

تقليل التأثيرات السلبية لعدم خطية المعدلات الليزرية على أداء النظام الضوئي المترابط SCM AM/VSB CATV

الدكتور مخائيل سليم مخول*

(قبل للنشر في 2005/7/12)

□ الملخص □

يقدم البحث تحليلاً رياضياً و حسابياً دقيقاً لتأثير التشويه الناتج عن عدم خطية الخرج للمعدلات الليزرية المستخدمة في النظم التلفزيونية الضوئية (CATV) المترابطة الفرعية (SCM) ذات التعديل المطالي (AM/VSB) ويسلط الضوء على كيفية تقليل الآثار السلبية للتشويه الناتج عن عدم خطية المعدلات الليزرية المستخدمة مما يؤدي بدوره إلى التحسين الإجمالي لأداء النظام.

يتضمن تحليلنا اشتقاق العلاقة الرياضية التي تعطي كثافة طيف الاستطاعة لنظام الإرسال. كما يتضمن دراسة لدور الدارات الخطية في إلغاء التشويه الناتج عن الأداء غير الخطي للمعدلات الليزرية. لقد توصلت الدراسة الرياضية و الحسابية إلى أن:

1. التشويه من الدرجة الثانية يمكن أن يكون معدوماً تماماً. في حين أن التشويه من الدرجة الثالثة يكون أعظماً.
2. استخدام دارة مصحح خطية تنقص تأثيرات التشويه السلبية المؤثرة على أداء النظام و تزيد كفاءته.
3. يجب أن يتم اختيار عامل التعديل بقيم مدروسة جيداً، من أجل الحصول على أداء جيد لعمل النظام.
4. عندما تزداد عدد القنوات (N) في نظام الاتصال المدروس، فإن قيمة التشويه الناتج عن عملية التعديل سوف تزداد حكماً.

* مدرس في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

Reducing IMD Effects of the Laser Modulators for Coherent SCM AM/VSB CATV Laser System

Dr. Mikhael Salim Makhoul*

(Accepted 12/7/2005)

□ ABSTRACT □

The purpose of this work is to analyze the possibility of reducing intermodulation distortion effects of the external electrooptic modulators for coherent detection SCM AM/VSB CATV laser transmission systems, and increase the system efficiency.

Our analysis contains derivation of the power spectral density of coherent system, and the impact of the linearizer circuit for canceling intermodulation distortion.

From our mathematical analysis and computer computation of coherent SCM AM/VSB CATV system, we obtain:

1. When the external amplitude modulator has bias point equal to zero, the second order intermodulation distortion term vanishes while the liner and third order intermodulation distortion terms attain their maximum.
2. Linearizer circuit within AM/VSB optical modulator can be used to reduce the negative of the third order intermodulation componets distortion.
3. For a given system parameters, there is an optimum value of the modulation index.
4. The power of intermodulation distortion increases when the channels number increases.

*Assistant Prof, Faculty Of Technical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

حتى هذه اللحظة ما زالت نظم الاتصالات الضوئية تعاني الكثير من المشاكل الذي يؤدي حلها إلى تحسين الأداء العام للنظام. و من هذه المشاكل الضياع في استطاعة الإشارة المرسله و التشتت بسبب عدم الكفاءة في الوصل و التصنيع للألياف الضوئية. إلا أن التشويه بوجه عام يعتبر إحدى أهم المعضلات التي تعاني منها نظم الاتصالات الضوئية سواء أكان مصدره عدم الجودة في الألياف المستخدمة أو عدم خطية الخرج في المعدلات الليزرية. يتأثر أداء ومردود النظام بالتشويه الناتج عن عملية التعديل الضوئي و الضجيج الناتج عن عملية الكشف، كالضجيج الحراري (n_{th}) و ضجيج الإطلاق (n_{sh})، الضجيج النسبي (n_{RIN})، وضجيج المضخات و الهزاز الليزري المحلي، كما يؤثر أيضاً الضياع في الاستطاعة و التشتت الموجي على طول خط الاتصال الضوئي على كشف الإشارات المفيدة المرسله. أحياناً تكون القدرة المرسله كافية لاسترجاع تلك الإشارات المفيدة، إلا أن التشويه لتلك الإشارات يحول دون الاسترجاع الصحيح للإشارة المرسله.

تلاقي النظم التلفزيونية الضوئية المترابطة الفرعية ذات التعديل المطالي و المستخدمة للكابلات باستمرار المزيد من اهتمام الباحثين نظراً للميزات الهامة لتقنيات الكوابل الضوئية الحديثة. ينقص التعديل المطالي المستخدم التعديلات التي يمكن أن تصادفنا في بناء نظام الإرسال ويسهل بدوره كل من عملية الإنتاج وكلفتة. وعلى الرغم من كل هذا، ما زالت نظم الاستقبال SCM المترابطة الضوئية غالية الثمن مما يجعل كلفة النظام الإجمالية عالية أيضاً.

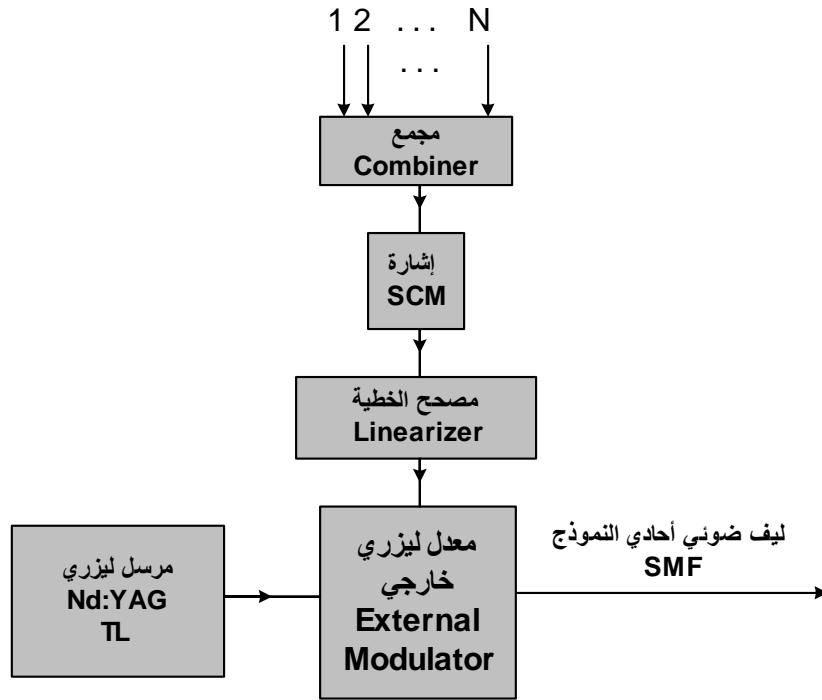
بنية النظام:

يوضح الشكلان (1.2) و (2.2) بنية كل من نظام الإرسال و الاستقبال للنظام التلفزيوني الضوئي ذو الحوامل الفرعية و المستخدم للتعديل المطالي (SCM AM/VSB CATV) [1].

يوضح الشكل (1.2) بنية نظام الإرسال، و يبين الشكل أن إشارة الدخل المتألفة من $(1...N)$ إشارة جزئية تجمع بجامع SCM لتشكل الإشارة الراديوية التي ستطبق على دائرة مصحح الخطية بغية إنقاص التشويه الناتج عن عدم خطية عملية التعديل. الغاية الأساسية إذاً من المصحح إلغاء التشويه الذي سينتج عن عملية التعديل لاحقاً.

