

تحسين أداء الاتصالات الضوئية المترابطة باستخدام الهزازات الليزرية

الدكتور مخائيل سليم مخول*

(تاريخ الإيداع 15 / 1 / 2007. قُبِلَ للنشر في 11/7/2007)

□ الملخص □

يتضمن بحثنا دراسةً لتأثير المضخمات والتحكم بالاستقطاب على أداء اتصالات الألياف البصرية المترابطة، ويقدم تعريفاً بمخطط صندوقي لنظام اتصال ضوئي مترابط جديد.

من خلال الدراسة الرياضية، والنمذجة لنظام الاتصال الليزري المترابط، تبين أن:

1. نظم اتصالات الألياف البصرية المترابطة تقدم حساسية مستقبلات، وانتقائية أفضل من نظم الكشف المباشر.
2. القدرة الضوئية الساقطة على الكاشف الضوئي تابعة لزاوية الاستقطاب $\cos \theta(t)$ بين الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي، ولتحقيق درجة عالية من الدقة في كشف الإشارة المفيدة فإن $\cos \theta(t)$ يجب أن يكون مساوٍ للواحد. لذلك يجب التحكم بالاستقطاب.
3. للمضخمات تأثير سلبي على نسبة الإشارة إلى الضجيج (*Signal to Noise Ratio, SNR*)، والهزازات الليزرية حلاً بديلاً.

الكلمات المفتاحية: المضخمات، الكشف المترابط، الكشف المباشر، الاستقطاب.

*أستاذ مساعد في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Improving the Performance of Coherent Optical Communications Using Laser Oscillator

Dr. Mikhael Salim Makhoul *

(Received 15 / 1 / 2007. Accepted 11/7/2007)

□ ABSTRACT □

Our paper contains a study of the effects of polarization control and amplifiers on the performance of the coherent detection optical systems. It also offers a new definition of the block diagram of the coherent system. Mathematical analyses and simulation of coherent system show that:

1. coherent optical communication systems potentially offer improved receiver sensitivity and channel selectivity over direct-detection techniques.
2. the optical power incident on the photodetector is a function of the polarization misalignment $\cos\theta(t)$ between the signal wave and local oscillator wave. To achieve a high degree of fidelity in the recovered signal, this term should remain constant and equal to one. Thus, polarization control is necessary.
3. the amplifiers have negative effects on the signal to noise ratio (SNR), thus, local laser oscillator is alternative solution.

Key Words: Amplifier, Coherent Detection, Direct Detection, Polarization.

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

1. مقدمة:

تمر نظم الاتصالات الضوئية الآن في المرحلة التي كانت عليها نظم الاتصالات الإلكترونية في نهايات القرن العشرين من حيث تطور الأجزاء المكونة لها وتسارعها نحو الوصول إلى أنظمة عالية الكفاءة تواكب المتطلبات المتزايدة التي يفرضها التطور الكبير في أنظمة الاتصالات، والحاجة المتزايدة لاستخدامها. التقانات التي تحول الفوتونات إلى إلكترونات ثم تعيدها إلى فوتونات تقلل أداء النظم وترفع أسعار أجهزتها بشدة أيضاً. لذلك اتجهت الدراسات نحو إيجاد نظم ضوئية لا تحتوي أي عناصر إلكترونية. وقد كانت الخطوة المهمة على الطريق نحو نظم ضوئية صرفه هي الاستعاضة عن المضخمات الإلكترونية بقطع من الليف المشوب بأيونات عنصر الأرييوم النادر، وسميت هذه القطع بالمضخمات الضوئية، ويعد أن تمكنا من تضخيم الإشارات فإن الشيء الذي نريده هو جمع أكبر عدد ممكن من أطوال الموجات في الليف مع تحميل كل طول موجة أكبر قدر ممكن من المعلومات، وتدعى التقنية التي تحقق ذلك التجميع الكثيف للحوامل الفرعية بتقسيم الطول الموجي.

يمكن أن تسبب عوامل مختلفة (الاهتزازات والانزياحات الصغيرة في درجة الحرارة، عدم استقرار الطور والتردد... إلخ) تغيرات عشوائية في الاستقطاب، والكشف المترابط يعتمد على التداخل بين حزمتي ضوء الإشارة والمذبذب المحلي، ولن تتداخل الحقول ما لم تكن مستقطبة بشكل مماثل تماماً. والحالة الخاصة من الكشف المترابط هي الكشف الهوموديني (Homodyne) الذي يحصل عندما يكون الفرق بين تردد الهزاز المحلي وتردد الإشارة المرسله معدوماً. كما يجب أن يكون الضوء وحيد اللون، وأن تكون الثنائيات الليزرية (Laser Diode, LD) مستقطبة بشكل خطي.

الفائدتان الأساسيتان لنماذج الاتصالات الضوئية المترابطة هما: حساسية المستقبل الكبيرة، والدرجة العالية من الانتقائية الترددية. إمكانية صنع نظم مترابطة في الواقع العملي تعتمد على ما يلي:

(a) إمكانية استخدام ثنائيات ضوئية مترابطة يمكن توليفها . (b) إمكانية ترميز البيانات على الحامل الضوئي.

(c) تطوير طرق عملية للتحكم بالاستقطاب في المستقبل.

حتى لو استطعنا حل جميع المشاكل التي تثقل كاهل هذه النظم، فإنه لا يزال علينا أن نواجه الحاجة إلى معالجة مشكلة مد الليف من علبة التوزيع الخارجية إلى غرفة المستثمر. لكن التكاليف العالية مازالت تعيق إيصال الألياف إلى البيوت، وحتى وقت متأخر كانت تكاليف إيصال الشبكات الضوئية المتطورة مرتفعة وهي مكلفة أكثر مما يستعد الكثيرون لدفعه.

2. هدف وأهمية البحث:

بالرغم من التكاليف العالية يبقى هدفنا استبدال المضخمات ببدايل ضوئية كالهزازات الليزرية المحلية (Local Oscillator, LO).

لن يحصل الكشف المترابط ما لم تكن حزمتا ضوء الإشارة المستقبلية والمذبذب المحلي مستقطبة بصورة متماثلة تماماً. مما جعل هدفنا أيضاً دراسة متطلبات الاستقطاب، وإيجاد دارات تعمل على استقراره وحذف الضجيج الناتج عنه.

3. الهزاز الليزري المحلي Nd:YAG

يجب أن يكون اختيار المصادر الضوئية مناسباً لأنظمة الاتصال، ومن العوامل الهامة التي يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار، الضجيج النسبي (Relative Intensity Noise, RIN)، واستطاعة الخرج لإشارة المرسل الضوئي والهزاز الليزري المحلي.

من الخصائص الهامة للمصادر الضوئية (Neodymium-Yttrium-Aluminum-Granet, Nd:YAG) مقارنة بالمصادر الضوئية الأخرى هي قلة كثافة الضجيج النسبي، وقلة ضجيج الإطلاق عند العمل ضمن المجال الترددي المحدد بمئات الكيلو هرتز. ومن أهم خصائص Nd:YAG التي تجعله مستخدماً في النظم الضوئية المترابطة [2, 3, 4]:

1. يتمتع باستطاعة خرج عالية تقدر بـ [200mW].
 2. يتميز بخرج ضوئي خطي الاستقطاب، ويعمل عند طول موجي [1319nm] و [1338nm].
 3. هو ذو ضجيج نسبي (RIN) مهمل ويقدر بحوالي [160dB/Hz].
 4. قيمة الضجيج العظمى عند التردد [80 kHz].
- يمكن أن يُستخدم المنبع الضوئي Nd:YAG عند طول موجي [1319nm] و [1338nm]، لذلك بعد اختيار التردد المناسب للعمل من الضروري حذف إحدى الحزمتين التردديتين. كما أن موثوقية تلك المصادر تعتمد بشكل أساسي على ظروف عمل نظام الاتصال وطبيعة تصنيع أنصاف النواقل المستخدمة. تُخزن المصادر Nd:YAG بدرجة حرارة $0^0 \sim 50^0$. وتعمل أكثر من 100000 ساعة تشغيل عند العمل الطبيعي بدرجة الحرارة $0^0 \sim 40^0 -$. إن تلك الخصائص تجعل اختيارنا للمصادر الضوئية Nd:YAG مناسباً للعمل كهزازات ليزرية محلية في نظم الاتصالات الضوئية المترابطة.

