

تأثيرات التشويه التعديلي على أداء النظام التلفزيوني ذي الكشف المترابط SCM AM/VSB CATV

الدكتور مخائيل سليم مخول *

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

□ الملخص □

يتضمن البحث دراسةً لنسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى التشويه (SDR)، و نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج و التشويه (SNDR) كـمـعـيارٍ جـديـدٍ لتقييم أداء النظام. و يسلط الضوء على الآثار السلبية للتشويه الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة. من خلال الدراسة الرياضية، و نتائج الحسابات الرقمية يمكننا القول إن هناك العديد من الطرق لزيادة SDR و SNDR، و تبيّنت كحقيقة علمية النتائج الآتية:

1. عند عمل المعدل الخارجي الضوئي AM/VSB على نقطة انحياز معدومة ($0=\phi_T$)، يندم التشويه اللاخطي من الدرجة الثانية (IMD_2)، بينما يأخذ التشويه اللاخطي من الدرجة الثالثة (IMD_3) قيمته العظمى.
2. باستخدام المعدلات الليزرية الإلكترونية (EOM) المصححة خطياً يمكن إنقاص التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل، و زيادة كفاءة النظام و تحسين أدائه.
3. لأجل عوامل محددة لعمل النظام توجد قيمة مثالية لعامل التعديل الضوئي (m_{opt}) تجعل النظام يعمل بأفضل صورة، كما تجعل نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج و التشويه بأكبر قيمة ممكنة (SNDR).

الكلمات المفتاحية: التشويه التعديلي (IMD)، الكشف المترابط، SCM، AM/VSB، CATV.

Intermodulation Distortion Effects on the Performance of the SCM AM/VSB CATV Coherent Detection System

Dr. Mikhael Salim Makhoul *

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

□ ABSTRACT □

Our analysis contains a new definition and derivation of signal to intermodulation distortion ratio (SDR), and signal to noise plus intermodulation distortion Ratio (SNDR).

Based on our mathematical analysis, and computation of coherent SCM AM/VSB CATV system, we can say that there are many ways to increase the SDR, SNDR. We found out:

1. With the proper biasing of the LINEARIZED external modulator, the coherent SCM AM/VSB CATV receiver system demodulates the signal without generating extra nonlinear distortion.
2. Intermodulation distortion effects can be reduced and system performance improves by using linearized electrooptic modulator (EOM).
3. For a given system parameters there is an optimum value of the modulation index (m_{opt}) which maximizes the SNDR value.

Key Words: Intermodulation distortion, coherent detection, SCM, AM/VSB, CATV.

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

1. المقدمة:

تعاني نظم الاتصالات عامة من مجموعة ظواهر مختلفة تسبب تدني جودة الإشارات أثناء انتقالها خلال مراحل نظام الاتصالات البصري، كالضياعات، و الضجيج بكل أشكاله: الضجيج النسبي، وضجيج المضخمات، والتشوهات، والتشوهات على طول خط النقل، و تشويه الإشارة على خرج المعدلات الليزرية الذي يحد من سعة المعلومات المرسل في النظام، وهو أحد أهم أسباب عدم عمل نظام الاتصال بالشكل الفعال المطلوب. التشويه غير الخطي (Nonlinear) يسبب بظهور مركبات ترددية في الخرج لم تكن موجودة في الدخل، وهو نوعان: التشويه التوافقي (Harmonic Distortion) الذي يولد ترددات من مضاريب الإشارة، و تشويه التعديل (Intermodulation Distortion) حيث يولد ترددات فرق و مجموع. التشويه التعديلي هو نموذج من التشويه غير الخطي الذي يولد مركبات ترددية مكونة من مجموع ترددي إشارتي الدخل و فرقهما، أو من الممكن أن تكون مجموع ترددي التوافقيات و فرقهما، وهو غير مرغوب فيه كنتاج لعملية التعديل. عندما تتناقص استطاعة الإشارة المستقبل لتقارب استطاعة الضجيج تتناقص قابلية الكشف، و عندما تشوه بسبب عوامل مختلفة كالتعديل تتناقص قدرة تمييزها أكثر فأكثر. في تقنيات النظم التشابحية إن أي جهاز غير خطي يولد مركبات ترددية في إشارة الخرج في الأصل لم تكن موجودة في إشارة الدخل. لذلك عند تصميم نظام الاتصال يجب الحرص على أن تكون القدرة الواصلة إلى المستقبل كافيه بحيث ينحس لها هذا المستقبل وتتغلب على الضجيج الناشئ فيه، و أن يكون شكل الإشارة غير مشويه بحيث يتمكن المستقبل من تأدية دور المفيد. من هنا كانت القيم المختارة لعوامل النظام نابعة من هذه الحاجة، و يلعب العامل الاقتصادي دوراً مهماً في تحديد هذه العوامل و المواصفات.

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

هدف و أهمية البحث:

نستخدم لتقييم جودة و أداء نظام الاتصال نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR)، أو معدل الخطأ البت (BER)، وهذا يعتمد على طبيعة نظام الاتصال المدروس تشابحياً أو رقمياً. لذا فإن دراسة التشويه أمر مهم، ولكنه غير معتبر في العلاقات الرياضية التقليدية (SNR, BER) المعنية بتقييم أداء نظم الاتصالات عامة. أما هنا لتقييم أداء النظام التلفزيوني ذي الكشف المترابط فسننتج معياراً جديداً وهو نسبة استطاعة الإشارة إلى التشويه (Signal-to- Intermodulation Distortion Ratio, SDR)، ونسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى التشويه والضجيج معاً (Signal-to-Noise plus Intermodulation Distortion Ratio, SNDR) عند استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطياً.

2. تأثير التشويه على عامل التعديل (m):

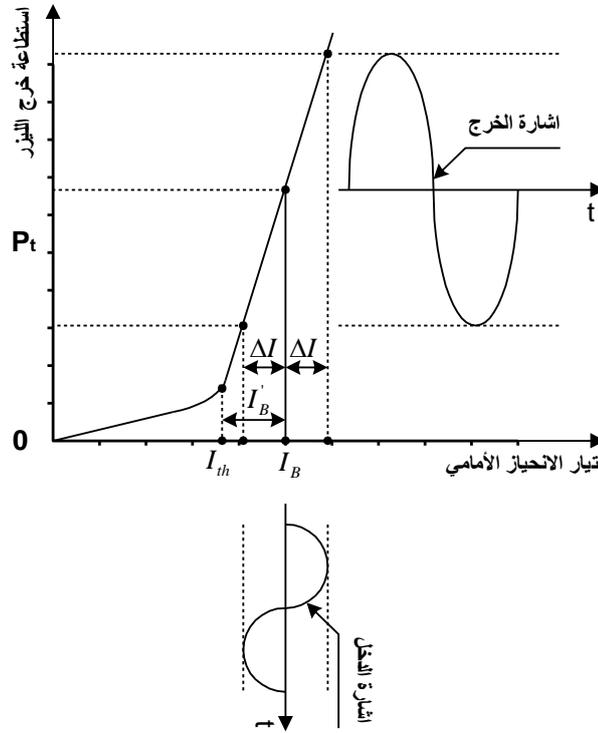
يعرف التعديل بأنه تغيير عنصر واحد (أو أكثر) من عوامل الحاملة الراديوية بشكل متفق مع تغيير إشارة المعلومات المراد إرسالها [1, 2, 4]. إلا أنه في حقيقة الأمر لا توجد معدلات مثالية لسبب أو لآخر، وخواص جميع المعدلات الليزرية لا خطية، و تؤثر اللاخطية على إشارة الخرج مسببة تشويه في المراحل اللاحقة. التشويه الناتج عن توافقية n يمكن أن يحسب من العلاقة الرياضية الآتية [7]:

$$D_n = 20 \cdot \log \frac{A_n}{A} [dB]$$

حيث إن A_n مطال التوافقية رقم n ، و A مطال التردد الأساسي.