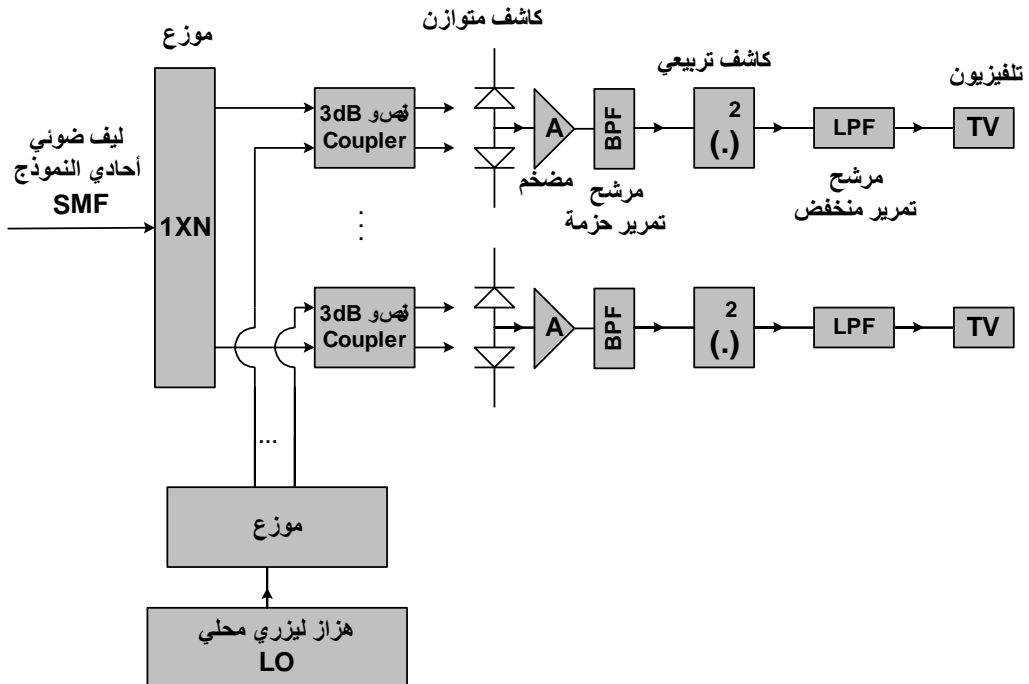
يعدل المعدل الخارجي (External Modulator) الضوء القادم من المنبع الضوئي Nd:YAG بما يتفق مع نموذج التعديل المطالي (AM/VSB).

يتم إرسال إشارة خرج المعدل و توزيعها عبر نواقل ضوئية وحيدة النمط (SMF). و يتم تضخيم الإشارة المرسله عبر الناقل الضوئي قبل أو بعد عملية التوزيع على المشتركين المستثمرين.



الشكل (1.2) نظام الإرسال التلفزيوني الضوئي المترابط SCM AM/VSB CATV.

يقوم المستقبل باستقبال الإشارة المرسله باستخدام كاشف ضوئي متوازن (Balanced Photodetector)، مضخم (A)، مرشح حزمة (BPF)، كاشف تربيعي² (.)، و مرشح تمرير حزمة (LPF). كما هو واضح على الشكل (2.2).



الشكل (2.2) نظام الاستقبال التلفزيوني الضوئي المترابط SCM AM/VSB CATV.

إشارة الهزاز الضوئي المحلي من المفروض أن تكون ملائمة لعملية الكشف و مترابطة مع إشارة الضوء المستقبل. ننوه هنا أن إشارة الهزاز الضوئي المحلي تعتبر مفتاح عملية الكشف المترابط. و بذلك فإن تلك الإشارة المتولدة في المستقبل (إشارة الهزاز الضوئي المحلي) يجب أن تكون مناسبة الطور و التردد لعملية الكشف. من جانب آخر نفترض أيضاً أن الإشارة المستقبلية الضوئية متلائمة الاستقطاب مع إشارة الهزاز الضوئي المحلي (المتلائمة بين المرسل والمستقبل).

بغية إنقاص الكلفة الإجمالية للنظام و التي كما ذكرنا أنها ما زالت عالية، نفترض أن هزازاً محلياً واحداً (LO) بمنبع ضوئياً من نوع Nd:YAG مستخدماً في المستقبل، و هذا الهزاز العام يمكن أن يستخدمه أي مستثمر مشترك في النظام. توضع دارة تصحيح خطية بين المعدل الخارجي و الجامع SCM بغية إنقاص التأثيرات السلبية للتشويه غير الخطي الناتج عن عدم الاستجابة الخطية للمعدلات الليزرية المستخدمة.

المعدلات:

يعرف التعديل بأنة تغيير عنصر واحد أو أكثر من العناصر المكونة للإشارة الحاملة بشكل متفق مع تغيير إشارة المعلومات المراد إرسالها. خلال عملية التعديل يجب أن نأخذ بعين الاعتبار كل من استطاعة الإشارة المرسله، عرض الحزمة الترددية للإشارة المرسله، التشويه، الضجيج ... إلخ.

استخدمت العديد من التقنيات لإنقاص التأثيرات السلبية غير الخطية المسببة لتشويه تعديل التداخل الناتج عن عدم الاستجابة الخطية لتلك المعدلات. وقد كان لكل تقنية ميزاتهما الإيجابية و السلبية. و العديد من المخططات والدارات الإلكترونية قد اقترحت لغرض تحسين الاستجابة الترددية و تحسين الخطية لتلك المعدلات الإلكترونية الضوئية (EOM) نذكر منها:

1. دارات تصحيح التشويه الإلكترونية المتقدمة و المستخدمة غالباً في نظم الاتصال التلفزيونية ذات الكابلات [1, 2, 3, 4].

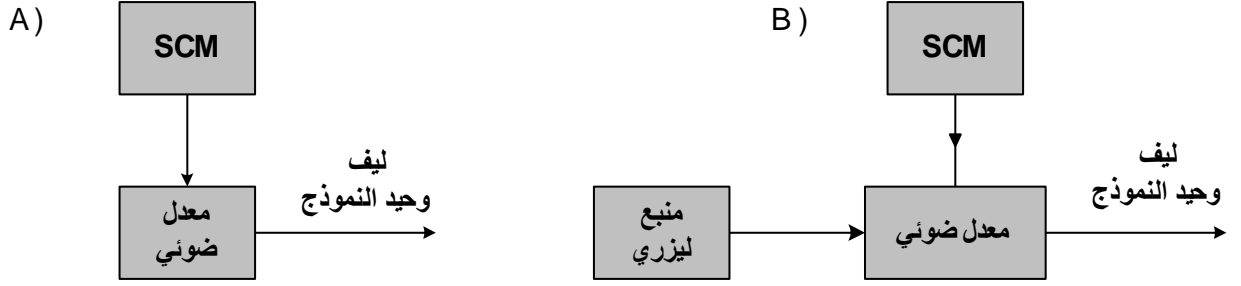
2. دارات التغذية العكسية الإلكترونية [4, 5].

3. دارات المعدلات الضوئية الخطية التسلسلية [6].

4. دارات المعدلات الضوئية التفرعية [7, 8].

من الملاحظ أن الاستجابة الترددية لتلك المعدلات هي أكثر خطية في منطقة و مجال العمل المطلوب. و تعتبر المعدلات الإلكترونية الضوئية الخارجية بالغة الأهمية في كثيراً من التطبيقات، على سبيل المثال في نظم الكابلات الضوئية التلفزيونية (CATV).

يوضح الشكل (1.3) مخططاً صندوقياً لكل من المعدلات المباشرة و المعدلات الخارجية الضوئية.



الشكل (1.3) مخططاً صندوقياً للمعدلات الضوئية

A- التعديل المباشر B- التعديل الخارجي.

يجب إن نأخذ بعين الاعتبار المزايا التالية للمعدلات الضوئية المستخدمة:

1. مميزة الفولط-استطاعة (L-V) للمعدلات الضوئية الخارجية غير خطية.
2. الاستطاعة المقدمة من المعدل و المرسله عبر ناقل ضوئي أحادي (الأسلوب) النموذج (SMF) تتراوح بين 50 mW و 200 mW. و الضجيج النسبي (RIN) أقل من -150 dB/Hz.
3. يمكن اختيار نقطة العمل للمعدلات الضوئية الخارجية على مميزة الفولط-استطاعة (L-V) بحيث نعدم تشويه التداخل من الدرجة الثانية ($IMD_2=0$) الناتج عن عدم خطية التعديل.