4. الكشف الضوئي المترابط:

لجعل الكشف المترابط ممكناً لا تؤخذ بعين الاعتبار عملية التداخل عندما يجمع الضوء الصادر عن منبعين ضوئيين مترابطين ليُرسل عبر ناقل ضوئي واحد. في الواقع العملي إن مطال إشارة الهزاز الليزري المحلي (LO) هو أكبر بكثير من مطال الإشارة المستقبلية، بينما الفرق في طول الموجة صغيراً نسبياً. عملية ضرب إشارتي الحامل والهزاز الليزري ذات التردد المتقارب ستولد إشارة ذات تردد ω_{IF} يدعى بالتردد المتوسط (Intermediate Frequency, IF). في النظم العملية من الصعوبة توليد إشارة IF المناسبة لعملية الكشف، والتيار الإلكتروني على خرج الكاشف الضوئي هو [1, 2]:

$$i(t) = R[A_{LO}^2 + A_s^2 + 2 A_{LO} A_s \cos(\theta)] \cdot \cos(\omega_{IF} t + Q_{IF}) \quad (1.4)$$

حيث إن R حساسية الثنائي الضوئي، A_{LO} و A_s مطال الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي على التوالي، θ زاوية الاستقطاب بين إشارة الهزاز المحلي والإشارة الضوئية المستقبلية، في حين أن $Q_{IF} = Q_{LO} - Q_s$ و $\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_s$ ، حيث ω_{LO} ، Q_{LO} و Q_s ، ω_s التردد الزاوي والطور لكل من إشارة الهزاز المحلي والإشارة الضوئية المستقبلية على التوالي.

و بمناقشة المعادلة (1.4) نجد أنها تتألف من ثلاثة حدود هي:

1. الحد الذي لا يحوي أي أثر لاستطاعة الهزاز المحلي RA_s^2 ، ويمكن أن يعتبر إشارة تيار الكشف المباشر.

2. الحد الذي يحوي استطاعة الهزاز الليزري المحلي RA_{LO}^2 .

في نظم الكشف المترابط يمكن أن نهمل الحد RA_s^2 نظراً لكبر التيار RA_{LO}^2 المستمر الناتج بتأثير الهزاز الضوئي المحلي LO، ومن الملاحظ أن التيار الناتج عن LO ليس له علاقة بزوايا الاستقطاب θ .

3. الحد الثالث هو إشارة التردد المتوسط المتولدة بفعل عملية الكشف الضوئية المترابطة.

من الملاحظ أن إشارة التردد المتوسط تعتمد على مطال وتردد وطور الإشارة المستقبلية، كما أنها تعتمد في نفس الوقت على زاوية الاستقطاب.

نظم الاتصالات المترابطة يمكن أن تستخدم كل من التعديل المطالي أو التعديل الترددي أو الزاوي. على كل حال مهما يكن شكل التعديل المستخدم فإن الإشارة المستقبلية سيحول ترددها إلى التردد المتوسط مع المحافظة على كل المعلومات المرسله في أثناء عملية التعديل.

يمكن أن نعتبر أن التداخل الترددي بين القنوات مهماً نظراً لعرض الحزمة الكافي لعملية الاستقبال. والريح (Gain, G) الحاصل في أثناء عملية الكشف الضوئي المترابط نلاحظه ببساطة بمقارنة كل من مطال إشارة الكشف المباشر ومطال إشارة التردد المتوسط، ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$G = \frac{2 R A_{LO} A_s \cos(\theta)}{R A_s^2} \quad (2.4)$$

$$G = \frac{2 A_{LO} \cos(\theta)}{A_s} \quad (3.4)$$

و إذا كانت $\theta = k\pi$ فإن:

$$G = \frac{2 A_{LO}}{A_s} \quad (4.4)$$

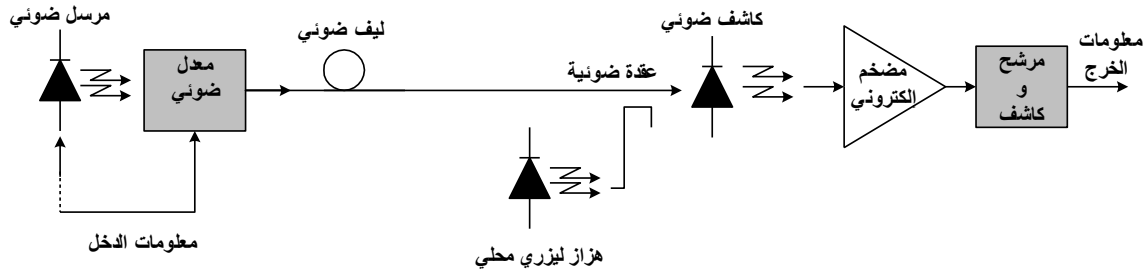
في الحالة العامة أن قيمة A_{LO} أكبر بكثير من قيمة A_s لذلك يكون الريح الحاصل ذو قيمة معتبرة.

5. بنية عمل النظم الضوئية المترابطة وآليتها:

يوضح الشكل (1.5) البنية الأساسية لنظم الألياف الضوئية المترابطة. للتبسيط نعتبر أن الحقل الكهربائي للإشارة المنقولة يُعطى بالعلاقة الرياضية التالية:

$$E_s = A_s \cos[w_s t + \phi_s(t)] \quad (1.5)$$

حيث إن A_s مطال الإشارة الضوئية المرسله، w_s تردد حامل الإشارة الضوئية، و $\phi_s(t)$ طور الإشارة الضوئية.



الشكل (1.5) البنية الأساسية لنظام اتصالات الألياف الضوئية المترابطة.

و لإرسال المعلومات يمكن تعديل إما المطال أو التردد أو الطور للحامل الضوئي. في نظام الكشف المباشر الإشارة الكهربائية تُعدّل مطالياً مستوى القدرة الضوئية للمنبع الضوئي، وبالتالي فإن القدرة الضوئية تنسب إلى مستوى تيار الإشارة. في المستقبل يتم تحويل الإشارة الضوئية القادمة إلى خرج كهربائي غير معدّل. والتيار I_{DD} المكشوف كشافاً مباشراً ينسب إلى الشدة، وبالتالي إلى مربع الحقل الكهربائي للإشارة الضوئية، ويُعطى بالعلاقة الرياضية التالية:

$$I_{DD} = \frac{1}{2} A_s^2 [1 + \cos(2\omega_s t + 2\phi_s)] \quad (2.5)$$

يتم التخلص من الحد $\frac{1}{2} A_s^2 \cos(2\omega_s t + 2\phi_s)$ في جهاز الاستقبال لأن تردده ضعفاً تردد الحامل

الضوئي. وتصبح المعادلة (2.5) في حالة الكشف المباشر على الشكل:

$$I_{DD} = \frac{1}{2} A_s^2 \quad (3.5)$$

في النظم الضوئية المترابطة يقوم المستقبل أولاً بإضافة موجة ضوئية مولدة محلياً إلى إشارة المعلومات في الدخل ثم يقوم بكشف ناتج المزج. توجد أشكال مختلفة لفك التعديل تعتمد على الكيفية التي يتم بها مزج الإشارة الضوئية مع إشارة الهزاز الليزري المحلي (و الذي يعطي كشف هيتروديني أو هوموديني) كما تعتمد على كيفية كشف الإشارة الكهربائية (إما بشكل متزامن أو لا متزامن).

من أجل التعديل الترددي (Frequency Modulation, FM) تكون المستقبلات الهومودينية (Homodyne) أكثر حساسية من المستقبلات الهيترودينية (Heterodyne) والكشف المتزامن أكثر حساسية من الكشف غير المتزامن.

إن مزج إشارة المعلومات مع إشارة المذبذب المحلي يتم على سطح الكاشف الضوئي (قبل أن يحدث الكشف الضوئي)، وإذا كانت إشارة الهزاز الليزري المحلي:

$$E_{LO} = A_{LO} \cos[\omega_{LO} t + \phi_{LO}(t)] \quad (4.5)$$

حيث A_{LO} هو مطال إشارة الهزاز المحلي، و ω_{LO} و ϕ_{LO} تردد الهزاز المحلي وطوره على التوالي. التيار

المكشوف I_{tot} يُعطى بالعلاقة التالية:

$$I_{tot} = (E_s + E_{LO})^2 \Rightarrow \quad (5.5)$$

$$I_{tot} = \frac{1}{2} A_s^2 + \frac{1}{2} A_{LO}^2 + A_s A_{LO} \cos[(\omega_s - \omega_{LO})t + \phi(t)] \cdot \cos \theta(t)$$

حيث $\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_{LO}(t)$ هي فرق الطور النسبي بين إشارة المعلومات القادمة وإشارة المذبذب المحلي. في حين أن الحد $\cos \theta(t)$ يمثل عدم الاستقطاب بين موجتي الإشارة والمذبذب المحلي.