إن الحزم البصرية التي تولدها المصادر الضوئية في الأنظمة الليافية تقوم بحمل المعلومات، وتعتبر الثنائيات الليزرية (Laser Diode, LD) المصادر الأكثر شيوعاً لأن أحجامها الصغيرة تتوافق مع متطلبات الإلكترونيات الحديثة. إلا أنه من أهم مساوئ الثنائيات الليزرية هي عدم تناسب القدرة البصرية التي يولدها الثنائي الليزري خطأً مع التيار الأمامي (تيار الانحياز)، وهذا الانحراف عن الخطية يشوه الإشارة، و عندما يتطلب الأمر أن يكون التشويه صغيراً جداً يجب عندئذٍ تصحيح لخطية استجابة المنبع الليزري المقترح للعمل في نظام الاتصال.

يبين الشكل (1.2) العلاقة بين استطاعة قدرة الخرج البصرية بتيار الدخل الأمامي لثنائي ليزري نموذجي، كما يوضح آلية التعديل التمثيلي [1, 3, 4, 5, 11].



الشكل (1.2) التعديل التمثيلي باستخدام ثنائي ليزري (LD) نموذجي [5].

في التعديل التمثيلي كما هو موضح على الشكل (1.2) يحرك تيار الانحياز المستمر إلى ما وراء تيار العتبة (Threshold Current, I_{th}) حتى يكون العمل على الجزء الخطي من منحنى خواص التيار- الاستطاعة، وذلك لاسترجاع الإشارة المرسله بتشويه منخفض.

إن عامل التعديل الضوئي يعطى بالعلاقة الرياضية الآتية [5, 6]:

$$m = m' \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (1.2)$$

حيث إن τ زمن حياة الحامل، ω التردد الزاوي، و $m' = \frac{\Delta I}{I_B}$ عامل التعديل الكهربائي، حيث إن ΔI مقدر تأرجح التيار حول نقطة الانحياز، و $I_B' = I_B - I_{th}$ تيار الانحياز. نستنتج من تحليلنا العلاقة (1.2) أنه عندما تكون $\omega\tau \ll 1$ يكون $m \cong m'$ ، أي إن عامل التعديل البصري يتناقص مع زيادة تردد التعديل.

لمعرفة كيفية تغير عامل التعديل نناقش الحالات الآتية:

1. عند استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطأً أن تيار الانحياز الأمامي للثنائيات $I_B' \cong I_B$ ، و عامل التعديل تقريباً يساوي $m' \cong 100\%$.
 2. الشكل (1.2) يوضح أن استخدام المعدلات الليزرية في حالتها العامة (غير المصححة خطأً) أن تيار الانحياز الأمامي للثنائيات $I_B' = I_B - I_{th}$ ، و عامل التعديل في هذه الحالة أصغر بكثير مما هو عليه في الحالة الأولى $[m' \cong 25\% \div 50\%]$.
 3. إذا كانت $\Delta I > I_B'$ ، فإن عامل التعديل $m' > 100\%$ مما يؤدي بدوره إلى تداخل في الإشارات، و النتيجة مزيد من التشويه.
- النتيجة إذاً:

- 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.
- إن استخدام المعدلات الليزرية المصححة خطأً سيؤدي إلى زيادة عامل التعديل مما يؤدي بدوره إلى تحسن أداء النظام المستخدم لتلك المعدلات.

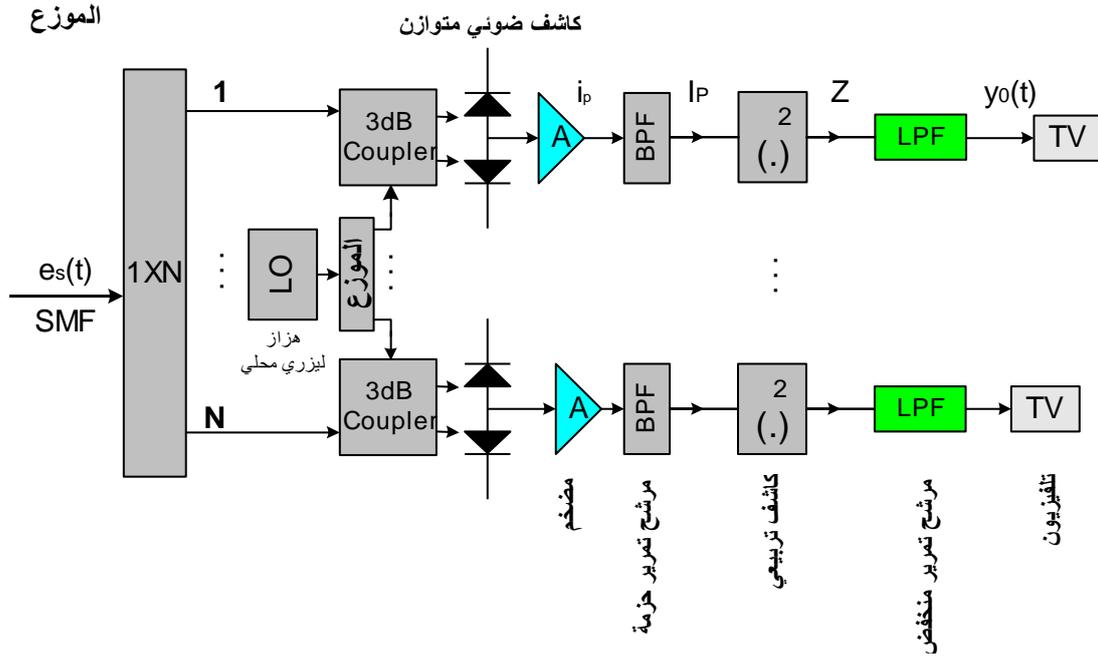
3. تحليل نظام الاستقبال التلفزيوني ذي الكشف المترابط:

(Coherent Detection Subcarrier Multiplexing Amplitude modulation Vestigial Sideband Cable Television System, SCM AM/VSB CATV CD)

يوضح الشكل (1.3) بنية نظام الاستقبال التلفزيوني الضوئي المستخدم للألياف البصرية (CATV) المترابط الكشف (CD) ذي مرشح الحزمة الترددي المصحح العرض، و المعدل الليزري المطالي (AM/VSB) المصحح خطأً.

الإشارة الراديوية المرسله ستطبق على دائرة مصحح الخطية بغية إنقاص التشويه الناتج عن عدم خطية عملية التعديل. يُعدل المعدل الخارجي (External Modulator) الضوء القادم من المنبع الضوئي (المرسل) بما يتفق مع نموذج التعديل المطالي (AM/VSB). يتم استقبال الإشارة المرسله من خرج المعدل $e_s(t)$ عبر نواقل ضوئية وحيدة النمط (Signal Mode Fiber, SMF).

كما هو واضح على الشكل (1.3). يقوم المستقبل باستقبال الإشارة المرسله باستخدام مرشح حزمة (Band Pass Filter, BPF)، كاشف تربيعي $(.)^2$ ، و مرشح تمرير منخفض (Low Pass Filter, LPF). إشارة الهزاز الضوئي المحلي $e_{LO}(t)$ من المفروض أن تكون ملائمة في الطور و التردد لعملية الكشف.



الشكل (1.3) نظام الاستقبال التلفزيوني ذي الكشف المترابط CD SCM AM/VSB CATV .