تشويه المعدلات الضوئية غير الخطية:

لنفترض أن خرج المعدل الضوئي يُعطى بالعلاقة التالية:

$$U = 1 + \sin\left[\frac{\pi V(t)}{V_\pi} + \phi_b\right] \quad (1.4)$$

حيث $V(t)$ إشارة الجهد المطبق على المعدل و المعبرة عن التردد الراديوي، في حين أن V_π ثابت يعبر عن نصف الجهد الموجي وهو الجهد المطلوب لفتح المعدل الضوئي، و ϕ_b هي زاوية الانحياز.

على وجه عام إن إشارة التعديل مركبة من إشارة الحامل والإشارة المرئية ($carrier + video$) وهي تحتوي على عدد N من الإشارات (القنوات) مضافاً إليها إشارة التيار المستمر المنحاز على الجهد V_B . لذلك فإن الإشارة المركبة $V(t)$ تُكتب على الشكل التالي:

$$V(t) = V_0 \sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] + V_B \quad (2.4)$$

حيث إن V_0 هي المطال لمجموعة الإشارات الفرعية المجموعة SCM، N تمثل عدد القنوات، $\cos 2\pi f_i t$ تمثل إشارة الحامل و أخيراً $v(t)$ هي إشارة الصورة المرئية (الفديوية).

بالأخذ بعين الاعتبار أن عامل التعديل $m = \pi V_0 / V_\pi$ و بتعويض المعادلة (2.4) في المعادلة (1.4) ينتج:

$$U = 1 + \sin\left(m \sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] + \frac{\pi V_B}{V_\pi} + \phi_b\right) \quad (3.4)$$

بعد الأخذ بعين الاعتبار الحد الأول و الثاني من منشور سلاسل الاستطاعة (الطاقة) لكل من تابع \sin و تابع \cos و إهمال بقية الحدود لصغر مطالها و عدم تأثيرها على أداء النظام، ينتج:

$$U = 1 + \cos(\Phi_T) \left\{ m \sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] - \frac{m^3}{6} \left(\sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] \right)^3 \right\} + \sin(\Phi_T) \cdot \left\{ 1 - \frac{m^2}{2} \left(\sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] \right)^2 \right\} \quad (4.4)$$

حيث إن:

$$\Phi_T = \frac{\pi V_B}{V_\pi} + \phi_b$$

بتحليلنا العلاقة (4.4) نجد أن:

1. الحد الذي يحتوي على m يمثل الإشارة المفيدة.
 2. الحد الذي يحتوي على m^2 يعبر عن التشويه غير الخطي من الدرجة الثانية IMD_2 .
 3. الحد الذي يحتوي على m^3 يعبر عن التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة IMD_3 .
- إذا كانت نقطة عمل المعدل الضوئي الخارجي $\Phi_T = 0$ فإن خرجها لا يتضمن أي أثر للتشويه من الدرجة الثانية و المعادلة (4.4) يمكن أن تُكتب على الشكل الآتي:

$$U = 1 + m \sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] - \frac{m^3}{6} \left(\sum_{i=1}^N [\cos(2\pi f_i t) + a v(t)] \right)^3 \quad (5.4)$$

والنتيجة إذاً:

باختيار صحيح لنقطة عمل المعدل الضوئي الخارجي ($\Phi_T = 0$)، التشويه غير الخطي من الدرجة الثانية الناتج عن عملية التعديل يكون معدوماً، بينما يصبح التشويه من الدرجة الثالثة أعظماً، لذا فإن هذا النوع من التشويه يجب كبحه و تقليل تأثيراته السلبية بوسائط أخرى.

وهكذا نعتبر بوجه عام أن استطاعة خرج المعدل كتابع للجهد يمكن أن تُكتب على الشكل الآتي:

$$P_{out}(V_{in}) \approx a \cdot V_{in} + b \cdot V_{in}^3 \quad (6.4)$$

حيث إن كل a , b ثوابت عددية.

كثافة طيف الاستطاعة للإشارة المعدلة:

نحل هنا كثافة طيف الاستطاعة (PSD) للإشارات الحاملة الفرعية المعدلة تعديلاً مطالياً (AM/VSB) و المستخدمة في نظم الإرسال التلفزيونية الضوئية ذات الكشف المترابط (CATV CD). إذا كان حامل الإشارة المرئية $A \cdot \cos 2\pi f_i t$ فإن جانب واحد لإشارة الطيف $x_c(f)$ نكتبه على الشكل الآتي:

$$x_c(f) = \frac{A}{\sqrt{2}} \delta(f - f_i) \quad (1.5)$$

حيث إن: $\delta(\cdot)$ نبضة ديراك (Dirac delta)، A ثابت، و f_i تردد الحامل المركزي.

ملاحظة: نحن نستخدم الرمز بشكله (δ) للتعبير عن نبضة ديراك، و الشكل التالي للرمز (δ) للتعبير عن عامل تصحيح الخطية.

كثافة طيف الاستطاعة للإشارة التلفزيونية الوحيد الجانب نكتبه بشكل تقريبي على الشكل التالي [1]:

$$V_i(f) = \frac{a}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-f \cdot f_i' / 2\sigma^2} \quad (2.5)$$

حيث $V_i(f)$ تحويل فورييه للإشارة المرئية $v_i(t)$ ، كما إن a ثابت، σ تمثل نصف عرض الحزمة الترددي للإشارة المرسله $(B/2)$ ، و f_i' التردد المركزي لحزمة التمرير التردديه.

إن كثافة طيف الاستطاعة الوحيد الجانب لـ N قناة مرئية يُعطى بالعلاقة التالية:

$$X(f) = \frac{A}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N \delta(f - f_i) + \sum_{i=1}^N \frac{a}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-(f-f_i')^2/2\sigma_f^2} \quad (3.5)$$

إذا افترضنا أن المعدل يستخدم دائرة تصحيح خطية ذات معامل δ و يعمل عند نقطة انحياز $\Phi_T = 0$ ، يمكن أن نكتب:

$$U(t) = 1 + m \sum_{i=1}^N [A \cos(2\pi f_i t) + a v(t)] + \frac{m^3 \delta}{6} \left(\sum_{i=1}^N A \cos(2\pi f_i t) + a v(t) \right)^3 \quad (4.5)$$

حيث N عدد قنوات النظام، و δ هي ثابت كفاءة و درجة التصحيح يعرف بعامل الخطية.

سنأخذ تحويل فورييه للمعادلة (4.5) لأجل التحليل الترددي. العلاقة المعبرة عن الحامل مع الإشارة المفيدة تُعطى

بالشكل التالي:

$$U_s(f) = \delta(f) + \frac{mA}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N \delta(f - f_i) + \frac{ma}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^N e^{-\frac{(f-f_i')^2}{2\sigma_f^2}} \quad (5.5)$$

المعادلة (5.5) توضح طيف الاستطاعة للإشارة المتضمنة المعلومات المفيدة المرسله و التي ستشكل مع إشارة

التشويه دخلاً للمستقبل الضوئي في نظام الاتصال.

يُكتب الحد الثالث المعبر عن التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل في المعادلة

(4.5) على الشكل التالي:

$$U_{IMD_3}(t) = \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \left(\sum_{i=1}^N \cos 2\pi f_i t + a \cdot s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t \right)^3 \quad (6.5)$$

حيث $v_i(t) = s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t$ ، ومقدار الإنزياح الترددي للحامل $f_i' - f_i = \Delta f$ ، في حين أن تابع

الارتباط الذاتي (Autocorrelation) للإشارة المرئية يعطى بالعلاقة التالية [2]:

$$E(s_i(t) \cdot s_i(t + \tau)) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2}{2\tau_0^2}}$$

حيث إن τ_0 زمن الالتفاف.

