تقنية جديدة لمراقبة تشتت نمط الاستقطاب للألياف الضوئية باستخدام نغمة إشارة الساعة

الدكتور المهندس: حسام الوفائي مدرس في قسم هندسة الالكترونيات والاتصالات
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة حمص

ملخص البحث

يعد تشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion (PMD) للألياف الضوئية من أهم العوامل التي تؤدي إلى تشوه الإشارات الضوئية المرسلة، لهذا تُستخدم معوضات التشتت المتكيفة، وأجهزة مراقبة PMD للتخلص منه وتقليل تأثيره.

يوجد عدة تقنيات مقترحة لمراقبة PMD، من بينها التقنية المعتمدة على قياس استطاعة نغمة إشارة الساعة للإشارة المرسلة بعد الكشف الضوئي، والتي تتناسب مع تأخير المجموعة التفاضلي differential group delay (DGD) الذي يصف تشتت PMD. على الرغم من أن هذه التقنية تتسم ببساطتها، وزمن قياسها المنخفض، إلا أنها تعاني بشكل كبير من تأثير عوامل أخرى عليها كالتشتت اللوني، والزقزقة chirp، واستطاعة الإشارة المستقبلة، والضجيج.

تعتمد التقنية المقترحة في هذا البحث على إجراء تعديل على تقنية نغمة إشارة الساعة التقليدية، فبالإضافة لقياس استطاعة هذه النغمة (P_1) ، سيتم قياس استطاعة نغمة إشارة الساعة لنفس الإشارة ولكن مع إضافة تأخير DGD_{offset} عليها (P_2). تم إثبات أن نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 تتناسب مع DGD المراد قياسه، ولا تعتمد على العوامل الأخرى المذكورة أعلاه. كذلك تم التوصل إلى حساسية عالية للقياس في بداية ونهاية مجال القياس. تم استخدام برنامج المحاكاة VPI photonics لإثبات صحة عمل وحدة المراقبة وتحليل أدائها.

الكلمات المفتاحية : : تشتت نمط الاستقطاب ، تأخير المجموعة التفاضلي ، مراقبة تشتت نمط الاستقطاب ، نغمة إشارة الساعة ، برنامج المحاكاة VPI photonics.

New Technique for Monitoring the Polarization Mode Dispersion of Optical Fibers Using Clock Tone

Abstract

Polarization Mode Dispersion (PMD) of optical fibers is one of the most important factors that lead to distortion of transmitted optical signal, so adaptive dispersion compensators and PMD monitors are used to eliminate it and reduce its effect.

There are several proposed techniques for monitoring PMD، including the technique based on measuring the power of the clock signal tone of the transmitted signal after optical detection, which is proportional to the differential group delay (DGD) that describes PMD dispersion. Although this technique is characterized by its simplicity and relatively low measurement time, it suffers greatly from the influence of other factors such as chromatic dispersion، chirp، received signal power, and noise.

The proposed technique in this research depends on modifying the traditional technique for the clock signal tone، so in addition to measuring the power of this tone (P_1) the power of the clock signal tone for the same signal will be measured but with the addition of a DGD_{offset} delay (P_2). The power ratio P_1/P_2 was proven to be related to DGD، and not dependent on other factors mentioned above. High sensitivity of measurement at the beginning and end of the measurement range was also achieved. The VPI photonics simulator was used to validate the operation of the monitoring unit and analyze its performance.

Keywords: Polarization mode dispersion (PMD) , polarization mode dispersion (PMD) monitoring, differential group delay (DGD), optical fiber communication, VPIphotonics.

1-مقدمة

نظرًا لمعدل البيانات الضخم الذي تدعمه شبكات الألياف الضوئية، فمن الأهمية بمكان التركيز على التحكم بأعطال أجهزة الشبكة وتحسين موثوقيتها. فقد يتسبب فشل أحد أجزاء الشبكة إلى خسارة كبيرة للبيانات، مما يؤدي إلى تعطيل حرج لخدمات الشبكة وخسارة هائلة في الإيرادات [1].

تتدهور معلمات جودة الإرسال quality of transmission (QoT) تدريجيًا مع مرور الزمن، وهو ما يعرف بالفشل الناعم soft failure في الشبكة، والذي قد يؤدي في النهاية إلى حدوث فشل كامل للشبكة. لذلك فإن كشف حدوث الفشل الناعم، وتحديد سببه، ومعرفة جزء الشبكة المسبب للخلل (أي تحديد الموقع) أمر مرغوب فيه للغاية لمنع سيناريوهات فشل الشبكة [1].