الإشارة الضوئية المستقبلية $e_s(t)$ تعطى بالعلاقة الآتية:

$$e_s(t) = E_s(t) \cdot \cos[\omega_s t + \phi'_s(t)] \quad (1.3)$$

حيث إن $\phi'_s(t)$ ضجيج الطور للإشارة المستقبلية، و ω_s التردد الزاوي للحامل الضوئي المتشكل في المرسل الضوئي.

قيمة $|E_s(t)|^2$ تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$|E_s(t)|^2 = 2P_s [1 + U_1(t) + U_3(t)] \quad (2.3)$$

حيث إن P_s الاستطاعة الضوئية المستقبلية، $U_1(t)$ الإشارة المفيدة، و $U_3(t)$ إشارة التشويه من الدرجة الثالثة الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة.

إذا كانت نقطة عمل المعدل الضوئي الخارجي $\Phi_T = 0$ فإن خرجها لا يتضمن أي أثر للتشويه من الدرجة الثانية، و $U_1(t)$ ، و $U_3(t)$ يمكن أن تكتب على الشكل الآتي [4]:

$$U_1 = m \sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)]$$

$$U_3 = -\frac{m^3}{6} \left(\sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] \right)^3$$

حيث إن a ثابت، و $v(t)$ الإشارة التلفزيونية المفيدة، N عدد القنوات العاملة في النظام، و f_i تردد القناة i . الحقل الضوئي للهزاز المحلي الليزري (Local Oscillator Laser, LO) يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$e_{LO}(t) = \sqrt{2P_{LO}} \cdot \cos[\omega_{LO}(t) + \phi'_{LO}(t)] \quad (3.3)$$

حيث إن:

تمثل الاستطاعة الضوئية و التردد الضوئي و الضجيج الزاوي للهباز المحلي على التوالي.

$$i_p = R \left(e_s(t) + e_{LO}(t) \right)^2 \quad (4.3)$$

حيث إن R هي الحساسية الضوئية.

بتعويض كل من المعادلتين (1.3) و (3.3) في المعادلة (4.3) نحصل على إشارة التردد المتوسط IF على خرج المستقبل الضوئي، و التي يُمكن أن نستعرضها على الشكل الآتي:

$$i_p = R \left\{ P_s [1 + U_1(t) + U_3(t)] + P_{LO} + \sqrt{2P_{LO}} E_s(t) \cdot \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi'_s(t) - \phi'_{LO}(t)] \right\} \quad (5.3)$$

حيث إن:

$$W_{IF} = W_s - W_{LO} \quad (6.3)$$

$$\phi(t) = \phi'_s(t) - \phi'_{LO}(t) \quad (7.3)$$

حيث إن W_{IF} هي التردد المتوسط لإشارة التردد المتوسط (Intermediate frequency, IF) و تقدر بالراديان/ثانية، و $\phi(t)$ هي الضجيج الزاوي.

إن الإشارة المفيدة على خرج مرشح الحزمة (Band Pass Filter, BPF) تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$I_P = R \sqrt{2P_{LO}} \cdot E_s(t) \cdot \cos[(\omega_{IF}t + \phi(t))] \quad (8.3)$$

افتراضنا إن مرشح الحزمة لإشارة التردد المتوسط (IF) مثالي بحيث لا يؤدي إلى تشويه الإشارة. كما افترضنا أيضاً إن تابع النقل لذلك المرشح يُمثل بنبضة مربعة.

إشارة دخل الكاشف التريبيعي تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$i(t) = I_P + n(t) = R \sqrt{2P_{LO}} \cdot E_s(t) \cos[(\omega_{IF}t + \phi(t))] + n(t) \quad (9.3)$$

حيث إن $n(t)$ ضجيج غاوصي أبيض.

نستخدم كاشفاً تريبيعياً للحصول على إشارة التردد الراديوي. نفترض إن الكاشف المستخدم مثالي. إلا أنه في الواقع العملي لا يمكن إنتاج كاشف بمواصفات مثالية. على كل حال من الأحوال هذا الاعتبار مقبول لأن الكاشف لا يعطي مركبات ضارة تقع ضمن طيف الإشارة المفيدة. لذلك، يُمكن أن يُكتب خرج الكاشف التريبيعي على الشكل الآتي:

$$Z = i(t)^2 = I_P^2 + n^2(t) + 2 I_P n(t) \quad (10.3)$$

أخيراً، خرج النظام المتمثل بخرج مرشح التمرير المنخفض (Low Pass Filter, LPF) يعطى بالعلاقة الآتية:

$$y_0(t) = I_P^2 + n_{tot}(t) \quad (11.3)$$

حيث إن I_P^2 يمثل الإشارة المفيدة على خرج LPF و الذي يعطى بالعلاقة الآتية:

$$I_P^2 = 2R^2 P_{LO} \cdot |E_s(t)|^2 \cdot \frac{1}{2} = 2R^2 P_{LO} P_s [1 + U_1(t) + U_2(t)] \quad (12.3)$$

و الضجيج الإضافي الكلي $n_{tot}(t) = n^2(t) + 2I_p n(t)$ ، طيف $2I_p n(t)$ مسيطراً مادام إن استطاعة الضجيج هي أقل بكثير من استطاعة الإشارة المفيدة. و الضجيج في مجال التردد يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$N_{tot}(f) = N(f) * N(f) + 2I_p * N(f) \quad (13.3)$$

حيث إن * ترمز إلى تابع الطي (الالتفاف) [12].

4. التشويه غير الخطي في النظام SCM AM/VSB CATV CD

4-1. التشويه غير الخطي للمعدلات و تأثيراته:

نظم الاتصالات ذات الحوامل الفرعية (Sub Carrier Multiplexing, SCM) تتأثر بالتشويه غير الخطي (Inter modulation Distortion, IMD) الناتج عن المعدلات، و هذه حقيقة علمية مؤكدة في كل من نظامي الكشف المباشر و الكشف المترابط. في نظم الاتصال الضوئية ذات الكشف المباشر إن التشويه غير الخطي ينتج بشكل أساسي عن عدم خطية منابع الضوئية المستخدمة. أما في أنظمة الكشف المترابط SCM CATV فإن عدم الخطية تنتج من عملية الاستقبال المترابطة و عدم خطية المعدلات المستخدمة.

عرض الحزمة الترددية الخاصة بكل قناة في نظام الاتصال الضوئي SCM AM/VSB CATV يعتمد على إشارة التردد المتوسط، شكل التعديل، كما يعتمد على عرض حزمة التمرير للمرشحات المستخدمة أيضاً. نجد من الضرورة أن يكون عرض الحزمة الترددي الخاص بكل قناة واسعاً بما فيه الكفاية لأجل عدم حدوث التداخل بين القنوات المتجاورة. عندما نستخدم حاملاً ضوئياً واحداً لا نجد فرقاً بين عرض الحزمة الترددي في المجال الضوئي أو الإلكتروني، و هذا معناه أن قيمة المجال الترددي للقناة هي $D \approx 2B_n$ على اعتبار أن B_n عرض الحزمة الترددية للإشارة الراديوية (Radio Frequency, RF).