يمكن أن نعيد كتابة المعادلة (6.5) على الشكل الآتي:

$$U_{IMD_3}(t) = \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \left\{ \left(\sum_{i=1}^N \cos 2\pi f_i t \right)^3 + 3a \left(\sum_{i=1}^N \cos 2\pi f_i t \right)^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^N s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t \right) + \right. \\ \left. 3a^2 \left(\sum_{i=1}^N \cos 2\pi f_i t \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t \right)^2 + a^3 \left(\sum_{i=1}^N s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t \right)^3 \right\} \quad (7.5)$$

الحد المرفوع للدرجة الثالثة يُكتب على الشكل التالي:

$$\left(\sum_i^N Y_i \right)^3 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N Y_i Y_j Y_k \quad (8.5)$$

بالأخذ بعين الاعتبار المعادلة (8.5)، المعادلة (7.5) تُكتب على الشكل التالي:

$$U_{IMD_3}(t) = \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \cos 2\pi f_i t \cdot \cos 2\pi f_j t \cdot \cos 2\pi f_k t + \right. \\ \left. 3a \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \cos 2\pi f_i t \cdot \cos 2\pi f_j t \cdot s_i(t) \cdot \cos 2\pi f_i' t \cdot s_k(t) + \right. \\ \left. 3a^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \cos 2\pi f_i t \cdot \cos 2\pi f_j' t \cdot \cos 2\pi f_k' t \cdot s_j(t) \cdot s_k(t) + \right. \\ \left. a^3 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \cos 2\pi f_i' t \cdot \cos 2\pi f_j' t \cdot \cos 2\pi f_k' t \cdot s_i(t) \cdot s_j(t) \cdot s_k(t) \right\} \quad (9.5)$$

حيث إن:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(f) \cdot df = 1$$

$$S(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2\sigma_f^2}}$$

$$S'(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{4\sigma_f^2}}$$

$$S''(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{3} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{6\sigma_f^2}}$$

وباستخدام العلاقات المتثلثية و الأخذ بعين الاعتبار أن عملية الضرب في مجال الزمن تكافئ عملية الالتفاف

في مجال التردد، و بالحل المتتابع يعبر عن كثافة طيف الاستطاعة للتشويه من الدرجة الثالثة بالعلاقة التالية [9]:

$$U_{IMD_3}(f) = \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \cdot \frac{1}{64} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \left\{ \delta(f - [f_i + f_j + f_k]) + \delta(f + [f_i + f_j + f_k]) + \right. \\ \left. \delta(f - [f_i + f_j - f_k]) + \delta(f + [f_i + f_j - f_k]) + \right. \\ \left. \delta(f - [f_i + f_k - f_j]) + \delta(f + [f_i + f_k - f_j]) + \right. \\ \left. \delta(f - [f_j + f_k - f_i]) + \delta(f + [f_j + f_k - f_i]) \right\} +$$

$$\begin{aligned}
& \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \cdot \frac{9a^2}{16} \cdot \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \left\{ S(f - [f_i + f_j + f_k]) + S(f + [f_i + f_j + f_k]) + \right. \\
& S(f - [f_i + f_j - f_k]) + S(f + [f_i + f_j - f_k]) + \\
& S(f - [f_i + f_k - f_j]) + S(f + [f_i + f_k - f_j]) + \\
& \left. S(f - [f_j + f_k - f_i]) + S(f + [f_j + f_k - f_i]) \right\} + \\
& \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \cdot \frac{9a^4}{16} \cdot \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \left\{ S'(f - [f_i + f_j + f_k]) + S'(f + [f_i + f_j + f_k]) + \right. \\
& S'(f - [f_i + f_j - f_k]) + S'(f + [f_i + f_j - f_k]) + \\
& S'(f - [f_i + f_k - f_j]) + S'(f + [f_i + f_k - f_j]) + \\
& \left. S'(f - [f_j + f_k - f_i]) + S'(f + [f_j + f_k - f_i]) \right\} + \\
& \frac{m^3 A^3 \delta}{6} \cdot \frac{a^3}{4} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \left\{ S''(f - [f_i + f_j + f_k]) + S''(f + [f_i + f_j + f_k]) + \right. \\
& S''(f - [f_i + f_j - f_k]) + S''(f + [f_i + f_j - f_k]) + \\
& S''(f - [f_i + f_k - f_j]) + S''(f + [f_i + f_k - f_j]) + \\
& \left. S''(f - [f_j + f_k - f_i]) + S''(f + [f_j + f_k - f_i]) \right\} \tag{10.5}
\end{aligned}$$

بموازنة $S(f)$ و $S'(f)$ نلاحظ أن عرض الحزمة الترددي يزداد بمقدار $\sqrt{2}$ $S'(f)$ [هي الأكبر]. وبموازنة $S(f)$ و $S''(f)$ نلاحظ أن عرض الحزمة الترددي يزداد بمقدار $\sqrt{3}$ $S''(f)$ [هي الأكبر]. بتحليلنا للعلاقة (10.5) نصل إلى أن التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل تابع لعامل تصحيح الخطية δ . و يتعلق بكل من عامل التعديل m و عدد القنوات N العاملة في النظام.

تشويه المعدلات غير الخطي و تأثيراته السلبية:

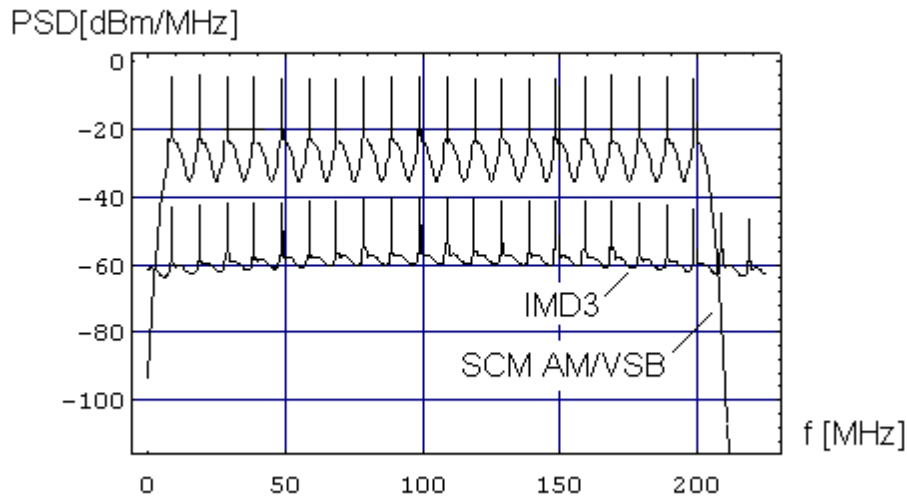
هدفنا الأساسي محاولة إنقاص التأثيرات السلبية للتشويه غير الخطي الناتج عن المعدلات المطالية الخارجية. عند التصميم الجيد لأنظمة الاتصال أن تشويه المضخمات الإلكترونية و الألياف في الواقع العملي يمكن إهماله. من هنا نجد مبرراً أن نأخذ بعين الاعتبار فقط خلال دراستنا التشويه غير الخطي الناتج عن المعدلات الضوئية AM/VSB، في حين أن التشويه الناتج عن مصادر أخرى مهملاً 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 لحساب كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و إشارة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل من الدرجة الثالثة. بالأخذ بعين الاعتبار المعادلات (5.5) و (10.5)، يمكن حساب كثافة طيف الاستطاعة باستخدام العلاقة التالية [3]:

$$P_{\text{tot}} = \int_{f_1}^{f_2} |U(f)|^2 df \quad (1.6)$$

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

عرض الحزمة الترددي للقناة التلفزيونية $B/2=5\text{MHz}$ في نظام الإرسال PAL (أو 6MHz في نظام الإرسال SCAM)، كما أنه في نظام التعديل AM/VSB الحافة الدنيا لحزمة الإرسال الترددية أقل بمقدار 1.25MHz من مكان توضع الحامل على النطاق الترددي المخصص لكل قناة.