تعرف التقنيات التي يمكن من خلالها كشف الفشل وقياس وتقدير المعلمات الفيزيائية المختلفة للإشارات بتقنيات مراقبة الأداء البصري Optical Performance Monitoring (OPM). تتضمن المعلمات الشائعة التشتت اللوني Chromatic Dispersion (CD)، وتشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion (PMD)، ونسبة الإشارة الضوئية إلى الضجيج Optical Signal to Noise Ratio (OSNR)، وعامل الجودة Q-factor ، والفقد المعتمد على الاستقطاب Polarization-dependent loss (PDL)، وعدم خطية الألياف. يتيح معرفة معلمات جودة القناة إمكانية تعويضها والتحكم بها بشكل فعال [2].

مع انتقال الشبكات الضوئية حالياً لمعدلات نقل أعلى من 10Gb/s أصبح العامل المحدد الرئيسي في هذه الأنظمة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ويجب أخذه في الاعتبار. وأصبح من الضروري تعويضه بشكل تكيفي خصوصاً أن قيمته متغيرة مع الزمن [3]. يتطلب التعويض التكيفي إشارة تغذية عكسية عن القيمة الفعلية لتشتت PMD. وهو ما تقوم به وحدة مراقبة PMD.

تم في الآونة الأخيرة اقتراح العديد من التقنيات لمراقبة تشتت PMD. تم في الأبحاث [4,5,6] إضافة نغمة دليلية مع الإشارة الضوئية المرسلة. تتعرض هذه النغمة لنفس عوامل

تدهور الأداء التي تتعرض لها الإشارة الضوئية أثناء عبروها لليف، وهذا ما يمكن استغلاله لقياس بارامترات الأداء المختلفة بما فيها تشتت PMD. يقترح البحث [7] إرسال زوج من نغمات القيادة ضمن محوري استقطاب الإشارة، لتتأثر بعوامل ضعف القناة بما فيها تشتتPMD وبالتالي إمكانية قياسه. تمتاز التقنيات السابقة ببساطة تنفيذها وسرعة استجابتها، ولكن تتطلب عزل بارامترات الأداء المختلفة عن بعضها البعض، وإضافة تعديل على المرسل لإرسال النغمة. في البحث [8] تم استخدام زوج من أجهزة الاستقبال المتماسكة ذات النطاق الترددي المنخفض واثنين من الليزر المحلي لمراقبة بارامترات OPM. على الرغم من إمكانية مراقبة عدة بارامترات بنفس الوقت إلى أنها ذات تعقيد كبير وتكلفة مادية عالية. وفي البحث [9] تم استخدام طريقة مراقبة حالة الاستقطاب (SOP) بدقة عالية للطول الموجي استنادًا إلى تشتت بريلون المحفز Stimulated Brillouin Scattering (SBS) في الألياف الضوئية لمراقبة تشتت PMD. أما البحث [10] فيعتمد على أخذ عينات من مركبتي استقطاب الإشارة وتشكيل مخطط توزيع إحصائي ثنائي البعد لقياس تشتت PMD. تتطلب هذه التقنية أخذ عدد كافٍ من العينات، وهذا ما يزيد من زمن القياس. تم استخدام الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة لمراقبة الأداء الضوئي في الأبحاث [11,12,13,14,15]. تستخدم هذه التقنيات مخططات التوزيع الإحصائية، أو مخطط العين كبيانات تدريب. بالرغم من أنها أثبتت تنبؤاً دقيقًا للعديد من بارامترات الأداء إلا أنها تتطلب تدريباً جيداً، وكماً هائلاً من بيانات التدريب خصوصاً مع الأنماط العديدة من التعديلات الضوئية، كما أن استجابتها الزمنية منخفضة لأنها تعتمد على أخذ عينات من الإشارة المطلوب مراقبتها.

2-هدف البحث

يهدف البحث إلى تقديم طريقة جديدة لمراقبة تشتت نمط الاستقطاب في الألياف الضوئية بالاعتماد على تقنية قياس استطاعة إشارة الساعة التقليدية، ولكن مع إجراء تعديل عليها بحيث يتم التخلص من العوامل الأخرى المؤثرة عليها كالتشتت اللوني، والزقزقة، ومستوى استطاعة الإشارة المراقبة، والضجيج.