بما أن الاستطاعة الضوئية $P(t)$ تتناسب مع الشدة فإن خرج الكاشف الضوئي يُعطى بالعلاقة:

$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos[(w_s - w_{LO})t + \phi(t)] \cdot \cos \theta(t) \quad (6.5)$$

حيث إن P_s و P_{LO} الاستطاعة الضوئية للإشارة المستقبلية والهزاز المحلي على التوالي. والتردد المتوسط هو فرق التردد الزاوي بين الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي $[w_{IF} = w_s - w_{LO}]$ ، وزاوية الطور $\phi(t)$ تعطي فرق طور تابع للزمن بين الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي. لاحقاً نناقش نوعين من الكشف المترابط الهوموديني (Homodyne Detection)، والهتروديني (Hetrodyne Detection).

• الكشف الهوموديني:

عندما تتساوى ترددات حامل الإشارة والهزاز المحلي تكون $w_{IF} = 0$ ويكون لدينا حالة خاصة من الكشف تدعى الكشف الهوموديني، وتكتب المعادلة (6.5) على النحو التالي:

$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos \phi(t) \cos \theta(t) \quad (7.5)$$

وهنا يمكن أن يكون التعديل إما تعديل (On-Off Keying, OOK) (تغيير مستوى الإشارة مع المحافظة على $\phi(t)$ ثابت)، أو تعديل (Phase Shift Keying, PSK) (تغيير الطور $\phi_s(t)$ للإشارة مع المحافظة على P_s ثابت) وذلك من أجل إرسال الإشارة.

نلاحظ أن الحد الثالث من المعادلة (7.5) يحتوي على الإشارة المرسل، وبما أن هذا الحد بازياد بازياد P_{LO} فإن الهزاز الليزري المحلي يتصرف بفاعلية كمضخم للإشارة، ويعطي حساسية استقبال أعظم من الكشف المباشر.

توضح المعادلة (7.5) إنه في الكشف الهوموديني لا حاجة إلى كشف تعديل كهربائي إضافي. وتعتبر المستقبيلات الهومودينية النظم المترابطة الأكثر حساسية، ولكنها من ناحية أخرى صعبة الصنع لضرورة التحكم بالمهتز المحلي بواسطة حلقة ضوئية مقلدة الطور، كما يجب أن يكون لكلا الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي نفس الترددات، وهي متطلبات صارمة وقاسية، وهذه المتطلبات تحقق عرض طيفي ضيق بشدة ودرجة عالية من إمكانية ضبط الموجة.

• الكشف الهيتروديني:

في الكشف الهيتروديني لا يكون التردد المتوسط معدوماً، ولا توجد حاجة إلى حلقة قفل طوري. وبالتالي فإن المستقبيلات الهيترودينية سهلة الصنع، ولكن لهذا التبسيط ثمن وهو انخفاض الحساسية بمقدار 3[dB] مقارنة بالكشف الهوموديني. أيضاً هنا يمكن استخدام تقنيات التعديل OOK أو PSK أو تعديل الإقفال بالتردد FSK (Frequency Shift Keying, FSK).

طالما $P_s \ll P_{LO}$ يتكون تيار الخرج من جزء مستمر i_{dc} يُعطى بالعلاقة التالية:

$$i_{dc} = \frac{\eta q}{h \nu} P_{LO} \quad (8.5)$$

و جزء تابع للزمن في مرحلة التردد المتوسط يُعطى بالعلاقة التالية:

$$i_{IF}(t) = \frac{2\eta q}{h \nu} \sqrt{P_s P_{LO}} \cos[w_{IF} + \phi(t)] \cdot \cos \theta(t) \quad (9.5)$$

حيث إن η كفاءة الكم، h ثابت بلانك، q شحنة الإلكترون، و ν التردد الضوئي (عرض الخط الليزري).
يتم ترشيح التيار المستمر في المستقبل، ويكبر التيار $i_{IF}(t)$ ليتم استخلاص المعلومات من التيار المضخم بواسطة تقنيات فك التعديل المعروفة.

6. متطلبات التحكم بالاستقطاب:

تُوضح العلاقات (1.4) و (6.5) و (7.5) و (9.5) أن تيار التردد المتوسط ما زال يعتمد على زاوية الاستقطاب (θ) . يأخذ تيار التردد المتوسط قيمته العظمى عندما تكون زاوية الاستقطاب بين الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي معدومة $(\theta = k\pi)$. لذلك من الضروري استخدام دارات التحكم بالاستقطاب في نظم الاستقبال المترابطة، في حالة التعامد بين الإشارة المستقبلية وإشارة الهزاز الليزري المحلي، تكون إشارة التردد المتوسط معدومة تماماً، وتكون زاوية الاستقطاب مساوية لـ $\theta = k\pi/2$. نحن نعتبر أن زاوية الاستقطاب يجب أن تكون معدومة مما يحقق ربحاً أكبر وأداءً أمثل للنظام.

إن القدرة الضوئية الساقطة على الكاشف الضوئي تكون تابعة لعدم انحياز الاستقطاب $\cos \theta(t)$ بين موجة الإشارة المستقبلية وإشارة المهتز الليزري المحلي. لتحقيق درجة عالية من الدقة في كشف الإشارة فإن $\cos \theta(t)$ يجب أن يكون مساوياً للواحد. لذا يجب أن تكون الثنائيات الليزرية المستخدمة مستقطبةً خطياً تماماً، كما يجب ألا تظهر مشكلة في الاستقطاب متعلقة بعناصر أخرى كالليف الضوئي.

حالة استقطاب المستقبل تتغير مع الزمن مع تحرك الليف. والاستقطاب المتذبذب الناتج يمكن أن يسبب تخامد وضياعات بالإشارة، مما يجعل التحكم بالاستقطاب ضرورة في نظم اتصالات الألياف البصرية المترابطة.

7. الضجيج:

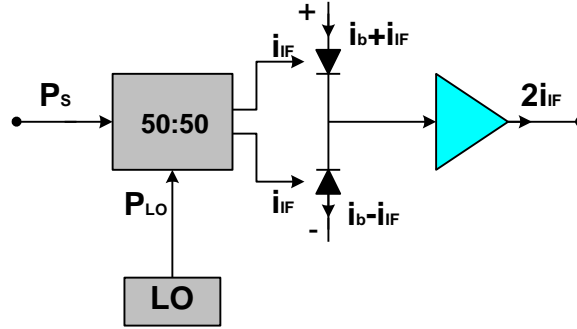
إن الضجيج هو إشارات غير مفيدة تجمع مع الإشارة مسببةً تغييراً غير مرغوب في الإشارة المفيدة يؤدي إلى قلة مردودها وسوء لأدائها وتخفيض جودتها مما يؤدي إلى حدوث أخطاء في نظام الاتصال. ويُقيم أداء نظام الاتصال بمعرفة نسبة الإشارة إلى الضجيج. من أنواع الضجيج، ضجيج الطلقات، الضجيج الحراري، ضجيج الأنماط، ضجيج المضخات، ضجيج الليزر، ضجيج التيار، الضجيج النسبي، وضجيج الخلفية... إلخ. **فضجيج الطلقات** ينشأ بسبب الطبيعة المتقطعة للشحن أو عن حوامل شحنة متقطعة تولدها الإشارات الضوئية في الكواشف الضوئية. أما **الضجيج الحراري** فينشأ داخل مقاومة الحمل R_L للكواشف الضوئية لأن الإلكترونات داخل أي دائرة إلكترونية لا تبقى ساكنة بسبب طاقتها الحركية، وتتحرك عشوائياً باستمرار دون تطبيق أي جهد، لذلك يكون التدفق الصافي لأي شحنة في أي لحظة باتجاه أحد القطبين عشوائياً مسبباً الضجيج الحراري. أما **ضجيج الأنماط** فهو تغيير عشوائي في القدرة الضوئية يحدث في الألياف الضوئية متعددة الأنماط أو الأساليب (Multi Mode Fiber). إذا كان المنبع الضوئي مترابطاً مثل ثنائي ليزر جيد فإن أنماط الليف تتداخل بعضها ببعض وتشكل نمطاً ملتخاً (نمط بقع) وتكون البقع مضيئة عندما يكون التداخل الصافي للأنماط جمعياً (حقول أنماط متفقة بالطور)، وتكون مظلمة عندما يكون التداخل الصافي طرماً (حقول أساليب مختلفة في الطور). ويجب تحديد قيمة ضجيج الأنماط تجريبياً. كما إن أجهزة أنصاف النواقل تقدم تياراً متأرجحاً ببطء يدعى **ضجيج التيار** أو ضجيج $1/f$ وينتج عند الترددات المنخفضة ويكون متناسباً مع $1/f$. يمكن أن يخفف ضجيج التيار حتى الحد الأدنى بتمرير الإشارات المكبرة خلال مرشح تمرير عالٍ. في حين

أن ضجيج الخلفية يمكن إلغاؤه من وصلات الليف لأنها تكون مغلقة كلياً. وسندرس في الفقرة التالية بشيء من التفصيل كل من الضجيج النسبي والزاوي.