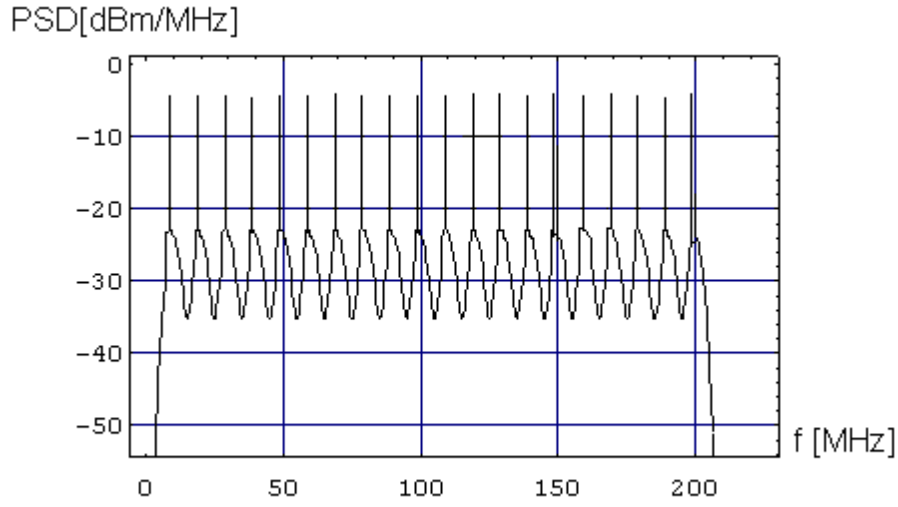
الشكل (1.6) يبين بوضوح كل من كثافة طيف الاستطاعة للإشارة المفيدة و لإشارة التشويه غير الخطي الناتجة عن عملية التعديل. لقد وجدنا كحقيقة علمية في النظام المترابط الضوئي عندما يكون المجال الترددي المخصص لكل قناة من القنوات متساوي أن التشويه من الدرجة الثالثة يقع ضمن و منتصف النطاق الترددي المخصص لكل قناة.



الشكل (1.6) كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و التشويه الناتج عن المعدل،

عند $N=20, \delta=0.0025, B=10\text{MHz}, m_i=0.04$

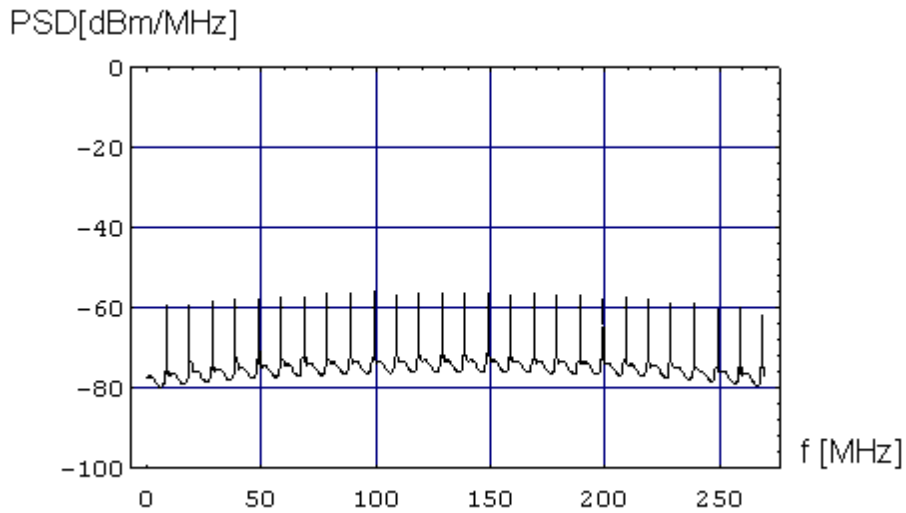
أن قيمة التشويه تكون أعظميه في مركز المجال الترددي للنظام (القناة $N/2$). في حين أن القناة الأولى والأخيرة تعاني أقل ما يمكن من ذلك التشويه. الشكل (2.6) يبين بوضوح أن النطاق إشارة التشويه على طيف الإشارة المرئية يسبب زيادة في عرض الحزمة الترددية للإشارة المفيدة.



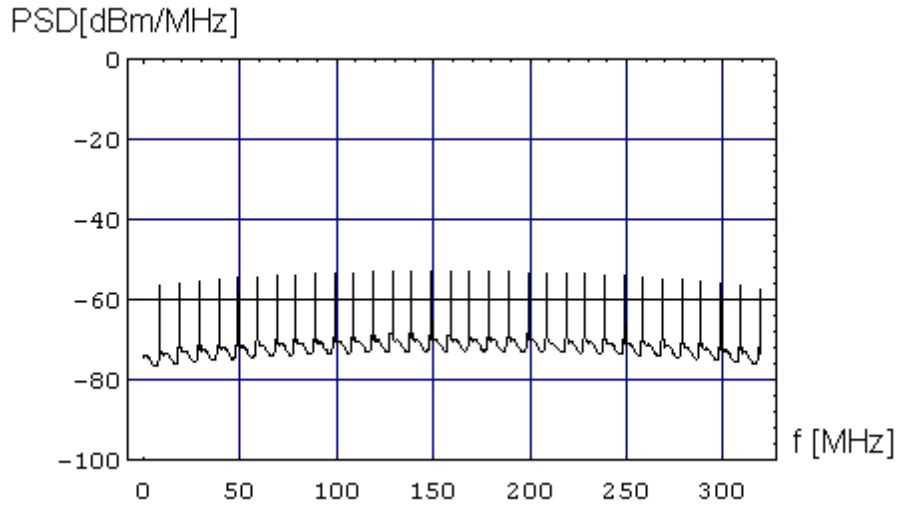
الشكل (2.6) تأثير كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه على الإشارة المفيدة، عند
 $N=20, \delta = 0.0025, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.04$.

تأثير عدد القنوات:

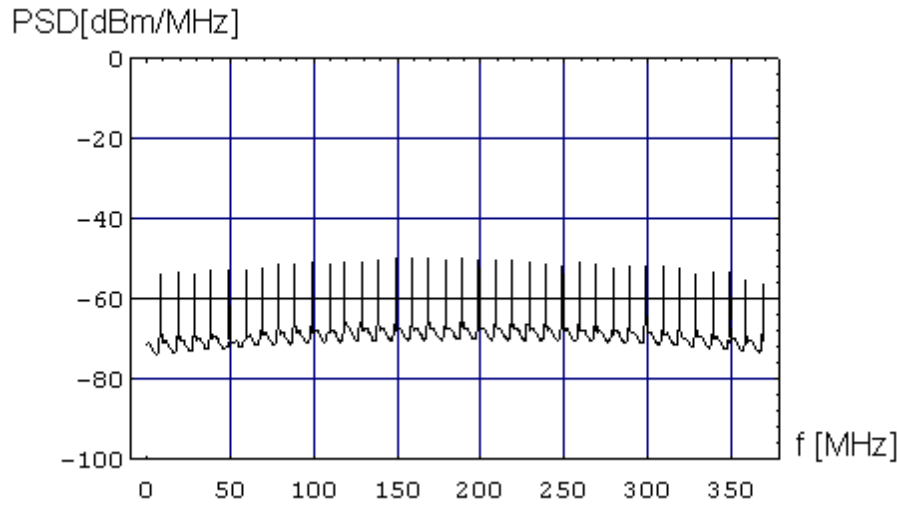
توضح الأشكال (1.1.6)، (2.1.6) و (3.1.6) أن قيمة كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه الناتج عن عدم خطية المعدل تتأثر بموضع القناة المرئية، وتتعلق بشكل مباشر بعدد القنوات التلفزيونية العاملة في النظام.



الشكل (1.1.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه، عند
 $N=25, \delta=0.002, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.02$.