كحقيقة علمية يمكن القول إن الضجيج الناتج عن تداخل القنوات المتجاورة من (2) حتى (N-1) هو ضعف ما هو عليه في القناة 1 و N. من ناحية أخرى، إن ضجيج التداخل الناتج في القناتين 1 و N متكافئان. نركز اهتمامنا هنا على دراسة التشويه غير الخطي الناتج عن عدم خطية عملية التعديل في المعدلات الضوئية AM/VSB. كما إننا نلفت انتباهنا من ناحية أخرى على IMD الناتج عن المضخمات الإلكترونية يمكن أن يؤثر بعض الشيء على أداء النظام و لكن عند التصميم الجيد لأنظمة الاتصال في الواقع العملي يمكن إهماله. من هنا نجد مبرراً أن نأخذ بعين الاعتبار خلال دراستنا التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل الضوئية AM/VSB. في حين أن التشويه الناتج عن مصادر أخرى يهمل لأسباب منطقية علمية. من أجل حساب استطاعة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل و تأثيراته السلبية على عرض الحزمة الترددي للإشارة المرئية - على أداء النظام - نستخدم برامج قمنا بكتابتها بلغة C++. البرامج تعمل بإدارة نظام التشغيل DOS 6.0 أو النسخ الأحدث منه. هنا مرة أخرى سأعيد كتابة المعادلة التي تعطي طيف الاستطاعة على خرج المستقبل الضوئي على الشكل الآتي:

$$U(f) = U_S(f) + U_{IMD_3}(f) + N_{tot}(f) \quad (1.1.4)$$

حيث أن الحد الأول في العلاقة أعلاه يعبر عن تحويل فورير للإشارة المفيدة المرئية SCM AM/VSB، و الحد الثاني هو تحويل فورير لإشارة التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج على خرج المعدل، بينما الحد الثالث يمثل الضجيج الإضافي $N_{tot}(f)$.

الاستطاعة المستقبلية الكلية لإشارة الخرج P_{tot} تعطى بالعلاقة الآتية:

$$P_{tot} = \int_{f_1}^{f_2} |U(f)|^2 df \quad (2.1.4)$$

حيث إن $B = f_2 - f_1$ يمثل عرض الحزمة الترددي للقناة.

بذلك يمكن أن تُعطى الاستطاعة الكلية لإشارة الخرج على الشكل الآتي:

$$P_{tot} = P_{Signal} + P_{IMD_3} + P_{noise} \quad (3.1.4)$$

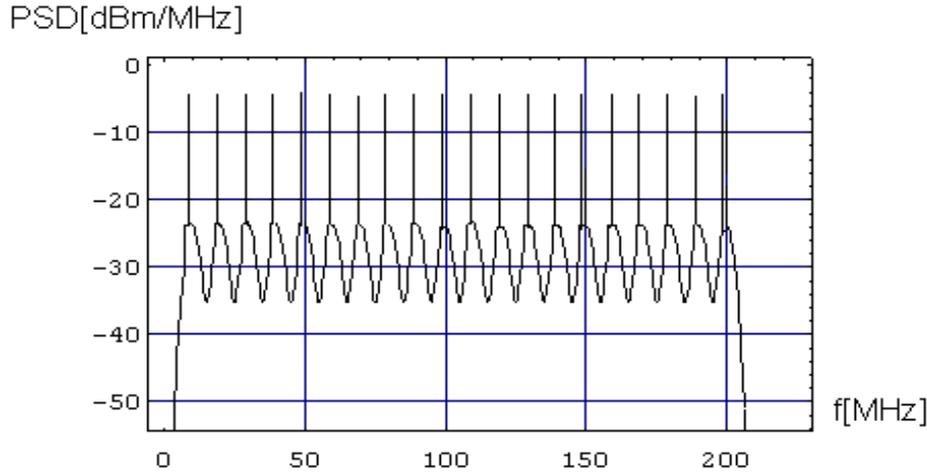
حيث إن P_{Signal} ، P_{IMD_3} ، P_{noise} هي استطاعة كل من الضجيج، التشويه، و الإشارة المفيدة على التوالي.

لا بد من التنويه هنا أن قيمة كل من P_{Signal} ، P_{IMD_3} ، P_{noise} ، تعتمد على موقع القناة على المجال الترددي المخصص لنظام الاتصال. يوضح الشكل (1.1.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارات المرئية المعدلة تعديلاً مطالياً AM/VSB لعشرين قناة فقط. عرض الحزمة الترددي للقناة التلفزيونية [MHz] $B = 2 \times S = 10$ ، و ذلك في نظام الإرسال PAL (أو 6MHz من أجل نظام الإرسال SECAM) [10]، و عامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدل $\delta = 0.0025$. كما أن الحافة الدنيا للحزمة الإرسال الترددية أقل بمقدار 1.25MHz من مكان توضع الحامل على النطاق الترددي المخصص لكل قناة.

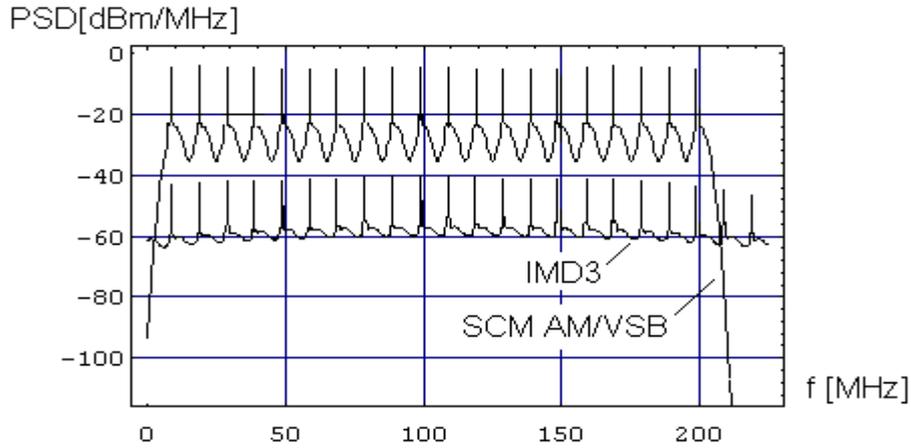
الشكل (2.1.4) يبين بوضوح كلا كثافة طيف الاستطاعة (Power Spectral Density, PSD)

للإشارة المفيدة و لإشارة التشويه غير الخطي الناتجة عن عملية التعديل (Third Order IMD, IMD_3).

لقد وجدنا كحقيقة علمية غير قابلة للمناقشة أو الجدل العلمي، أنه عندما يكون المجال الترددي المخصص لكل قناة من القنوات متساوياً فإن التشويه من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل يقع ضمن و منتصف النطاق الترددي المخصص للقناة i . و هذا موضح تماماً في الشكل (2.1.4).



الشكل (1.1.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة SCM AM/VSB التلفزيونية المفيدة عندما يكون عامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدل (δ) يساوي 0.0025، و عامل التعديل لكل قناة (m) يساوي 0.04، و عرض القناة الترددي (B) يساوي 10 MHz، في حين أن عدد القنوات العاملة في النظام (N) يساوي 20 قناة.

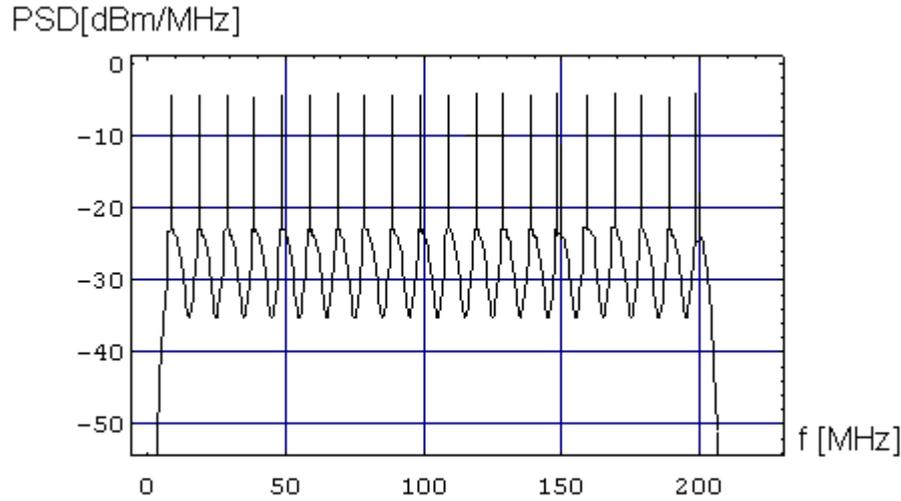


الشكل (2.1.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة SCM AM/VSB التلفزيونية المفيدة و إشارة التشويه IMD_3

عندما يكون $N=20, \delta=0.0025, B=10 \text{ MHz}, m=0.04$.