3-أهمية البحث

من المتوقع في شبكات الليف الضوئية مستقبلاً أن تصبح أجهزة مراقبة الأداء الضوئي (OPM) جزءاً لا يتجزأ منها لما ستوفره من معلومات دقيقة عن حالة الشبكة. لهذا هناك اهتمام كبير من قبل الباحثين لتطوير هذه التقنيات.

من بين البارامترات المطلوب مراقبتها في الشبكات الضوئية تشتت نمط الاستقطاب خصوصاً عندما العمل مع معدل بتات عالٍ ومدى إرسال كبير. عموماً تواجه تقنيات مراقبة PMD تحديات عديدة تتمثل بضرورة عزل بارامترات الأداء عن بعضها، وأن تكون ذات بنية بسيطة، وتكلفة منخفضة، وأن تراعي متطلبات نظام الاتصال الضوئي من حيث مجال القياس والحساسية. انطلاقاً من ذلك فقد تم العمل في هذا البحث على تقديم طريقة جديدة لمراقبة PMD بحيث تأخذ بعين الاعتبار القيود والتحديات المذكورة أعلاه.

4-المواد وطرق البحث

تم إجراء البحث وفق المراحل التالية:

- تم في البداية تقديم شرح موجز عن تشتت نمط الاستقطاب للألياف الضوئية.
- بعد ذلك تم عرض أهمية مراقبة تشتت نمط الاستقطاب في شبكات الألياف الضوئية، وضرورة تعويضه بشكل فعال.

-في المرحلة التالية تم توضيح مبدأ عمل تقنية المراقبة المعتمدة على نغمة إشارة الساعة التقليدية.

-بعد ذلك تم توضيح تقنية المراقبة المقترحة في هذا البحث.

- أخيراً تم تصميم نموذج وحدة المراقبة المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة الضوئي VPIphotonics، واختبار صحة عملها، وتحليل تأثرها بالعوامل الأخرى.

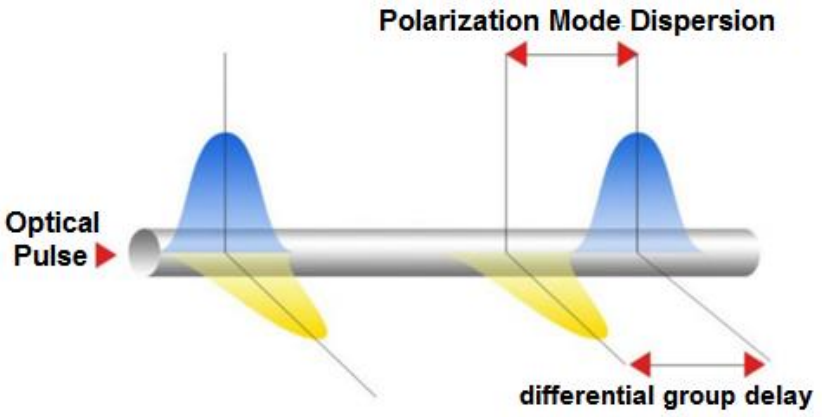
5-تشتت نمط الاستقطاب PMD

تنتقل الإشارة في الليف الضوئي على شكل موجة كهرومغناطيسية، والتي تتكون من حقلين كهربائي ومغناطسي. يتنشر الحقلان على شكل مركبتي استقطاب متعامدتين

على طول كل من المحورين X و Y. عملياً لا يقدم الليف قرينة انكسار متطابقة لكل منهما وذلك لعوامل عديدة تتعلق بعدم وجود تناسق في الشكل الهندسي لنواة الليف (لا تأخذ النواة شكلاً دائرياً تماماً)، بالإضافة إلى ما يتعرض له الليف بعد تركيبه من ضغط وانحناء. تعرف هذه الخاصية بازدواجية الانكسار birefringence ، والتي تؤدي إلى انتشار المركبتين بسرعات مختلفة قليلاً، مما يؤدي إلى تمدد النبضة كما هو موضح في الشكل (1)، وتسمى هذه الظاهرة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) [3,16,17,18]. تسبب ازدواجية الانكسار birefringence إلى فرق طوري ما بين المحورين والذي يعطى وفق العلاقة التالية [3] :

$$\Delta\beta = \frac{2\pi n_s}{\lambda} - \frac{2\pi n_f}{\lambda} \qquad (1)$$

n_s : قرينة انكسار المحور الأبطأ ، n_f : قرينة انكسار المحور الأسرع ، λ : طول موجة الإشارة المنشرة.