الشكل (2.1.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه، عند
 $N=30, \delta=0.002, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.02$.



الشكل (3.1.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه، عند
 $N=35, \delta=0.002, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.02$.

تبيين الأشكال (1.1.6)، (2.1.6) و (3.1.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل عندما تكون $\delta=0.002, m=0.02, N=25, N=30$ و $N=35$ ، أن القيمة العظمى لاستطاعة الحامل مساوية على التوالي لـ $-56[\text{dBm}]$ ، $-53[\text{dBm}]$ ، $-50[\text{dBm}]$.
 كحقيقة علمية نستنتج أن زيادة عدد القنوات العاملة في النظام المدروس، سيؤدي إلى زيادة حتمية في قيمة التشويه الناتج عن عملية التعديل.

تأثيرات عامل التعديل:

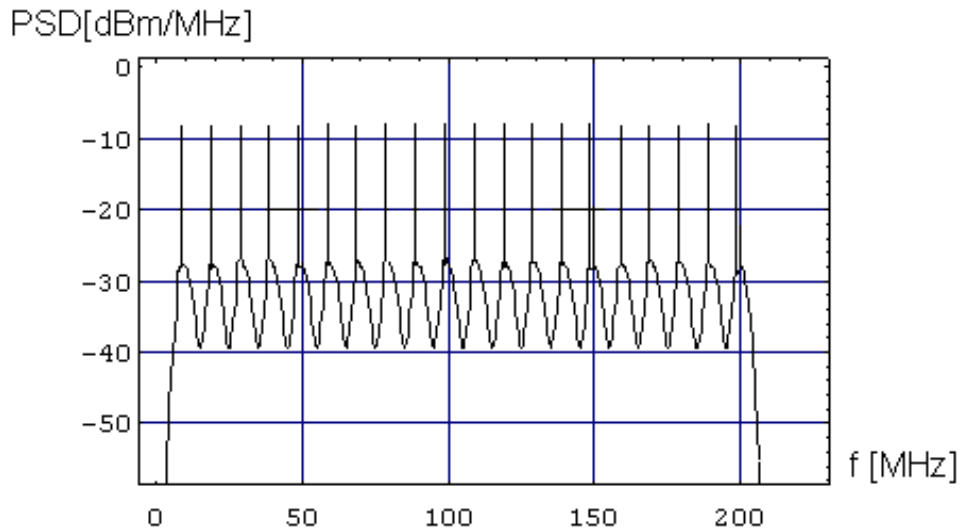
يتم تصميم نظم الاتصالات ذات الأمواج الحاملة الفرعية و التعديل المطالي بحيث إن القيمة المتوسطة لعامل التعديل تحقق العلاقة التالية [2]:

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

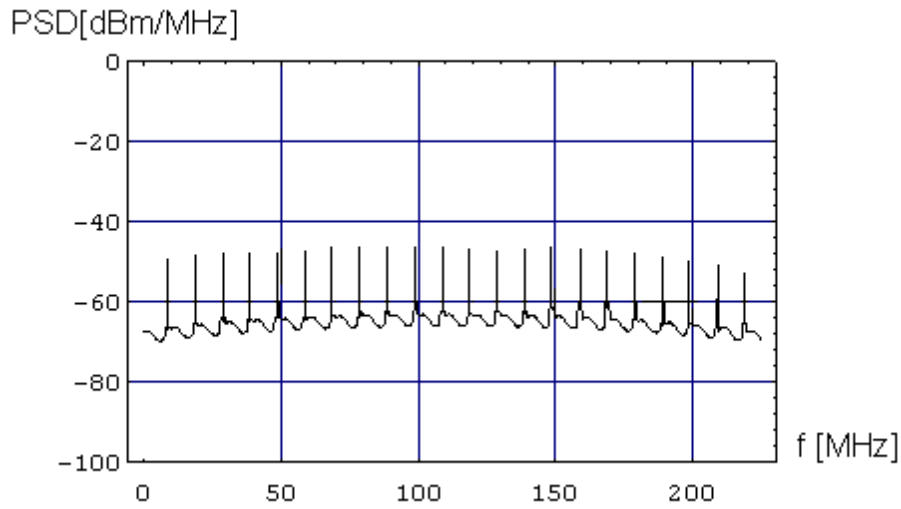
وهذا يعني أن عامل التعديل الإجمالي mN أقل من الواحد. و لكن من أجل قيم N الكبيرة يمكن أن تقترب القيمة الإجمالية لعامل التعديل من الواحد.

توضح الأشكال (1.2.6) و (2.2.6)، (3.2.6) و (4.2.6) كثافة طيف الاستطاعة للإشارة المرئية SCM AM/VSB و إشارة التشويه غير الخطية من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل، عندما يكون عامل التعديل مساوياً لـ 0.025 و 0.05 على التوالي.

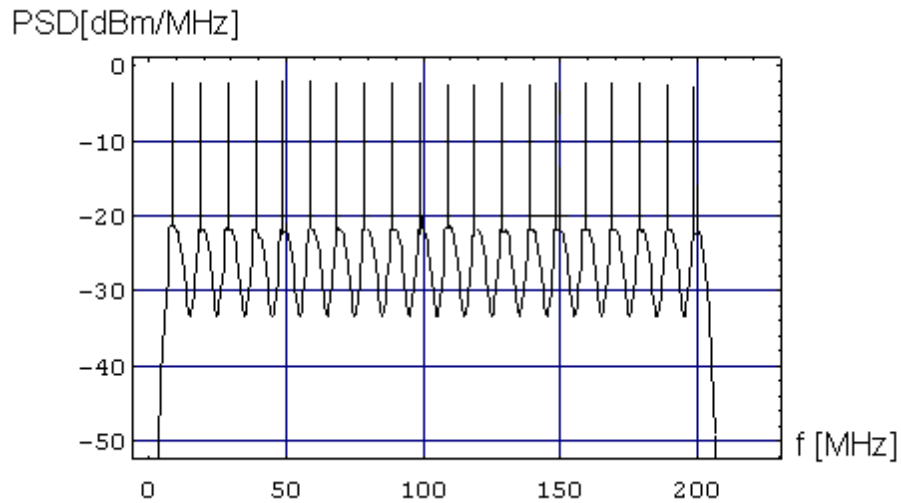
بمقارنة كل من الشكلين (1.2.6) و (3.2.6) نجد أن قيمة كثافة طيف الاستطاعة للإشارات المفيدة قد زادت تقريباً بمقدار 6dB و بمقارنة كل من الشكلين (2.2.6) و (4.2.6) نجد إن كثافة طيف الاستطاعة للتشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة يزداد بمقدار 18dB تقريباً. و بذلك، بإنقاص عامل التعديل فإن التأثيرات السلبية للتشويه يمكن أن تنقص أيضاً. إلا إن ذلك يؤدي إلى نقصان استطاعة الإشارة المفيدة. لهذا السبب هناك محددات لعوامل التعديل يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار.



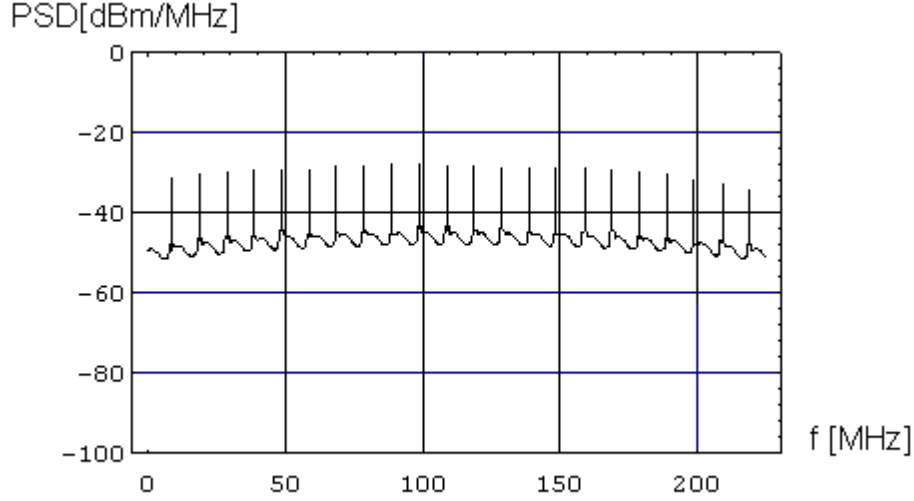
الشكل (1.2.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة المفيدة SCM AM/VSB المرئية، عند $N=20$, $\delta=0.005$, $B=10$ MHz, $S=5$ MHz, $m_i=0.025$.



