطاعة الضوئية للهاز الليزري المحلي مساوية لـ 10mW، في حين عامل التصحيح $\delta = 1$. مع الأخذ بعين الاعتبار أننا نستخدم مرشح تمرير منخفض (LPF) بعرض حزمة مساوية لـ 10MHz (عرض الحزمة لنظام بال للإرسال التلفزيوني). واضح من الشكل (1.2.5) أن التأثيرات السلبية للضجيج النسبي تكون مهملة عند تصميم مناسب لنظام الاتصال الضوئي [RIN=-160[dB/Hz]، ويكون نظام الاتصال

الضوئي يعاني فقط من ضجيج الإطلاق. عندما يزداد RIN ليساوي تقريباً $RIN = -135$ [dB/Hz]، فإن تأثيراته السلبية ستزداد لدرجة تؤدي إلى سوء عمل النظام وقلة مردوده. على كل حال من الأحوال، في خطوط الاتصال ذات التعديل AM/VSb نستخدم منابع ليزيرية ذات ضجيج نسبي مهم، واستطاعة خرج ضوئية 10 mW تقريباً.



الشكل (1.2.5) المجال الديناميكي (Dr) للنظام الضوئي المترابط AM/VSb المصحح خطياً كتابع للضجيج RIN، عندما تكون عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF) مساوية لـ 10 MHz، الاستطاعة الليزرية المستقبلية $P_{Lo} = 10$ ، $P_s = 10$ mW، و $\delta = 1$.

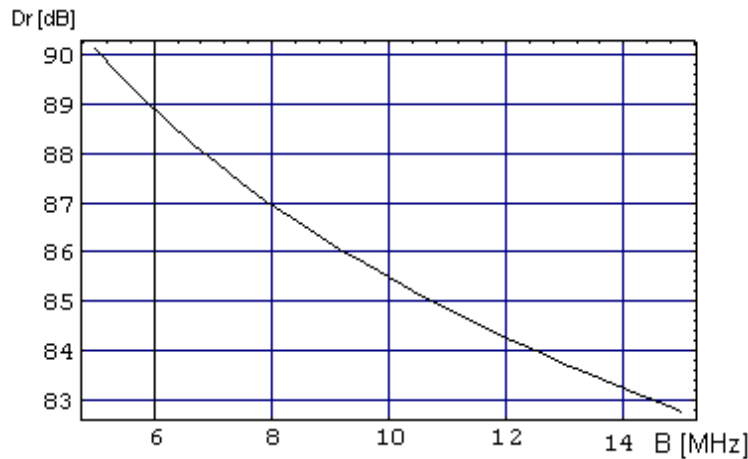
و النتيجة، عندما تكون استطاعة خرج المنبع الليزري عالية، فإن المجال الديناميكي لخط الاتصال الضوئي يكون متأثراً بالضجيج النسبي، لأنه يتعلق باستطاعة الخرج الضوئية لكل من المنبع والهزاز الليزري المحلي.

3.5. تأثير عرض الحزمة B_2 لمرشح التمرير المنخفض على أداء النظام:

يوضح الشكل (1.3.5) دراسة تغيرات المجال الديناميكي (Dr) كتابع لعرض الحزمة الترددي لمرشح التمرير المنخفض (B_2) في نظم الاتصال الضوئية ذات التعديل AM/VSb، عندما تكون $RIN = -140$ [dB/Hz]، و $\delta = 1$.

واضح من الشكل أن قيمة المجال الديناميكي (Dr) تتعلق بعرض الحزمة الترددي لمرشح التمرير المنخفض (B_2)، إذاً، عند زيادة عرض الحزمة الترددي لهذا المرشح، فإن كلا من الضجيج والتشويه الناتج عن عملية التعديل سوف يزداد لدرجة قد تجعل أداء النظام غير مقبول. لذا فإنه من الضروري أن تكون $B_2 \cong 2f$ [12, 14, 15]، حيث إن f تردد إشارة الإرسال.

و النتيجة، إن عرض الحزمة الترددي لمرشح التمرير المنخفض يجب أن يكون مناسباً للغرض التصميم بشكل لا يسبب التشويه أو التداخل بين القنوات.



الشكل (1.3.5) المجال الديناميكي (Dr) للنظام الضوئي المترابط AM/VSF كتاب عرض الحزمة الترددية لمرشح التمرير المنخفض (LPF)، عندما يكون $RIN = -140$ [dB/Hz] و $\delta = 1$.