الشكل (1) : تمدد النبضة الضوئية بسبب تشتت PMD لليف [16] .

التأثير الإجمالي لخاصية الازدواج الانكساري birefringence تتمثل بحدوث تأخير ما بين بين حالتي الاستقطاب في الألياف الضوئية يُعرف باسم تأخير المجموعة التفاضلي differential group delay (DGD). يأخذ DGD قيمة متغيرة مع الزمن بسبب العوامل البيئية الخارجية المختلفة مثل درجة الحرارة والضغط الميكانيكي، ويرتبط مع طول الموجة الضوئية، ويتناسب مع الجذر التربيعي لطول الليف، وذلك بسبب التغيرات

العشوائية لقرائن الانكسار للمركبتين المستقطبتين والتي تجعل من عملية مراكمة DGD مع المسافة تتم بشكل غير خطي، ويمكن حسابه وفق العلاقة التالية [17]:

$$DGD = D_{PMD}\sqrt{L} \qquad (2)$$

D_{PMD}: معامل تشتت نمط الاستقطاب ويقاس بواحدة $ps.km^{-1/2}$. وهو تابع لبنية الليف، ويأخذ عموماً قيمة ضمن المجال $[0.1-1]\ ps.km^{-1/2}$. L: مسافة انتشار النبضة أو طول الليف [3]

في المعايير المتعلقة بخطوط المسافات الطويلة، لا ينبغي أن يكون الحد الأقصى المسموح به لمتوسط تأخير المجموعة التفاضلي أكثر من 10% من فترة بت [3].

6- أهمية مراقبة وتعويض تشتت نمط الاستقطاب

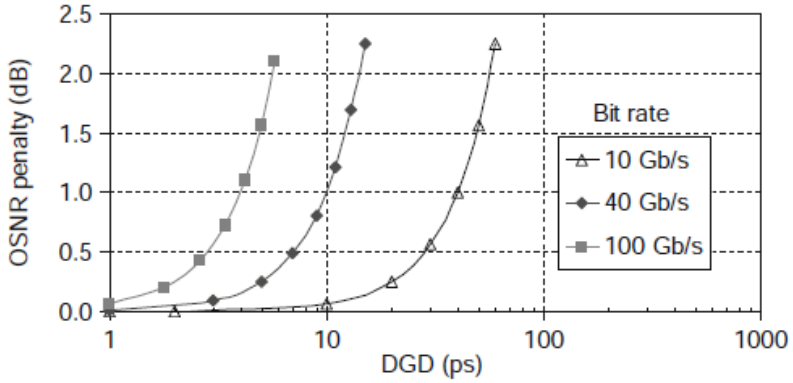
بالنظر إلى PMD الناتج عن الألياف الضوئية فقط يمكننا تحديد القيمة المسموح بها لـ DGD لمعدلات بت مختلفة، والحد الأقصى لطول الألياف ذات معاملات PMD المختلفة كما هو موضح في الجدول (1). لم يتم الأخذ بعين الاعتبار العناصر الأخرى التي تُحدث تغييرات كبيرة في PMD، مثل الموصلات، والمضخمات، ومعوضات التشتت، والعوازل، ومجمعات طول الموجة [3].

الجدول (1): محدودية مسافة الإرسال بسبب تشتت PMD [3].

معدل البت (Gb/s)	فترة البت (ps)	القيمة المسموحة لـ DGD (ps)	طول الليف الأعظمي من أجل معاملات تشتت مختلفة (Km).		
			D_{PMD}=1 $ps.km^{-1/2}$	D_{PMD}=0.2 $ps.km^{-1/2}$	D_{PMD}=0.1 $ps.km^{-1/2}$
2,5	400	40	1600	40000	160000
10	100	10	100	2500	10000
40	25	2.5	6	160	625

يوضح الشكل (2) غرامة نسبة استطاعة الإشارة الضوئية إلى الضجيج OSNR penalty الناتجة عن PMD كتابع لـ DGD عند معدلات بيانات متفاوتة. يمكن ملاحظة أنه مع زيادة معدل البيانات، يزداد تأثير PMD بشكل كبير عند قيمة DGD معينة. بالنسبة