الشكل (2.2.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويش، عند
 $N=20, \delta=0.005, B=10 \text{ MHz}, S=5 \text{ MHz}, m_i=0.025$.

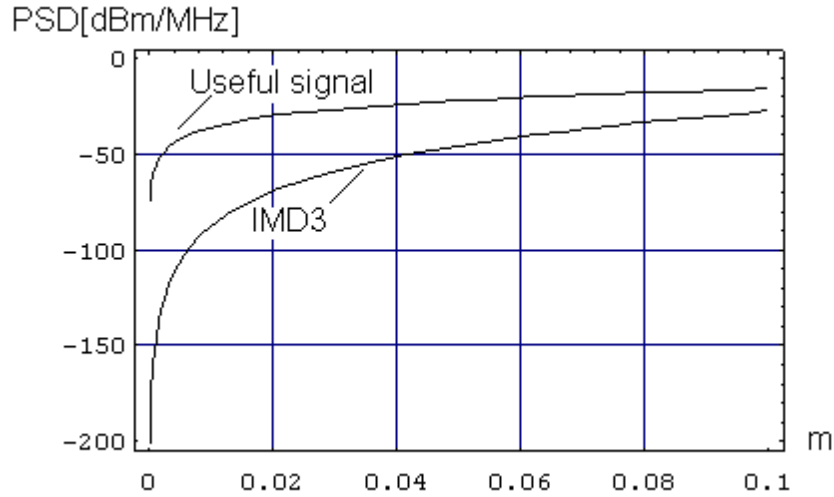


الشكل (3.2.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة المفيدة SCM AM/VSB المرئية، عند
 $N=20, \delta=0.005, B=10 \text{ MHz}, S=5 \text{ MHz}, m_i=0.05$.



الشكل (4.2.6) كثافة طيف الاستطاعة لإشارة التشويه، عند
 $N=20$, $\delta=0.005$, $B=10$ MHz, $S=5$ MHz, $m_i=0.05$.

بالتدقيق بالشكل (5.2.6) يمكن ملاحظة، أنه من أجل $\delta \ll 1$ ، يمكن زيادة عامل التعديل حتى 0.35 لكل قناة (N=20)، و تبقى قيمة استطاعة التشويه غير الخطي صغيرة جداً بحيث لا يكون لها أية تأثيرات سلبية على أداء النظام و يمكن إهمالها.

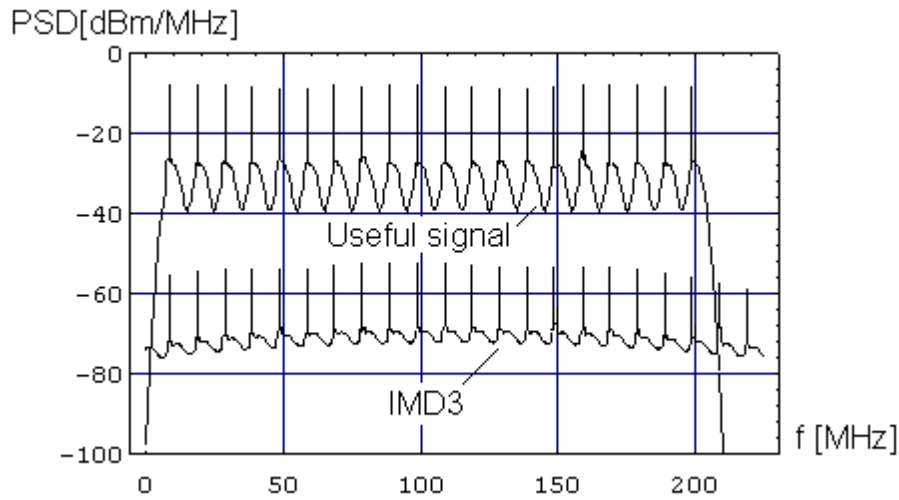


الشكل (5.2.6) كثافة طيف الاستطاعة العظمى لكل من إشارة التشويه و الإشارة المفيدة كتابع لعامل التعديل، عند
 $N=20$, $\delta=0.005$, $B=10$ MHz, $S=5$ MHz.

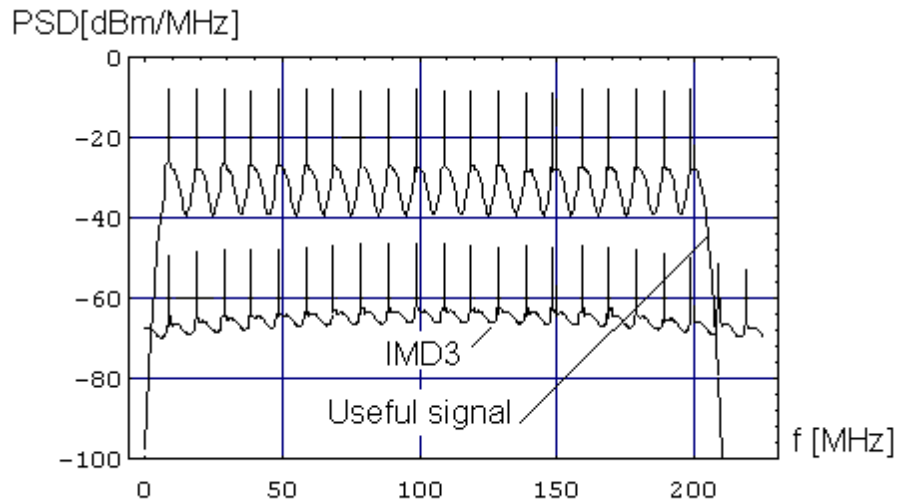
إذاً بزيادة عامل التعديل سوف تزداد استطاعة كل من الإشارة المفيدة و التشويه. لكن استطاعة التشويه سوف تزداد بشكل أسرع. لذلك فإن عامل التعديل يجب أن يتم اختياره بقيم مدروسة جيداً، من أجل الحصول على أداء جيد و عملٍ حسنٍ للنظام.

إنقاص التأثيرات السلبية غير الخطية الناتجة عن المعدل الضوئي:

إنقاص التأثيرات السلبية للتشويه يمكن أن يتم باستخدام المعدلات الخطية. في كل من الشكلين (1.3.6) و (2.3.6) تم رسم كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و التشويه كتابع للمجال الترددي للنظام، عندما تكون δ مساوية لـ 0.001 و 0.00125 على التوالي.



الشكل (1.3.6) كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و التشويه الناتج عن المعدل، عند $N=20, \delta=0.001, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.025$.