8. الضجيج النسبي والزاوي:

1.8. الضجيج النسبي:

هو ضجيج يُضاف إلى الضجيج الناتج عن الكواشف الضوئية ويكافئ ما يقال عنه في الإلكترونيات بضجيج الإطلاق، ولحسن الحظ ليس من الصعوبة إنقاص تأثيراته السلبية في منابع الضوئية المترابطة. يوضح الشكل (1.8) آلية لإلغاء الضجيج النسبي [6, 11]. إن الاستطاعة الضوئية المستقبلية P_s والمولدة في الهزاز الليزري المحلي P_{LO} تُجمعان بواسطة وصلات، وتُوزعان على فرعين بنسبة 50% لكل فرع. إشارة التردد المتوسط i_{IF} المولدة في كلا الفرعين تكونان متعاكستين في الطور، وهذا يعني أن إشارة الضجيج النسبي متعاكسة في الطور في كلا الفرعين مما يؤدي إلى إلغائه أو إنقاصه لدرجة فيزيائية يمكن إهماله. أي خلل يؤدي إلى إزالة التوازن في الثنائيين الضوئيين المستخدمين في عملية الكشف يؤدي إلى زيادة الضجيج. تقدم دارات الكشف المتوازنة ممانعة مقبولة للضجيج النسبي وفعالية جيدة في المستقبلات الضوئية المترابطة. ومن المزايا الحسنة للمستقبلات المتوازنة أنها تتمتع بنسبة إشارة إلى ضجيج عالية نتيجةً لكبت الضجيج النسبي.



الشكل (1.8) الدارة المستخدمة في عملية الكشف المتوازن.

حتى يتحقق التوازن يجب أن تكون الثنائيات الضوئية المستخدمة في الكشف متماثلة من حيث تردد العمل، الوصلات، الحساسية، وطول أسلاك النواقل الضوئية المستخدمة في الوصل. كما يجب أن نؤكد أن كلا الثنائيين المستخدمين في مستقبلات الكشف المتوازن يجب أن يتلاءما في المطال والزاوية [5, 7].

على كل حال من المفترض أن التوازن محقق في المستقبلات الضوئية المتوازنة المستخدمة في نظم الاتصالات الضوئية المترابطة.

2.8. الضجيج الزاوي:

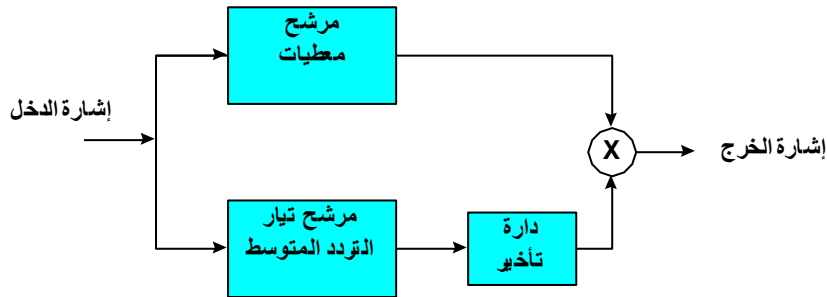
تُعتبر خواص الضوء المعيار الأساسي في تقييم أداء أنظمة الاتصالات الضوئية، وخصوصاً في أنظمة الكشف الضوئية المترابطة. الضجيج الترددي والزواوي في منابع الليزرية ظاهرة فيزيائية تشكل عائقاً في وجه زيادة مردود أنظمة الاتصالات الضوئية. الضجيج الزاوي الليزري يحدث بسبب حالات الإصدار العشوائية المستقلة لليزر

غير المتوافقة مع عملية الإصدار الضوئي. يتميز الضجيج الزاوي الليزري بطور عشوائي غير متفق مع حالة الإصدار الضوئي.

تستخدم الإشارة الضوئية المضبوطة التردد في أنظمة الاتصالات الضوئية، وهذا هو أحد أهم شروط الكشف المترابط ومتطلباته. يسبب الضجيج الزاوي في نظام الكشف المترابط زيادة عرض الطيف الترددي للإشارة المفيدة ويشوه بشكل جدي أداء تلك الأنظمة. طاقة الطيف للإشارة المفيدة المتأثرة بالضجيج الزاوي تُعطى بالعلاقة الرياضية التالية [7, 8, 9]:

$$S(f) = S_{NPN}(f) * G_{NP}(f)$$

حيث إن * تشير إلى الطي، $S(f)$ طيف الإشارة المتأثرة بالضجيج الزاوي، و $S_{NPN}(f)$ ، و $G_{NP}(f)$ يمثلان طيف الإشارة المفيدة دون تأثير بالضجيج الزاوي، والضجيج الزاوي على التوالي. يسبب الضجيج الزاوي تداخل بين القنوات المتجاورة. أن القناة الأولى والأخيرة في أي نظام اتصال متعدد الأقفنية تعانيان من التداخل بشكل أقل مما تعانیه بقية الأقفنية، لأن التداخل في عرض المجال الترددي لطيف تلك الأقفنية يكون من جهة واحدة، في حين أن باقي القنوات تعاني من التداخل من الجهتين. إن تصميمياً دقيقاً لدارة إلكترونية كما هو مبين في الشكل (2.8) يؤدي إلى حذف الضجيج الزاوي (Phase Noise Canceling, PNC) أو تقليله لدرجة إهماله [6].



الشكل (2.8) دارة حذف الضجيج الزاوي.

9. تأثير المضخات على أداء النظم الضوئية المترابطة:

1.9. تأثير المضخات الإلكترونية على أداء النظم الضوئية المترابطة:

يلي الكاشف الضوئي عادة مكبر يقوم بتقوية إشارة المستقبل إلى السوية المطلوبة وفي الحالة المثالية تضرب قدرتا الإشارة المفيدة والضجيج بعامل الريح المضخم G ، وتساوي نسبة الإشارة إلى الضجيج عند خرج المضخم تلك التي تكون عند مدخله [8, 13]. لسوء الحظ المضخات العملية لا تضاعف ضجيج الدخل فقط وإنما تنتج ضجيجاً خاصاً بها، وهذا ما يخفض نسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج (SNR) عند الخرج.

و إذا كانت درجة حرارة النظام عند استخدام مضخم عملي:

$$T_e = T + T_A \quad (1.1.9)$$

حيث إن T_A درجة حرارة ضجيج المضخم المكافئة، و T درجة عمل النظام عند عزل المضخم على التوالي.

رقم الضجيج F يعطى $F = 1 + \frac{T_A}{T_S}$ حيث T_S درجة حرارة مرجعية 290°K . وبناءً على ذلك فإن:

$$T_e = T + (F - 1) \cdot T_S \quad (2.1.9)$$

و عند $T = T_S$ نجد إن $T_e = F \cdot T$.

إن متوسط مربع تيار الضجيج الحراري ($i_{NT}^2 = 4kT \cdot \Delta f / R_L$) ، وبالتالي فإن استطاعة الضجيج الحراري المؤثر على الحمل R_L هي ($i_{NT}^2 \times R_L$) ، وتصبح استطاعة الضجيج الحراري بعد المضخم:

$$\overline{P_{NT}} = G \cdot (4k \cdot F \cdot T \cdot \Delta f) \quad (3.1.9)$$

حيث إن k ثابت بولتزمان، و Δf عرض النطاق الترددي للمستقبل.

و بحساب SNR بعد المضخم نجد:

$$SNR = \frac{G \cdot \overline{P_{ES}}}{G \cdot \overline{P_{NS}} + G \cdot \overline{P_{NT}}} = \frac{G \cdot \overline{P_{ES}}}{G \cdot \overline{P_{NS}} + G \cdot (4kFT \cdot \Delta f)} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NS}} + 4kFT \cdot \Delta f} \quad (4.1.9)$$

حيث إن $\overline{P_{ES}}$ استطاعة الإشارة المفيدة، $\overline{P_{NS}}$ استطاعة ضجيج الإطلاق، و $\overline{P_{NT}}$ الضجيج الحراري.