نرى أنه لا وجود لمركبات التشويه من الدرجة الثانية (IMD_2 , Second Order IMD). عندما تكون نقطة الانحياز لعمل المعدل Φ_T معدومة، وهذا ما هو معمول به عند تصميم المعدلات AM/VSB المستخدمة في النظم التلفزيونية المتلائمة CATV CD. في حين أن التشويه من الدرجة الثالثة يأخذ قيمة عظمى تتوضع في منتصف المجال الترددي المخصص للنظام (القناة $N/2$)، في حين أن القناة الأولى و الأخيرة تعاني أقل ما يمكن من ذلك التشويه.

يوضح الشكل (3.1.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارات المرئية المتأثرة بالتشويه IMD . بالتحليل نجد إن التفاف إشارة التشويه على الإشارة المرئية يسبب زيادة في عرض الحزمة الترددية للإشارة المفيدة.



الشكل (3.1.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة SCM AM/VSB التلفزيونية المفيدة المتأثرة بالتشويه عندما يكون $N=20, \delta=0.0025, B=10 \text{ MHz}, m=0.04$.

بالدراسة التحليلية نصل إلى النتائج التالية:

1. إن التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل واقع ضمن المجال الترددي المخصص للقناة.

2. تعتمد قيمة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل على رقم القناة التي نرغب بتشغيلها و مكان توضعها على المجال المخصص لعمل النظام.

3. تعتمد قيمة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل على المجال الترددي المخصص للقناة.

2-4. تأثيرات عامل التعديل:

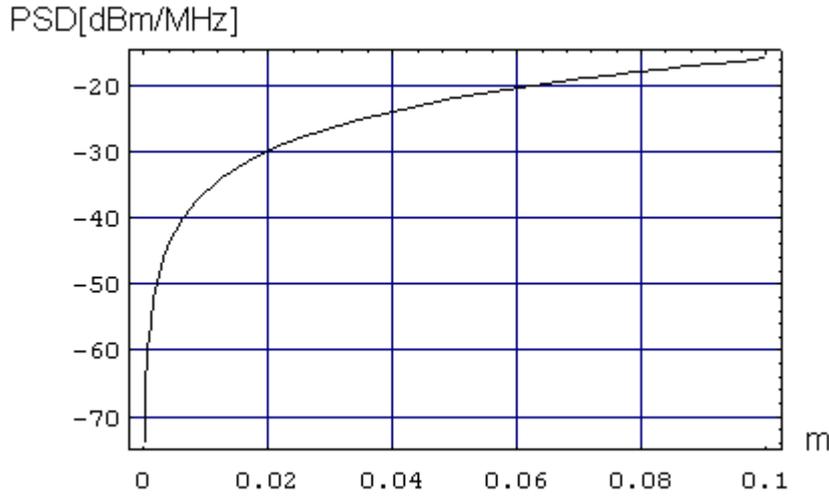
إن لعامل التعديل تأثيراً واضحاً على أداء نظام الكشف المترابط SCM AM/VSB CATV، وعلى مجمل أداء نظام الاتصال الضوئي.

يتم تصميم نظم الاتصالات ذات الأمواج الحاملة الفرعية (SCM) بحيث يحقق المتوسط التربيعي (أو القيمة الفعالة) القيمة المتوسطة لعامل التعديل العلاقة الآتية [7]:

$$m_{\text{rms}} = m\sqrt{N}$$

وهذا يعني أن عامل التعديل الإجمالي mN أقل من الواحد. و يمكن أن تقترب قيمته الإجمالية من الواحد من أجل قيم N الكبيرة. و عند ذلك يمكن أن يسبب الليزر المستخدم بعض التشويه. هذا التشويه سيحدث حتى لو كانت علاقة مميزة القدرة البصرية بتيار الدخل الأمامي للمنباع الليزرية المستخدمة خطية تماماً. هذا بدوره يجعل أداء النظام SCM محدوداً. لهذا السبب هناك محددات لعوامل التعديل يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار [8, 9, 10]. إذاً، بزيادة عامل التعديل سوف تزداد استطاعة الإشارة المفيدة. لكن يجب أن نأخذ بعين الاعتبار أن استطاعة التشويه سوف تزداد بشكل أسرع. لذلك فإن عامل التعديل يجب أن يتم اختياره بقيم مدروسة جيداً، من أجل الحصول على أداء جيد و عملٍ حسنٍ للنظام.

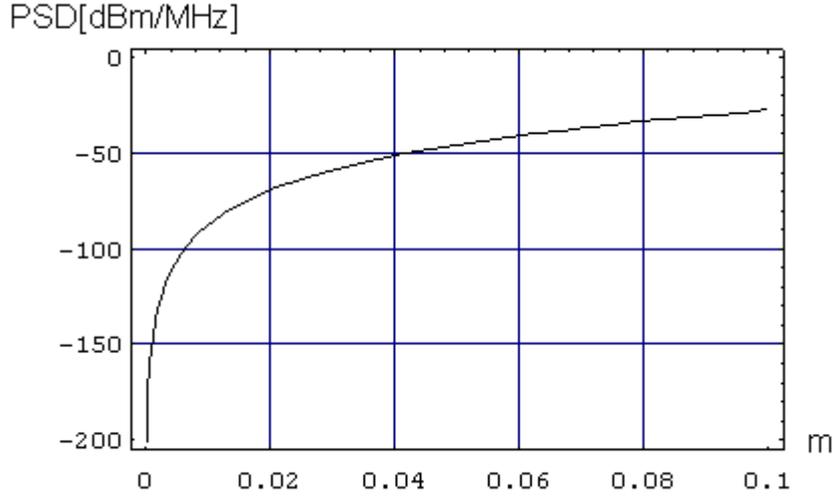
بالتدقيق بالشكل (1.2.4) نلاحظ زيادة استطاعة الإشارة المفيدة بزيادة عامل التعديل، آخذين بعين الجد المنطقة المعتبرة لعامل التعديل (m).



الشكل (1.2.4) كثافة طيف الاستطاعة الأعظمي للإشارة SCM AM/VSB التلفزيونية المفيدة كتابع لعامل التعديل m عندما يكون $N=20$, $\delta=0.005$, $B=10$ MHz.

يوضح الشكل (2.2.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة IMD كتابع لعامل التعديل m عندما تكون العامل في النظام $N=20$ ، وعامل تصحيح عدم الاستجابة الخطية للمعدل $\delta=0.005$ ، وعرض القناة الترددي $B=10$ MHz. يبين الشكل (2.2.4) أنه عندما يكون عامل التعديل صغيراً (أقل من 0.35)، لا يكون للتشويه غير الخطي أية آثارٍ

سلبية تذكر على أداء و عمل النظام. يزداد بسرعة فائقة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل بزيادة عامل التعديل، و يجب أن تُؤخذ تأثيراته السلبية بعين الاعتبار.