إذاً لزيادة المجال الديناميكي، وتحسين الأداء الإجمالي العام للنظام البصري المترابط AM/VSF نقترح:
 أولاً: زيادة استطاعة الإشارة المستقبلية، بزيادة كلا استطاعة المنبع الليزري المستخدم في دائرة الإرسال-Neodymium (Nd:YAG)، واستطاعة الهزاز المحلي الليزري المستخدم في دائرة المستقبل (Avalanche Photodiode, APD).
 ثانياً: إنقاص استطاعة الضجيج، باستخدام مضخمات قليلة الضجيج الإضافي، وإنقاص الضجيج النسبي (RIN) الليزري باستخدام كواشف متوازنة.
 ثالثاً: إنقاص عرض الحزمة الترددي لإشارة التردد الراديوي (B_2) قدر ما أمكن شرط عدم التشويه أو التداخل بين القنوات.
 رابعاً: استخدام المعدلات المصححة خطياً لإنقاص التشويه غير الخطي IMD_3 الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية AM/VSF المستخدمة في بنية نظام الإرسال الضوئي المترابط.

المراجع:

1. MAKHOUL, M. S., *Optical Frequency Modulation for Coherent Optical Sub carrier Multiplexing Transmission*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji. 1996. 42, Z. 2, PP. 253-266.
2. MAKHOUL, M. S., *Intermodulation Distortion Effects on the Bandwidth Frequency of the SCM AM/VSF CATV CD System*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji. 1997. 43, Z. 4, PP. 443-472.
3. MAKHOUL, M. S., *Using m-ary Digital Modulation for Coherent Optical Subcarrier Multiplexing SCM System*. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji. 1997. 43, Z. 2, PP. 239-256.

4. مخول، مخائيل، تقليل التأثيرات السلبية لعدم خطية المعدلات الليزرية على أداء النظام الضوئي المترابط *SCM CATV AM/VSB*، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، العدد (2)، 2005م، الصفحات 113-132.
5. صنيح، جورج، الاتصالات بالألياف البصرية (ترجمة)، المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر - الطبعة الأولى 1992، الصفحات 608.
6. SSANG-SOO, L., SEUNG-WOO, S., *New Constriction of Multiwavelength Optical Orthogonal Codes*. IEEE Transactions On Communications, VOL. 50, NO. 12, December 2002, PP. 2003-2007.
7. OZAN, K. T., OKNA, M. T., LEONID, G. K., *Performance Of Coherent ASK Light wave Systems With Finite Intermediate Frequency*. IEEE Transactions On Communications, VOL. 45, NO. 3, March 1997, PP. 344-351.
8. DELFIN, J. M. S. IX, MASAFUMI, T., THOMAS, K. F., CHUNG-LI L., and LEONID, G. K., *Theoretical and Experimental Investigations of the Dynamic Range of High-Frequency Coherent AM Optical Links Using Semiconductor Lasers*. SPIE Vol. 2024, Multi gigabit Fiber Communication Systems, 1993, PP.547
9. THOMAS, K. F., MASAFUMI, T., DELFIN, J. M. S. IX, and LIONED, G. K., *Dynamic Range of Externally Modulated Analog Optical Links: Optical Amplification versus Coherent Detection*. IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 6, No. 2, February 1994, PP. 43-49.
10. FONG, T. K., SABIDO, D. J. M. IX, TABARA, M. and LEONID, G. K., *Spurious-Free Dynamic Range of Line width-Insensitive Coherent AM Analogue Optical Links*. Electronics Letters, 11th November 1993, VOL. 29, No. 23, PP. 127-131.
11. MAJUMBER, S. P., GANGOPADHYAY, R., ALAM, M. S., PRATI, G., *Performance of Line coded Optical Heterodyne FSK Systems With Nonuniform Laser FM Response*, Journal of Light wave Technology. VOL. 13, No. 4, April 1995, PP. 112-123.
12. DELFIN, J. M. S. IX, THOMAS, K. F., ROBERT, F. K., and LEONID, G. K., *Line width-Insensitive Coherent Optical Analog Links*. SPIE VOL.1703, 1992, PP. 367.
13. KALAMAN, R. F., FAN, J. C., and KAZOVSKY, L. G., *Dynamic Range Improvement Using a Novel phase-modulated analog Optical Link*. SPIE VOL. 2024 Multigigabit Fiber Communication Systems, 1993, PP. 1367.
14. ADAM, F., *Podstawy Ogólne Telewizji*. Warszawa, 1996, PP. 432.
15. THOMAS, K. F., DELFIN, J. M. S. IX, ROBERT, F. K., MASAFUMI, T., and LEONID, G. K., *Line width-insensitive Coherent AM Optical Links: Design, Performance, and Potential Application*. Journal of Light wave Technology, VOL. 12, No. 3, March 1994, PP. 61-73.
16. مخول، مخائيل، تأثيرات التشويه التعديلي على أداء النظام الضوئي ذي الكشف المترابط، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، قيد النشر، 2006م.