و على اعتبار إن SNR_0 قبل التضخيم تُعطى بالعلاقة الرياضية التالية [9, 11, 12]:

$$SNR_0 = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NS}} + \overline{P_{NT}}} = \frac{\overline{P_{ES}}}{\overline{P_{NS}} + 4kT \cdot \Delta f} \quad (5.1.9)$$

و بموازنة العلاقتين (4.1.9)، و (5.1.9) وبالأخذ بعين الاعتبار إن $F > 1$ نجد إن $SNR < SNR_0$.

إذاً المضخمات العملية تقدم ضجيجاً حرارياً يؤدي إلى نقصان نسبة الاستطاعة المفيدة إلى الضجيج مما

يؤدي إلى قلة كفاءة النظام وسوء أدائه.

2.9. تأثير المضخمات الضوئية على أداء النظم الضوئية المترابطة:

يبين الشكل (1.2.9) مخططاً لنظام اتصال ضوئي مترابطاً استخدمت فيه المضخمات الضوئية بدلاً من

المضخمات الإلكترونية.

عامل ربح الإشارة G يعطى بالعلاقة الرياضية التالية [3, 5]:

$$G = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_S}{(1 - G_S \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_S \sqrt{R_1 R_2} \cdot \sin^2 \phi} \quad (1.2.9)$$

حيث إن R_1, R_2 عوامل الانعكاس، و G_S ، ϕ يعطيان بالعلاقات الرياضية التالية على التوالي:

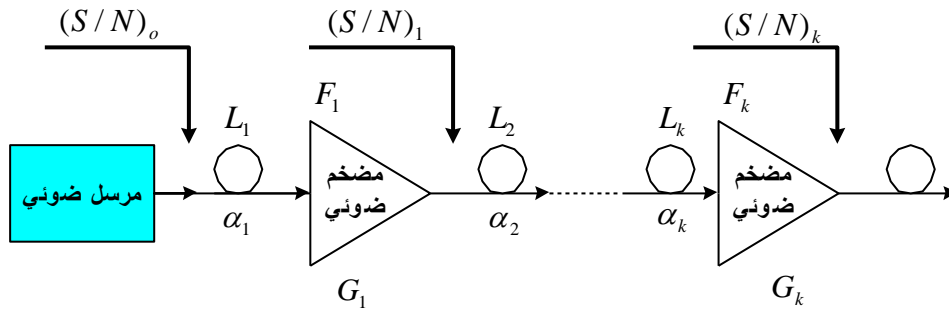
$$G_S = \exp[(\Gamma \cdot g_m - \bar{\alpha}) \cdot L] = \exp\left[\left(\frac{\Gamma \cdot g_0}{1 + I/I_S} - \bar{\alpha}\right) \cdot L\right] \quad (2.2.9)$$

$$\phi = \frac{2\pi n(v - v_0) \cdot L}{C} = \phi_0 + \frac{g_0 L \cdot b}{2} \left(\frac{I}{I + I_S}\right) \quad (3.2.9)$$

حيث إن ν تردد الإشارة المستقبلة، ν_0 تردد المضخم الضوئي، Γ عامل العزل، g_m عامل الريح المادي، $\bar{\alpha}$ عامل الامتصاص، L طول منطقة التضخيم الفعالة، g_0 عامل الريح غير النموذجي، I التيار الضوئي، I_s تيار الإشباع، n قرينة الانكسار، ϕ_0 زاوية الاستقطاب، ϕ انزياح طور الإشارة أثناء الانتشار، و b ثابت إضافي.
رقم الضجيج لجملة المضخمات F_{tot} يعطى بالعلاقة [3]:

$$F_{tot} = \frac{(S/N)_o}{(S/N)_k} = \frac{F_1}{\alpha_1} + \frac{F_2}{\alpha_1 \cdot G_1 \cdot \alpha_2} + \frac{F_3}{\alpha_1 \cdot G_1 \cdot \alpha_2 \cdot G_2 \cdot \alpha_3} + \dots + \frac{F_k}{\sum_{i=1}^{k-1} (\alpha_i \cdot G_i) \cdot \alpha_k} \quad (4.2.9)$$

حيث إن $(S/N)_0, (S/N)_1, \dots, (S/N)_k$ نسبة الإشارة إلى الضجيج لكل مرحلة على التوالي، F_1, F_2, \dots, F_k رقم الضجيج لجملة المضخمات على التوالي، $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ التخامد لكل مرحلة على التوالي، G_1, G_2, \dots, G_k الريح لكل مرحلة على التوالي، و L_1, L_2, \dots, L_k طول الليف البصري لكل مرحلة على التوالي.



الشكل (1.2.9) مخططاً لنظام إرسال ضوئي مترابط استخدمت فيه المضخمات الضوئية بدلاً من المضخمات الإلكترونية.

و عندما أخذنا بعين الاعتبار العوامل في الجدول التالي:

العامل	تعريفه	قيمه
g	عامل الريح المادي	$1000 [\text{cm}^{-1}]$
L	طول منطقة التضخيم الفعالة	$200 [\mu\text{m}]$
n	قرينة الانكسار	3.5
$R_1=R_2$	عامل الانعكاس	0.2%
$\bar{\alpha}$	عامل الضياع المادي	$23 [\text{cm}^{-1}]$
Γ	عامل العزل	0.3

و حين تساوي $G_s = 255$ ، توصلنا إلى النتائج التالية:

- الريح الأصغري G_{min} يساوي 111.4 ويكافئ بدوره 20.5[dB] عند زاوية استقطاب $\phi = 90^\circ$.
 - الريح الأعظمي G_{max} يساوي 1058 ويكافئ بدوره 30.2[dB] عند زاوية استقطاب $\phi = 0^\circ$.
- لذا لا يعتبر التضخيم في كثير من الحالات حلاً مميزاً والتحكم بالاستقطاب حاجة ضرورية للحصول على G_{max} ، ما يدفعنا إلى التفكير باستبدال المضخمات بالهزازات الليزرية العالية الاستطاعة إذا كان ذلك ممكناً، أو بربط عدداً من الهزازات الليزرية على التسلسل في حال عدم توفر هزازات ليزرية عالية الاستطاعة.

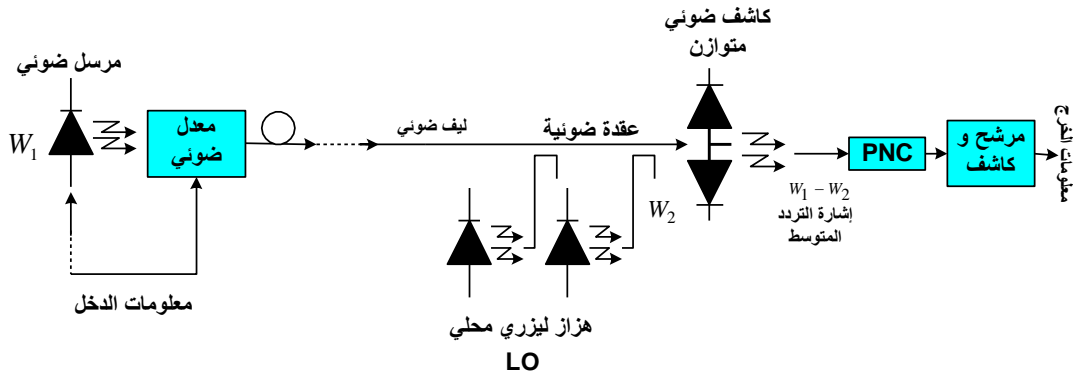
و كنتيجة عامة:

أولاً: تُقدم المضخمات الإلكترونية العملية ضجيجاً حرارياً يؤدي إلى نقصان SNR مما يؤدي بدوره إلى نقص كفاءة النظام وقلة مردوده.

ثانياً: تُقدم المضخمات الليزرية العملية ربحاً أعظماً عند العمل بزاوية انحياز $\phi = 0^\circ$.

من كل تلك الدراسة نصل إلى نظام مُقترح جديد لا يعاني الكثير من المشاكل التي تعاني منها النظم المترابطة المعروفة كما هو مبيناً على الشكل (2.2.9).

يبين الشكل (2.2.9) مخططاً لنظام اتصال ضوئي مترابط استخدمت فيه الهزات المحلية الليزرية بدلاً عن المضخمات، والكواشف المتوازنة بهدف تقليل الضجيج النسبي لدرجة يمكن إهمال تأثيره أو إلغاؤه، كما تم استخدام دائرة للتحكم بالاستقطاب وحذف الضجيج الزاوي (PNC) بهدف زيادة كفاءة النظام.



الشكل (2.2.9) مخططاً لنظام اتصال ضوئي مترابط استخدمت فيه الكواشف المتوازنة و الهزات المحلية الليزرية بدلاً عن المضخمات.