الشكل (2.2.4) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة IMD كتابع لعامل التعديل m عندما يكون $N=20, \delta=0.005, B=10 \text{ MHz}$

5. نسبة الإشارة إلى التشويه (SDR) لنظام الاتصالات التلفزيوني ذي الكشف المترابط

Signal-to- Intermodulation Distortion Ratio, SDR

يعمل النظام الاتصال SCM AM/VSB CATV بعدد من القنوات N. و يكون المجال الترددي المخصص لكل قناة على المجال الترددي الإجمالي المحدد للنظام مساوياً، و توضع قنوات النظام على مجالات وفواصل ترددية مخصصة ثابتة و متساوية.

المجال الترددي الإجمالي للنظام W_{\max} يُعطى بالعلاقة الآتية:

$$W_{\max} \approx N \times B_i \quad (1.5)$$

حيث إن B_i المجال الترددي المخصص لكل قناة، و N عدد القنوات.

ملاحظة: عندما نقول القناة الواقعة في المركز يمكن أن نعي أي قناة واقعة في الوسط تبعاً لكون عدد قنوات

نظام زوجياً أو فردياً.

تُعطى نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل

(S/IMD_3) الآتية بالعلاقة:

$$S / IMD_3 = \frac{P'_{\text{signal}}}{P'_{IMD_3}} \quad (2.5)$$

في العلاقة (2.5) أخذنا بعين الاعتبار التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل على

خرج المعدل الإلكتروني الضوئي (Electro Optic Modulator, EOM). استطاعة التشويه غير الخطي من

الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل P'_{IMD_3} ، و استطاعة الإشارة المفيدة P'_{signal} على خرج المعدل الضوئي

الإلكتروني، يُعطيان بالمعدلتين الآتيتين [10]:

$$P'_{\text{signal}} = \int_{f_1}^{f_2} |U_1(f)|^2 df \quad (3.5)$$

$$P^{\circ}_{\text{IMD}_3} = \int_{f_1}^{f_2} |U_3(f)|^2 df \quad (4.5)$$

حيث إن $U_1(f)$ و $U_3(f)$ هما طيفا الإشارة المفيدة و التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة على التوالي. نفترض أن الإشارة الضوئية مرسله وفق نظام بال (PAL) التلفزيوني، فإن عرض الحزمة الترددي للإشارة المرسله في كل قناة 5MHz. عندما غيرنا المجال الترددي المخصص لكل قناة من 8 إلى 10، ثم إلى 12MHz مع المحافظة على بقية معاملات النظام، وجدنا تحسناً طفيفاً قد طرأ على أداء النظام مقدره 0.25dB. لذا يجدر القول أن التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل لم ينقص بشكل ملحوظ و أن أداء النظام لم يتحسن بشكل معتبر عند زيادة معتبرة (~33%) لعرض المجال الترددي المخصص لعمل القناة، لذا فإن هذه الطريقة ليست فعالة لإنقاص IMD_3 ، و تحسين عمل و أداء النظام.

يوضح الشكل (1.5)، و الشكل (2.5) دراسة لـ S/IMD_3 كتابع لعدد القنوات العاملة في النظام N، عندما يعمل النظام بـ 65 و 80 قناة على التوالي، علماً أن $m=2.5\%$ ، $mN=200\%$.

توضح المنحنيات المبينة على الشكل (1.5)، و الشكل (2.5) إن القناة الوسطى هي الأكثر تأثراً بالتشويه IMD_3 و عندها تكون النسبة S/IMD_3 مساوياً تقريباً 42.5dB و هي الأسوأ أداء. على العكس من هذا فإن القناة الأولى و الأخيرة هما الأقل تأثراً بالتشويه و عندها تكون النسبة S/IMD_3 مساوية 45dB تقريباً، و تعتبر القناتان أنفنا الذكر من أفضل القنوات العاملة في النظام من حيث الأداء.

من تحليل النتائج الحسابية السابقة نخلص إلى أن:

القناة العاملة التي تقع في منتصف المجال الترددي الإجمالي المخصص لعمل النظام أكثر تضرراً من التشويه غير الخطي الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة في بنية النظام، في حين أن القناة الأولى و الأخيرة تعاني تشوهاً أقل.

6. نسبة الإشارة إلى الضجيج و التشويه لنظام الاتصالات التلفزيوني ذي المترابط

الكشف (Signal-to-Noise plus Intermodulation Distortion Ratio, SNDR)

نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج (SNR) غالباً ما تعتبر معياراً أساسياً لتقييم عمل و أداء نظم الاتصالات التمثيلية، كما أن SNR تُعتبر معياراً لتقييم أداء النظام التلفزيوني المترابط الكشف SCM AM/VSB CATV على وجه خاص. من أجل حساب SNR، نأخذ بعين الاعتبار القيمة المتوسطة التربيعية للتيار، فإن SNR تُعطى بالعلاقة الآتية [10, 11]:

$$SNR = \frac{P_{\text{signal}}}{\sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2} \quad (1.6)$$

بالأخذ بعين الاعتبار استطاعة التشويه التعديلي فإن SNDR تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$SNDR = \frac{P_{signal}}{\sigma_{sh}^2 + \sigma_{th}^2 + P_{IMD_3}} \quad (2.6)$$

العلاقة (1.6) تتضمن مجموع كل من ضجيج الإطلاق σ_{sh} ، و الضجيج الحراري σ_{th} ، في حين أن العلاقة (2.6) تتضمن مجموع كل من ضجيج الإطلاق، و الضجيج الحراري، و التشويه غير الخطي P_{IMD_3} الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدل (EOM). بقية أنواع الضجيج و التشويه مهملة لقلة تأثيرها أو لإمكانية إغائها. نفترض إن التشويه الناتج عن تداخل القنوات المتجاورة مهمل. كما نهمل التشويه الزاوي بسبب الجودة العالية للمنايع الضوئية المستخدمة [12]. الضجيج النسبي مهمل أيضاً بسبب الكفاءة العالية للمستقبلات الضوئية المتوازنة المستخدمة في نظام الاتصال. ضجيج الإطلاق و الضجيج الحراري يعطيان بالعلاقتين الآتيتين:

$$\sigma_{sh}^2 = 2q(P_{LO} + P_s) B \quad (3.6)$$

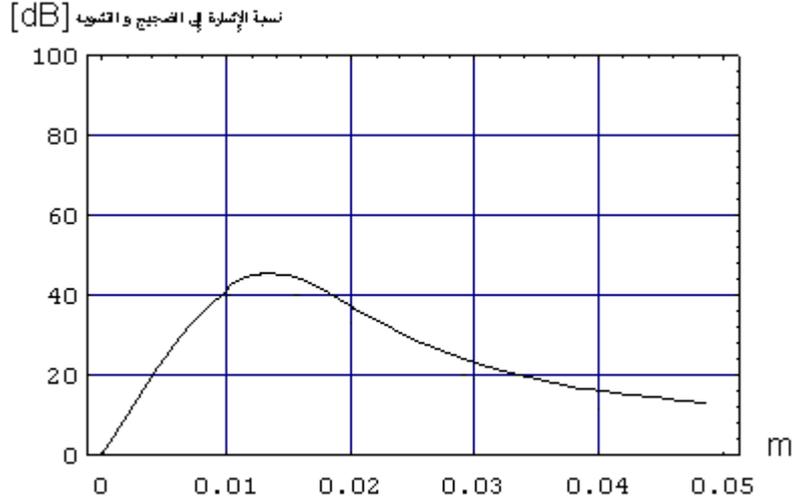
$$\sigma_{th}^2 = \frac{4 k_B T F B}{R_L} \quad (4.6)$$