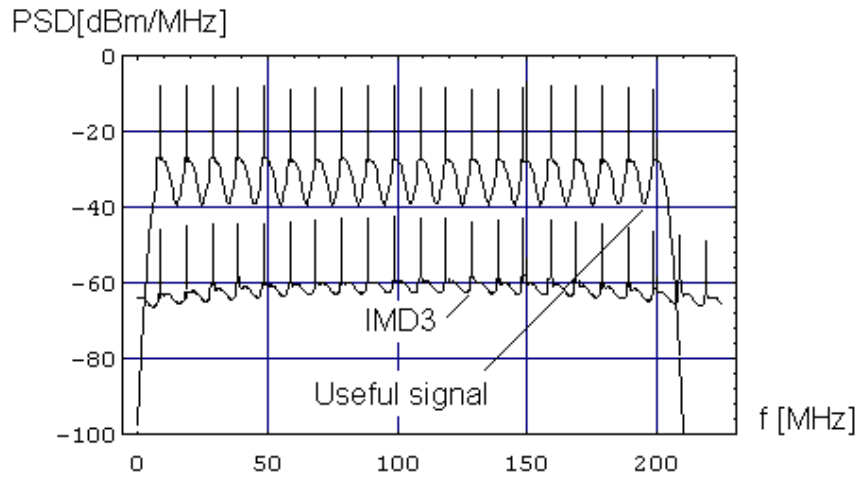


الشكل (2.3.6) كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و التشويه الناتج عن المعدل، عند $N=20, \delta=0.00125, B=10 \text{ MHz}, m_i=0.025$.

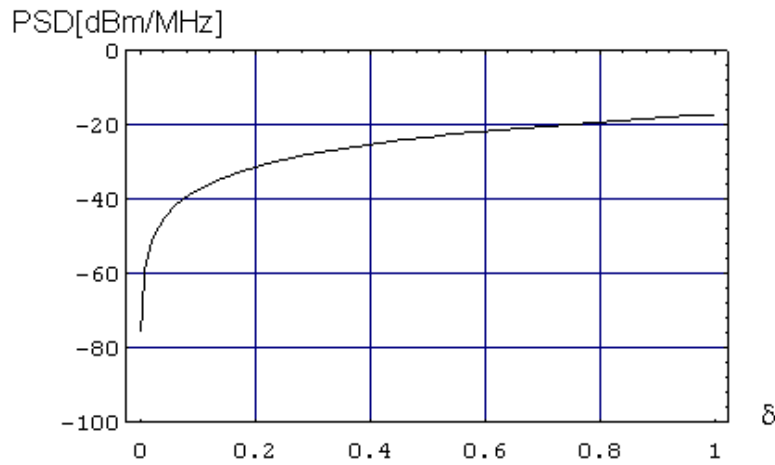
الشكل (1.3.6) يبين أن قيمة كثافة طيف الاستطاعة العظمى للتشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة والنتائج عن عملية التعديل تساوي تقريباً -70 dBm/MHz. في حين أن الشكل (2.3.6) يبين بوضوح أن قيمة كثافة طيف الاستطاعة للتشويه من الدرجة الثالثة تساوي تقريباً -64 dBm/MHz عندما تكون $N=20$. وهكذا عندما تكون $\delta < 0.00125$ إن التشويه الناتج عن عملية التعديل ليس له تأثيراً يُذكر على عمل و أداء نظام SCM AM/VSB CATV ذو الكشف المترابط، و بالتالي يمكن إهماله.

الشكل (3.3.6) يبين أن قيمة للتشويه مساويةً -60 dBm/MHz عندما تكون $\delta=0.0075$ و عدد القنوات $N=20$. بذلك نقول من أجل $\delta > 0.00125$ إن قيمة التشويه تؤثر على عمل و أداء النظام، لذلك يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار.

كنتيجة علمية أن قيمة التشويه تعتمد على كل من عاملي تصحيح الخطية δ و التعديل m ، و إنقاص كل من العاملين المذكورين يؤدي بصورة حتمية إلى إنقاص هذه القيمة.



الشكل (3.3.6) كثافة طيف الاستطاعة لكل من الإشارة المفيدة و التشويه الناتج عن المعدل، عند $N=20, \delta=0.0075, B=10$ MHz, $m_i=0.025$.



الشكل (4.3.6) كثافة طيف الاستطاعة العظمى لإشارة التشويه كتابع لعامل تصحيح الخطية δ ، عند $N=20, m_i=0.025, B=10$ MHz, $S=5$ MHz.

يوضح الشكل (4.3.6) القيمة العظمى لكثافة طيف الاستطاعة للتشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة كتابع لعامل تصحيح الخطية δ ، عندما تكون $N=20$ ، $B=10$ MHz و عامل التعديل مساوياً لـ 0.025 لكل قناة. بالتدقيق بالشكل (4.3.6) يمكن ملاحظة جيداً أنه بزيادة عامل تصحيح الخطية δ إن القيمة العظمى للتشويه تزداد أيضاً. وهكذا، عند زيادة عدد القنوات إن عامل تصحيح الخطية يجب أن ينقص من أجل المحافظة على عملٍ وأداءٍ جيدٍ للنظام.

كحقيقة علمية يجب أن يكون عامل تصحيح الخطية δ صغيراً بشكل يؤدي إلى إنقاص التشويه لقيمة يصبح كشف الإشارة غير متأثرة به.

النتائج:

من خلال التحليل الرياضي والدراسة الحاسوبية للنظام SCM AM/VSB CATV تبين لدينا بشكل واضح

ما يلي:

1. عند عمل المعدل الخارجي الضوئي AM/VSB على نقطة انحياز مساوية للصفر ($0=\phi_T$)، إن التشويه غير الخطي من الدرجة الثانية الناتج عن عملية التعديل يصبح مساوياً للصفر في حين أن التشويه غير الخطي من الدرجة الثالثة الناتج عن عملية التعديل يأخذ قيمةً عظمى.
2. لتحسين أداء و مردود النظام يمكن استخدام دارات خطية محددة في أنظمة الإرسال لتخفيض التأثيرات السلبية لتشويه التداخل الناتج عن عدم خطية المعدلات الليزرية الخارجية.
3. إن قيمة التشويه غير الخطي من الدرجة الثانية و الثالثة الناتج عن عملية التعديل تزداد بزيادة عدد القنوات العاملة في النظام.
4. تزداد قيمة التشويه غير الخطي الناتج عن عملية التعديل بزيادة عامل التعديل.

بناءً على تلك النتائج وبهدف إنقاص التأثيرات السلبية للتشويه غير الخطي الناتج عن عدم خطية المعدل وتحسين أداء النظام العام، نقترح:

- عمل المعدل الضوئي الخارجي عند نقطة انحياز مساوية للصفر ($0=\phi_T$).
- استخدام دائرة مصحح خطية قبل دائرة المعدل في نظام الإرسال.

المراجع:

1. Mikhaiel Salim Makhoul. Optical Frequency Modulation for Coherent Optical Subcarrier Multiplexing Transmission. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji*. 1996. 42, Z. 2, SS. 253-266.
2. Mikhaiel Salim Makhoul. Intermodulation Distortion Effects on the Bandwidth Frequency of the SCM AM/VSB CATC CD System. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji*. 1997. 43, Z. 4, SS. 443-472.
3. Mikhaiel Salim Makhoul. Using m-ary Digital Modulation for Coherent Optical Subcarrier Multiplexing SCM System. *Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji*. 1997. 43, Z. 2, SS. 239-256.
4. Moshe Nazarathy, Josef Berger, Anthony J. Ley, Israel M. Levi, and Yishai Kagan. Progress in Externally Modulated AM CATV Transmission Systems. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 11, No. 1, January 1993.
5. Richard B. Childs, And Vincent A. O'Byrns. Multichannel AM Video Transmission Using High-Power Nd:YAG Lasers and Linearized External Modulator. *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, Vol. 8, No. 7, September 1990.
6. Ligeng Xu, Robert Taylor, and Stephen R. Forrest. The Use of Optically Coherent Detection Techniques for True-Time Delay Phased Array and Systems. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 8, August 1995.
7. R. G. Walker and A. C. Carter. Electro-Optic Modulators In III-V Materials For Microwave Bandwidths. *SPIE Vol.995 High Frequency Analog Communications*, 1988.
8. Delfin Jay M.Sabido IX, Masafumi Tabara, Thomas K. Fong, Chung-Li Lu, and Leonid G. Kazovsky. Improving the Dynamic Range of a Coherent AM Analog Optical Link Using a Cascaded Linearized Modulator. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, No. 7, July 1995.