10. نسبة الإشارة إلى الضجيج:

يؤثر الضجيج الحراري، وضجيج الإطلاق بشكل أو بآخر على أداء أنظمة الاتصالات الضوئية، في حين أن مصادر الضجيج الأخرى يمكن إهمالها لقلّة تأثيرها أو لإمكانية إلغاؤها بالوسائل التقنية. نسبة استطاعة الإشارة المفيدة إلى الضجيج (SNR) غالباً ما تعتبر معياراً أساسياً لتقييم عمل وأداء نظم الاتصالات التمثيلية. وبالأخذ بعين الاعتبار المعادلتين (8.5)، و(9.5)، نجد إن [8, 10, 12]:

$$SNR = \frac{0.5 \left(\frac{\eta q}{hf} \right)^2 \cdot R_L P_{LO} P_s}{2q \cdot \Delta f \cdot R_L \left[\left(I_D + \frac{\eta q P_{LO}}{2hf} \left(1 + \frac{P_s}{P_{LO}} \right) \right) \right] + 4kT_e \cdot \Delta f} \quad (1.10)$$

حيث إن f تردد العمل للتنائي، Δf عرض الحزمة الترددي للمستقبل، I_D تيار الظلام، و R_L مقاومة الحمل.

عند قيم P_{LO} الكبيرة إن قدرة الضجيج الحراري أصغر من ضجيج الطلقات، وهذا الوضع يحصل عادة لأن LO موضوع بحوار المستقبل وإن P_{LO} لا تعاني من خسارات الانتشار والتوزيع والاقتران كما تعاني الحزمة المرسلة، وهكذا يكون [8, 10, 12]:

$$SNR = \frac{\eta q P_{LO}}{2hf \cdot \Delta f} \quad (2.10)$$

ومن الملاحظ أن SNR محكومة بضجيج الكم (الطلقات).

بتحليلنا للعلاقات الرياضية (1.10) و (2.10) نستنتج إن:

- أن SNR المحكومة بضجيج الكم ليست تابعة لـ T ، مما يعني ضرورة استخدام الهزازات الليزرية العالية الاستطاعة لزيادة كفاءة النظام.
 - الكواشف الضوئية المترابطة حساسة جداً وتقدم قيمة SNR مثالية حتى عند مستويات إشارة ضعيفة.
 - الكشف المترابط لا ينتج ضجيج فائضاً و يمكن بالفعل الحصول على SNR المحددة بالكم.
- إن الدراسات الروتينية لنسبة الإشارة إلى الضجيج تفترض سيطرة كل من الضجيج الحراري وضجيج الطلقات، وأنواع الضجيج الأخرى تهمل لقلّة تأثيرها بعد أخذ التدابير التقنية اللازمة لذلك، إلا أن التشويه التعديلي (Inter Modulation Distortion, IMD) يشكل أحد المعوقات المُلزمة للإشارة المفيدة منذ لحظة توليدها في جهة الإرسال لذا يجب أخذه بعين الاعتبار. نقترح في هذا البحث إضافة تأثير التشويه لإغناء عملية تقييم أداء النظام بحيث نسمي نسبة جديدة هي نسبة الإشارة إلى الضجيج والتشويه معاً (SNR_{IMD})، ويُعبر عن الشكل المقترح بالمعادلة [7, 11]:

$$SNR_{IMD} = \frac{\overline{P_{ES}}}{P_{NT} + P_{NS} + IMD} \quad (3.10)$$

سنناقش أثر كل من التشويه والضجيج على أداء كل من نظامي الكشف المباشر والمترابط، لذلك سندرس SNR و SNR_{IMD} كتابع للاستطاعة المرسلة عند قيم محددة لكل من مقاومة الحمل R_L ، عامل التعديل m ، وعرض النطاق الترددي للمستقبل Δf .

1. تأثير مقاومة الحمل على أداء النظام:

يوضح الشكلان (1-A) و (1-B) SNR و SNR_{IMD} كتابع للاستطاعة المرسلة لنظامي الكشف المباشر والكشف المترابط كليهما في حالة إهمال التشويه وحالة أخذه بعين الاعتبار عند $R_L = 50 [\Omega]$ ، و $R_L = 100 [\Omega]$ على التوالي. في حين أن باقي عوامل النظام تبقى نموذجية ثابتة.

دراسة المنحنيات الموضحة في الشكلين (1-A) و (1-B)، نجد إن:

أولاً: قيم SNR و SNR_{IMD} في النظام المترابط أعلى من مثيلاتها في نظام الكشف المباشر عند ذات المجال المدروس، وهذا يعني أن الكواشف المترابطة حساسة جداً وتقدم قيمة لـ SNR و SNR_{IMD} جيدة حتى عند مستويات إشارة ضعيفة على عكس الكواشف المباشرة ذات الحساسية المحدودة، التي تنتج قيماً لـ SNR متناسبة بشدة مع استطاعة الإشارة المستقبلية P_s .

ثانياً: عند تبديل $R_L = 50 [\Omega]$ بـ $R_L = 100 [\Omega]$ ، وجدنا أن قيم SNR_{IMD} و SNR قد زادت بمقدار 2.5[dB] في النظام المترابط، بينما في نظام الكشف المباشرة الزيادة التي طرأت على قيم SNR_{IMD} و SNR تقدر بـ 1.25[dB]. وهذا يعني أن النظام المترابط أكثر حساسية، وأن قيمةً لمقاومة الحمل ترفع أداء النظام لحالةً مثاليةً (حالة الموافقة).

ثالثاً: يتراجع أداء النظام ذو الكشف المترابط عند تأثره بالتشويه، وينخفض مستوى SNR_{IMD} عن مستوى SNR بمقدار 5[dB] عند نفس الاستطاعة المستقبلية P_s ، ويبقى هذا الفرق ثابتاً تقريباً على المجال المدروس، في حين أنه في نظام الكشف المباشر كان الفرق بين SNR_{IMD} و SNR متغيراً مع تغير الاستطاعة المرسلية وهو في أسوأ الحالات 3.85[dB] تقريباً. مما يعني إن كلا النظامين (المباشر والكشف والمترابط) يتأثران بالتشويه، وأن نظام الكشف المترابط أكثر حساسيةً للتشويه الذي تحمله الإشارة من لحظة منشئها (في المعدلات) كإشارة مفيدة حاملة للمعلومات. لذا عند تقييم أداء النظم يجب أخذ التشويه بعين الاعتبار [7, 14].

2. تأثير عامل التعديل على أداء النظام:

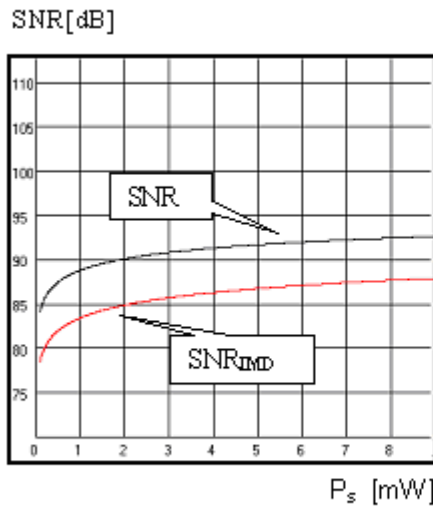
يوضح الشكلان (2-A) و (2-B) SNR_{IMD} و SNR كتابع للاستطاعة المرسلية لنظامي الكشف المباشر والكشف المترابط كليهما في حالة إهمال التشويه وحالة أخذه بعين الاعتبار عند $m = 0.4$ و $m = 0.8$ على التوالي. في حين إن باقي عوامل النظام تبقى نموذجية ثابتة.

بدراسة المنحنيات الموضحة في الشكلين (2-A) و (2-B)، نجد إن:

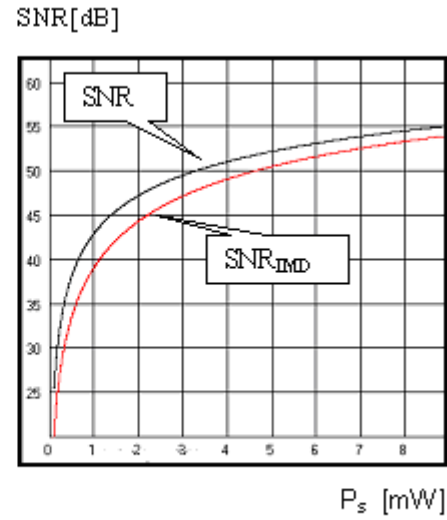
أولاً: في نظام الكشف المترابط تتغير قيم SNR_{IMD} و SNR ببطء مع زيادة P_s ، بينما في النظم المباشرة يكون تغير قيم SNR_{IMD} و SNR شديداً بزيادة P_s .