حيث إن q شحنة الإلكترون، F عامل ضجيج المضخم ($\sim 4\text{dB}$)، k_B ثابت بولتزمان، T درجة الحرارة المطلقة (300K)، P_{LO} استطاعة الهزاز الضوئي المحلي، P_s استطاعة الإشارة المستقبلية، R_L مقاومة الحمل (50Ω). استطاعة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل P_{IMD_3} ، و استطاعة الإشارة المفيدة P_{signal} تُعطيان بالمعادلتين الآتيتين:

$$P_{signal} = (2RP_{LO}P_s)^2 \int_{f_1}^{f_2} |U_1(f)|^2 df \quad (5.6)$$

$$P_{IMD_3} = (2RP_{LO}P_s)^2 \int_{f_1}^{f_2} |U_3(f)|^2 df \quad (6.6)$$

حيث إن $U_1(f)$ ، و $U_3(f)$ الإشارة المفيدة و إشارة التشويه في مجال التردد على التوالي، R حساسية الثنائي الضوئي، و عرض الحزمة الترددي للإشارة المرئية المراد إرسالها عبر خط الاتصال الضوئي $f_2 - f_1 = B$. بين الشكل (1.6) $SNDR$ كتابع لـ m عند الأخذ الاعتبار أداء أسوأ قناة عاملة في النظام. هنا النظام يعمل بـ $N=80$ قناة، المجال الترددي المخصص لكل قناة من قنوات النظام ثابت $B=10\text{MHz}$ و المجال الترددي الإجمالي المخصص لعمل النظام $W_{max}=800\text{MHz}$. يوضح الشكل (1.6) إن قيمة $SNDR_{max}$ العظمى تساوي تقريباً 45dB ، و تحصل عند عامل تعديل نموذجي (مثالي) $m_{op}=0.0125$.



الشكل (1.6) نسبة الإشارة التلفزيونية المفيدة إلى الضجيج و التشويه معاً كتابع لعامل التعديل $SNDR(m)$ عندما يكون $N=80$, $\delta=0.003$, $B=10$ MHz, $W_{max}=800$ MHz

كما يوضح المنحني البياني أيضاً، أنه عند عمل النظام بعوامل تعديل منخفضة يؤثر كلا الضجيج الحراري وضجيج الإطلاق على أداء النظام، و تزداد قيمة SNDR بزيادة m ، حتى تصل إلى أعظم قيمة لها عند عامل تعديل نموذجي $m_{op}=0.0125$ تقريباً، و في هذه النقطة تحديداً يكون تأثير IMD مكافئاً لمجموع تأثير الضجيج الحراري و ضجيج الإطلاق. بعد هذه المرحلة، إن أية زيادة في عامل التعديل يرافقه زيادة قليلة في استطاعة الإشارة المفيدة مقارنة بالزيادة الكبيرة و السريعة في التشويه، مما يؤدي إلى نقصان نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج و التشويه معاً (SNDR).

وعموماً يمكن القول إنه يوجد عامل تعديل نموذجي m_{op} يجعل نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج و التشويه أعظميه $SNDR_{max}$ ، و هذا العامل يختلف من حالة لحالة لعمل النظام، و من قناة لقناة أخرى عاملة في نظام الإرسال، كما أنه يختلف باختلاف عدد القنوات العاملة في النظام أيضاً.

إن زيادة عدد القنوات العاملة في النظام يؤدي إلى زيادة استطاعة التشويه الناتج عن عملية التعديل، كما يؤدي أيضاً إلى نقصان عامل التعديل المثالي الموافق للقيمة العظمى لنسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج والتشويه. يجب أن لا تساوي الواحد قيمة عامل التعديل الإجمالي $m.N$ لنظام اتصال ما، خاصة عند عمل النظام بعدد كبير من القنوات، لأن التشويه يزداد بشكلٍ كبير و سريع، و يمكن إهمال هذه العقبة بجعل $m.N$ أقل من 200%. وللتأكد من صحة تصميم النظام، من الممكن للمصمم أن يراقب شكل طيف الإشارة المعدلة لاختيار عوامل النظام. وباختيار مناسب صحيح لعامل التعديل الضوئي، و عوامل النظام سيتحسن أداؤه. أضف إلى ذلك أن أداء النظام الضوئي ذا الكشف المترابط SCM AM/VSB CATV سوف يتحسن بشكل ملحوظ باستخدام الكاشف المتوازن، ليزرات عالية الاستطاعة، المعدلات الإلكترونية الضوئية (EOM) المصححة عدم الخطية، و المضخمات العالية الريح و القليلة التشويه و الضجيج.

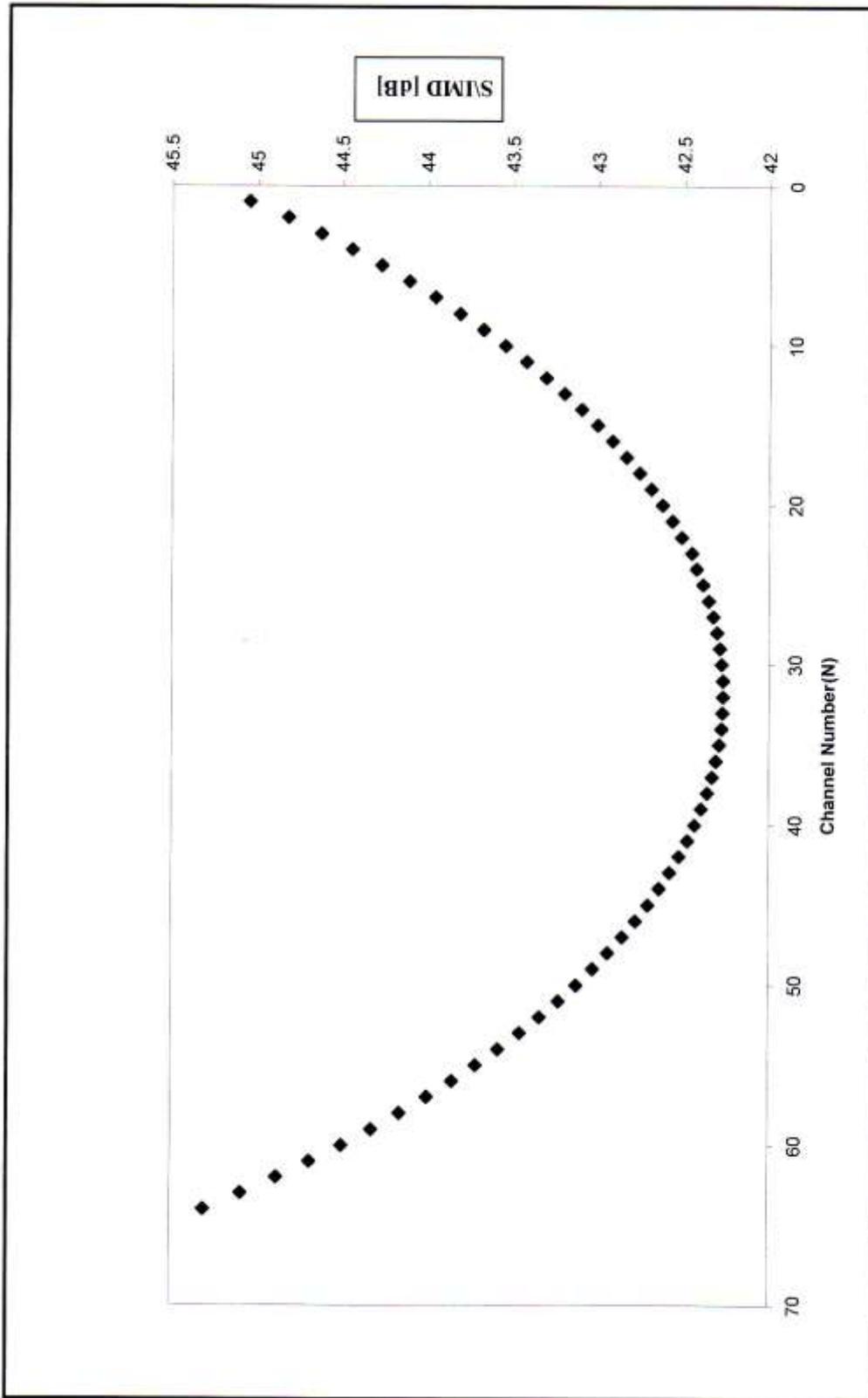
النتائج و التوصيات:

بالدراسة التحليلية نصل إلى النتائج الآتية:

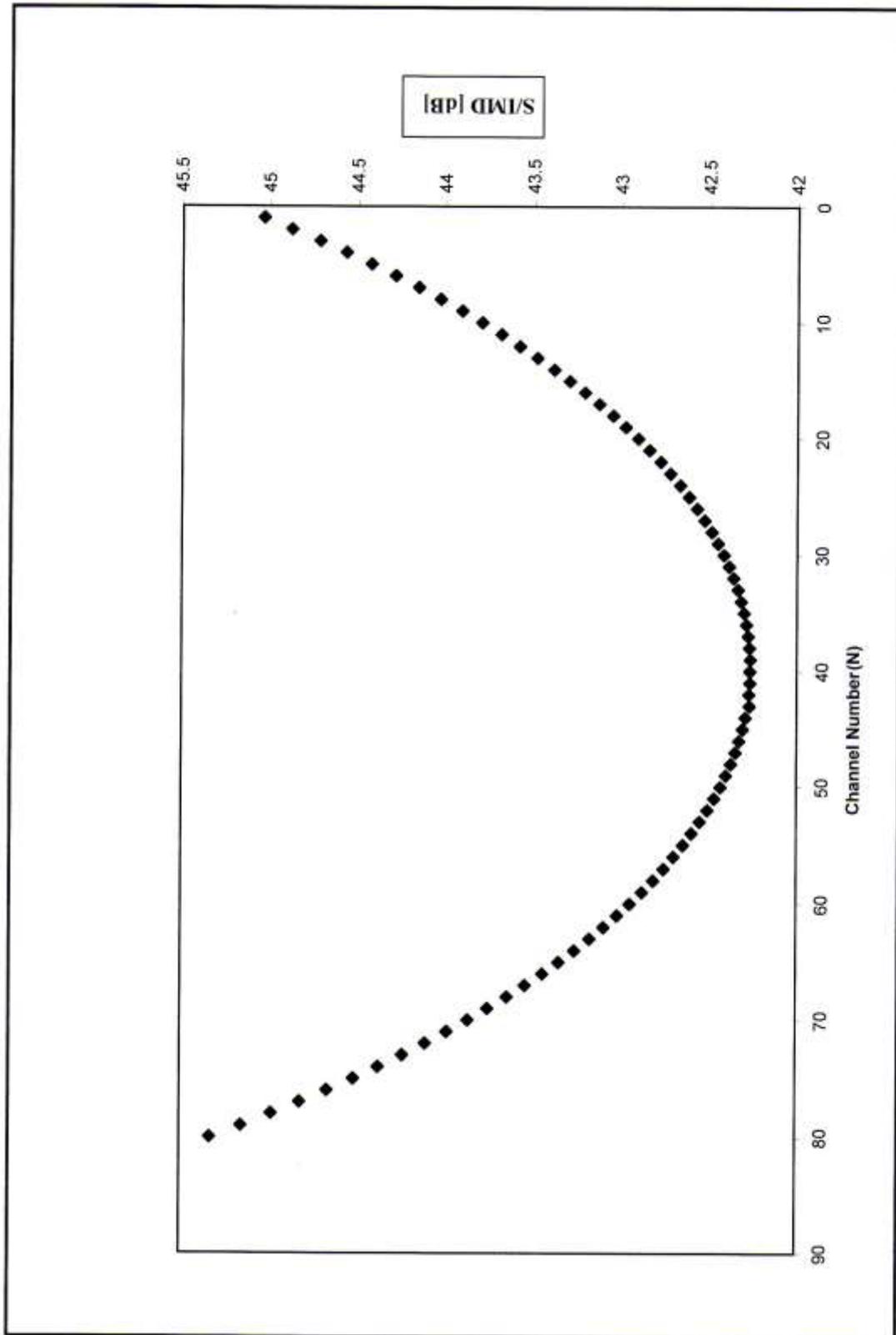
1. يكون ضجيج الإطلاق، و الضجيج الحراري مؤثراً (مسيطرًا) على أداء النظام عند عمله بعامل تعديل منخفض، و في هذا المجال تزداد قيمة الـ SNDR بزيادة m .
2. تصل SNDR لأعظم قيمة لها $SNDR_{max}$ عند عامل التعديل نموذجي m_{op} ، في هذه النقطة يكون تأثير التشويه (IMD) المؤثر على أداء النظام من ذات مرتبة الضجيج (الإطلاق، الحراري، النسبي، ... إلخ).
3. إن زيادة عامل التعديل ($m_{op} < m$) عن قيمه المثالية، تؤدي إلى نقصان SNDR، و سوء أداء النظام. في هذه الحالة يكون تأثير التشويه (IMD) المؤثر على أداء النظام مسيطراً، و ذا قيمة أكبر من قيمة الضجيج (الإطلاق، الحراري، النسبي، ... إلخ).

و بذلك نقترح لزيادة كفاءة النظام:

1. زيادة استطاعة الإشارة المستقبلية، وزيادة استطاعة الهزاز المحلي الضوئي. إنقاص استطاعة الضجيج، باستخدام مضخمات قليلة الضجيج الإضافي، و إنقاص التأثيرات السلبية للضجيج النسبي (Relative Intensity Noise, RIN) بتصميم مناسب لنظام الاستقبال.
2. إنقاص التأثيرات السلبية للتشويه باستخدام المعدلات الإلكترونية الضوئية الخطية (EOM).
3. عمل النظام عند عوامل مختارة بشكل جيد، و بعامل تعديل نموذجي m_{op} .



الشكل (1.5) نسبة الإشارة إلى التشويش الصعدي (IMD) كتابع لعدد القنوات العاملة (N) في النظام البري ذي الكشف التربط SCM AM/VSBCATV. عندما: $m=0.03$, $B_1=10\text{MHz}$, $B_2=10\text{MHz}$, $W_{\text{max}}=[5-645]\text{MHz}$.



المراجع:

1. MAKHOUL, M. S., *Optical Frequency Modulation for Coherent Optical Subcarrier 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، مخائل، تقليل التأثيرات السلبية لعدم خطية المعدلات الليزرية على أداء النظام الضوئي المترابط *SCM AM/VSF CATV*، مجلة جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، 2005، الصفحات 113-132.
5. صنيح، جورج، الاتصالات بالألياف البصرية (ترجمة)، المركز العربي للتعريب و الترجمة و التأليف و النشر - الطبعة الأولى 1992، الصفحات 608.
6. GRED, K., *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill, Inc. 1991, PP. 461.
7. SSANG-SOO, L., SEUNG-WOO, S., *New Constriction of Multi wavelength Optical Orthogonal Codes*. IEEE Transactions On Communications, VOL. 50, NO. 12, December 2002, PP. 2003-2007.
8. 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.
9. 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.
10. ADAM, F., *Podstawy Ogólne Telewizji*. Warszawa, 1996. PP. 432.
11. GOVIND, P. A., *Fiber-optical communication system*. 1992, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, United States of America, PP. 721.
12. JERZY, S., *Podstawy Teorii Sygnaów*. Warszawa, 1990, PP. 523.