ثانياً: في النظام المترابط إن زيادة m بمقدارها 0.4 ترتفع مستوى SNR بمقدار 2.7[dB] تقريباً، بينما في نظام الكشف المباشر نفس الزيادة بـ m تؤدي لزيادة متغيرة في SNR تصل إلى 5[dB] تقريباً. لذا يجب اختيار m بشكل مدروس لتحقيق أداء أمثل لعمل النظام ($0 \leq m \leq 1$).

ثالثاً: تنقص قيم SNR_{IMD} عن SNR في نظام الكشف المترابط بحوالي 5[dB] على المجال المختار لاستطاعة إشعاع المنبع، بينما في نظام الكشف المباشر الفرق بين SNR_{IMD} و SNR لا يتجاوز 3.8[dB] في أسوأ حالاته، وهو غير ثابت على المجال المدروس من استطاعة المنبع. هذا يعني إن كلا نظامي الكشف المترابط والمباشر يتأثران بالتشويه، ونظام الكشف المترابط يتأثر بالتشويه أكثر من نظام الكشف المباشر.

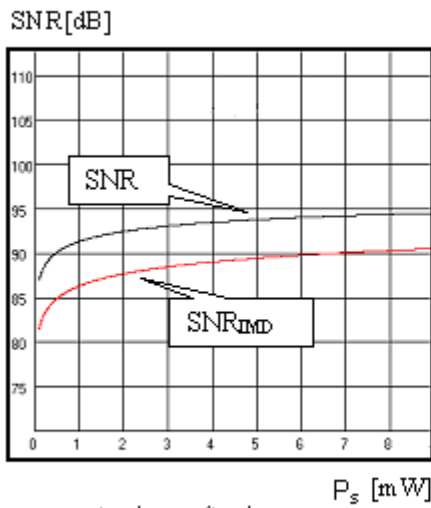


نظام الكشف المترابط.

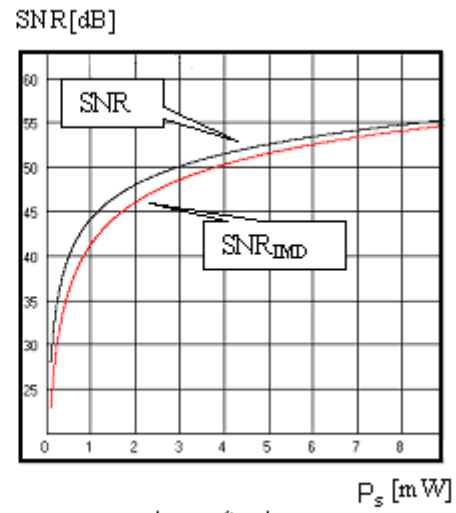


نظام الكشف المباشر.

شكل (1-A) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلية P_s عندما تكون $R_L=50[\Omega]$.

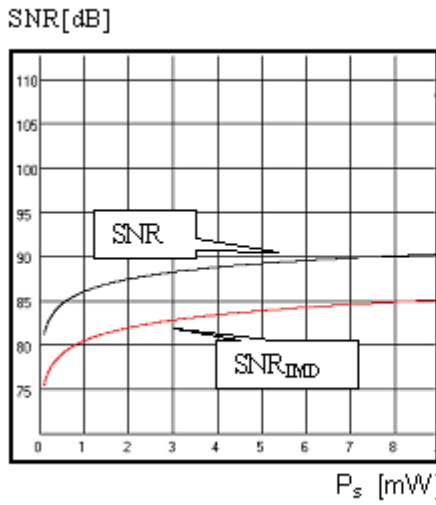


نظام الكشف المترابط.

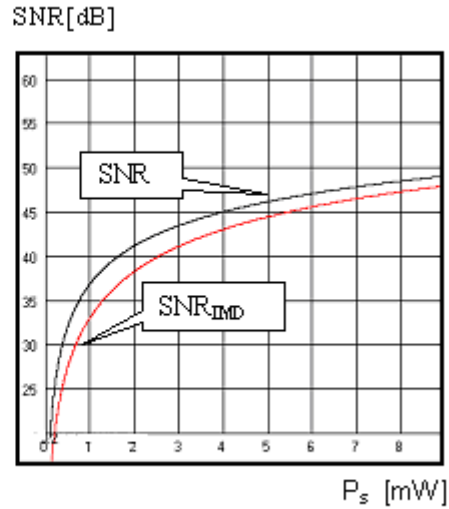


نظام الكشف المباشر.

شكل (1-B) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلية P_s عندما تكون $R_L=100[\Omega]$.

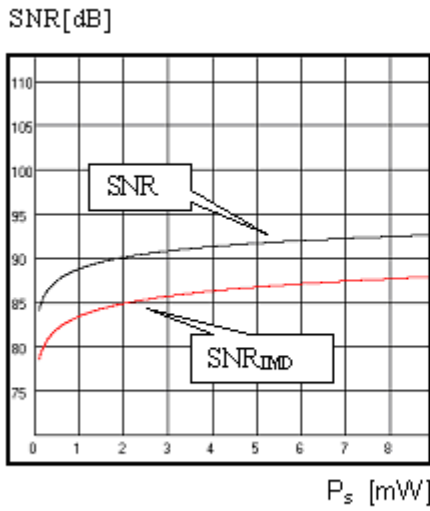


نظام الكشف المترابط.

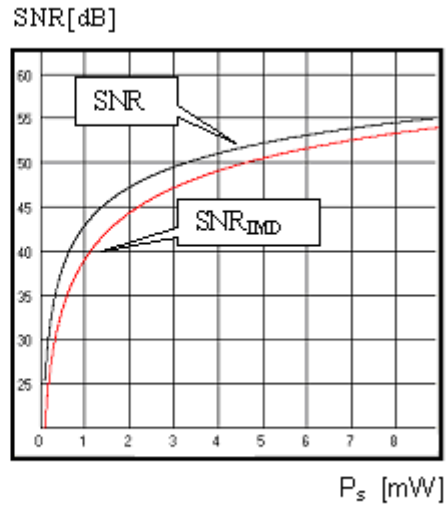


نظام الكشف المباشر.

شكل (2-A) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلية P_s عندما تكون $m=0.4$.



نظام الكشف المترابط.



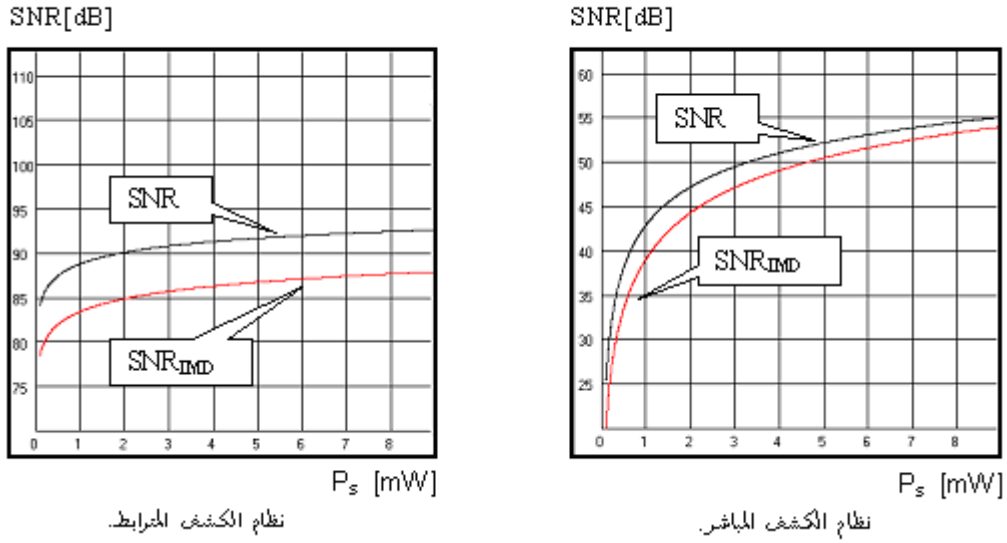
نظام الكشف المباشر.

شكل (2-B) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلية P_s عندما تكون $m=0.8$.

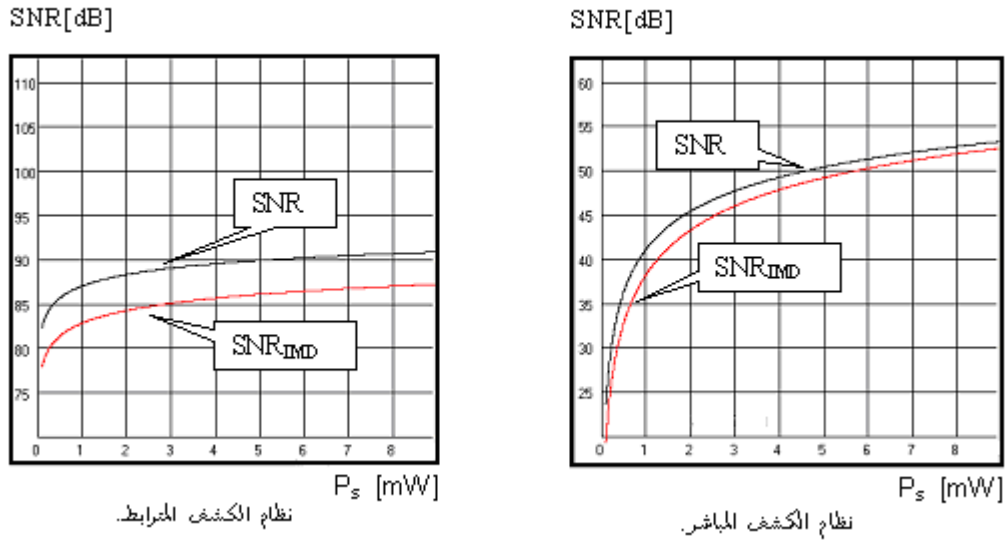
3. تأثير عرض المجال الترددي للمستقبل على أداء النظام:

يوضح الشكلان (3-A) و (3-B) دراسة لـ SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة المرسلية لكلا نظامي

الكشف المباشر والكشف المترابط في حالة إهمال التشويه وأخذ بعين الاعتبار عند $\Delta f = 10 [MHz]$ و $\Delta f = 15 [MHz]$ على التوالي. في حين أن باقي عوامل النظام تبقى نموذجية ثابتة.



شكل (3-A) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلة P_s عندما تكون $f=10$ [MHz].



شكل (3-B) SNR و SNR_{IMD} كتابع لاستطاعة الإشارة المرسلة P_s عندما تكون $\Delta f = 15$ [MHz].

بدراسة المنحنيات على الشكل (3-A)، و(3-B)، نجد أن:

أولاً: زيادة Δf تؤدي إلى إنقاص SNR، و SNR_{IMD} في كلا نظامي الكشف المباشر والكشف المترابط، وإن زيادة مقدارها 5[MHz] في النظام المترابط تؤدي إلى إنقاص SNR بحوالي 1.8[dB] تقريباً. أما في نظام الكشف المباشر فتؤدي ذات الزيادة (5[MHz]) في عرض المجال الترددي إلى إنقاص SNR بحوالي 1.75[dB].

تقريباً. ومن الملاحظ تقارب في درجة الحساسية بين النظامين، وإن زيادة Δf التي تهدف إلى عدم التداخل بين القنوات المتجاورة لا تعتبر حلاً لأنها لا تؤدي إلى زيادة ملحوظة في كفاءة النظام وتؤدي إلى نقصان عدد القنوات العاملة فيه [6, 7, 11].

ثانياً: عند قيمة تشويه ثابتة وزيادة Δf بمقدار 5 [MHz] تتناقص SNR_{IMD} عن SNR في نظام الكشف المترابط بمقدار 5 [dB]، بينما في نظام الكشف المباشر عند ذات التشويه مقدار تناقص SNR_{IMD} عن SNR متغيراً تبعاً لتغيير الاستطاعة المرسل.

و النتيجة إن كلا نظامي الكشف المباشر والمترابط يتأثران بعرض الحزمة الترددية للمستقبل، إلا إن النظام المترابط أكثر تضرراً من التشويه وتكاد تكون هذه هي الناحية السلبية الوحيدة لهذا النظام على وجه عام.

11. الاستنتاجات والتوصيات:

• الاستنتاجات:

1. نظام الكشف المترابط أكثر حساسية من نظام الكشف المباشر.
2. لا يعتبر استخدام المضخمات أنجح الحلول لزيادة كفاءة النظام في مستقبلات الكشف المترابط والمباشر كليهما.
3. تعاني مستقبلات الكشف المترابط والمباشر من التشويه غير الخطي.
4. تعاني مستقبلات الكشف المترابط من تعقيد في بنية النظام، وزيادة الكلفة في الإجمالية للمستقبل.
5. الثنائيات الليزرية يجب أن تكون وحيدة الأسلوب لتحديد متطلبات الاستقطاب. كما يجب أن يكون المرسل الليزري والهزاز المحلي عالي الاستطاعة، ومستقراً ترددياً حتى لا ينحرف عن التردد W_{IF} .
6. لتحقيق الترابط يجب أن تتطابق جبهتا الإشارة المستقبلة وإشارة الهزاز الليزري المحلي. كما يجب أن تكون الاستقطابات واتجاهات الانتشار ذاتها لكل من إشارتي المرسل الليزري والهزاز المحلي مما يجعل التحكم بالاستقطاب حاجة ضرورية.

• التوصيات:

1. استخدام الكواشف الضوئية المتوازنة في أنظمة الاتصالات المترابطة مما يحقق خرجاً ضوئياً مضاعف القيمة المفيدة، وحثافاً للضجيج النسبي (RIN).
2. استخدام دارات حذف الضجيج الزاوي (PNC) مما يحقق استقطاباً مميزاً، وكشفاً مترابطاً أمثل.
3. استخدام هزازات ليزرية محلية (LO) عالية الكفاءة والاستطاعة مما يجعل عملية الاستغناء عن المضخمات أمراً ممكناً.

و بذلك نصل إلى أن:

الهزازات الليزرية قد تكون حلاً بديلاً عن المضخمات الإلكترونية في الاتصالات الضوئية المترابطة. ما زالت الأبحاث والجهود مستمرة لتطوير مستقبلات غير حساسة بالاستقطاب، أو متنوعة الاستقطاب وغيرها، وما زال هناك الكثير من الأبحاث الواجب إنجازها لتطوير نظم الاتصالات الضوئية المترابطة.

المراجع:

1. ROY, Y., and JOSEPH, M. K. *Coded Modulation Techniques for Direct-Detection Optical Filter Communication Systems with Optical Amplifiers*, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 2004, 1-25.
 2. CHARLES, A. S.; RICHARD, J. F.; *Electric Circuit Analysis*, International Editions, Macmillan/McGraw-Hill, 1993, 772.
 3. GOVIND, P. A., *Fiber-optical communication system*, Wiley series in microwave and optical engineering, United States of America , 1992, 647
 4. QI, P.; ROGER, J.; *Amplitude Density of Infrequent Clipping Impulse Noise and Bit-Error Rate Impairment in AM-VSB/M-QAM Hybrid Lightwave Systems*, IEEE Transactions On Communications, VOL. 44, NO. 10, October 1996, 1329-1334.
 5. OH, T.-W.; SHIN, J.-H.; KIM, H.D.; LEE, C.-H., LEE, M. S.; and KIM, B.Y., *Bidirectional erbium-doped filter amplifier with non-reciprocal optical filter*, Electronics Letters, Vol. 37, NOL. 5, March 2001, 283-284.
 6. WALLE, H.; KILLAT, U., *Combinatorial BER Analysis of Synchronous Optical CDMA with Prime Sequences*, IEEE Transactions on Communication, VOL 43, NO. 12, December 1995, 2894-2895.
 7. MAKHOUL, M. S.; *Using m-ary Digital Modulation for Coherent Optical Subcarrier Multiplexing SCM System. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji*. 1997. 43, Z. 2, 239-256.
8. مخول، مخائل، تقليل التأثيرات السلبية لعدم خطية المعدلات الليزرية على أداء النظام الضوئي المترابط SCM AM/VSB CATV، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، 2005. 113-132.
9. MAKHOUL, M. S.; *Optical Frequency Modulation for Coherent Optical Subcarrier Multiplexing Transmission*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, 1996. 42, Z. 2, 253-266.
 10. KATIE, B.; *Modal In Optical Communication Systems*, Mount Holyoke College Physics Department, Summer 2000, 1-2.
 11. MAKHOUL, M. S.; *Intermodulation Distortion Effects on the Bandwidth Frequency of the SCM AM/VSB CATV CD System*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, 1997. 43, Z. 4, 443-472.
 12. SSANG-SOO, L.; SEUNG-WOO, S.; *New Construction of Multiwavelength Optical Orthogonal Codes*, IEEE Transactions On Communications, VOL. 50, NO. 12, December 2002, 2003-2007.
 13. CLIFFORD, H.; GOVIND, AGRAWAL, P.; *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*, Copyright 2005, Printed in the United States of America, 372.
 14. GERD, K.; *Optical Fiber Communications*, Copyright 1991, McGraw-Hill, Inc. New York, 461.