لأنظمة الإرسال من الجيل المستقبلي بسرعة 100 Gb/s و 400 Gb/s ، يجب أن يقتصر DGD على 10 ps و4 ps على التوالي وذلك للحد من الغرامة إلى أقل من 1 dB. حتى بالنسبة للألياف المنشورة حديثًا، سيكون من الصعب تلبية هذه المواصفات. استناداً لذلك فقد تم اعتبار تشتت PMD بمثابة حاجز أساسي لأنظمة الإرسال عالية السرعة، ونحتاج لطرق فعالة للتخلص منه أو تقليل تأثيره [19].

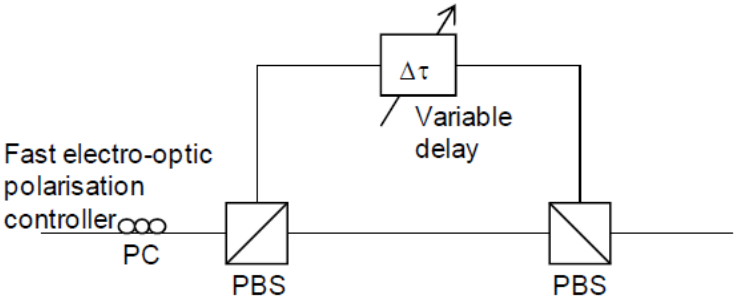


الشكل (2): غرامة نسبة الإشارة الضوئية إلى الضجيج (OSNR) في مقابل DGD لأنظمة NRZ بمعدلات بيانات 10Gb/s، 40 Gb/s، 100 Gb/s [19].

للتخلص من التشوهات التي يسببها تشتت PMD يمكن استخدام عملية التسوية equalization الالكترونية التقليدية، ولكن هذه العملية تصبح أكثر صعوبة عند معدلات بت عالية جدًا 40Gb/s وما فوق. عند مثل هذه المعدلات العالية، يجب استخدام معوض PMD الضوئي المتكيف adaptive PMD compensation (PMDC) الموضحة بنيته في الشكل (3). يتكون المعوض من وحدة التحكم بالاستقطاب polarization controller (PC) والتي تربط خرج الألياف بمدخل مقسم الأشعة الاستقطابي polarization beam–splitter (PBS) . يقسم PBS الضوء الخارج إلى مركبتي الاستقطاب المتعامدتين ويمررهما ضمن فرعين. في أحد هذين الفرعين يوجد خط تأخير متغير، والذي يعمل على تأخير المركبة الأسرع بزمن متغير τ يتوافق مع DGD. أخيرًا يجمع PBS الثاني كلتا الإشارتين ضمن ليف خرج واحد. إذا كان التأخير الزمني التفاضلي τ الذي أدخله المعوض

مساويًا تمامًا لـ DGD للإشارة المرسلة، فإن الإشارة الضوئية بعد المعوض تكون خالية تمامًا من التشوهات الناتجة عن PMD [20].

يتطلب معوض PMDC المتكيف معلومات دقيقة عن قيمة DGD ذات القيمة المتغيرة في المنظومة الضوئية كما ذكرنا، وهو ما يمكن أن تنجزه وحدة مراقبة PMD.



الشكل (3) : معوض PMD الضوئي المتكيف [20].

7- مراقبة تشتت نمط الاستقطاب بالاعتماد قياس استطاعة نغمة إشارة الساعة

يعتمد مبدأ عمل تقنيات مراقبة تشتت PMD عموماً على قياس إحدى بارامترات الإشارة التي من الممكن أن تتأثر بتشتت PMD، والتي تتمثل بالمركبات الترددية للإشارة، والتشوهات الحاصلة في المجال الزمني، بالإضافة إلى استقطاب الإشارة. يرتكز هذا البحث على تحليل الطيف الترددي لهذا سيتم توضيحه في هذه الفقرة.

ذكرنا في الفقرة (5) أن تشتت PMD يسبب فرقاً في الطور ما بين مركبتي الاستقطاب، وهذا ما يقلل من استطاعة المركبات الطيفية بعد عملية الكشف الضوئية، وذلك بسبب التداخلات الهدامة بين المركبات المختلفة طورياً. وبالتالي فإن استطاعة المركبات الراديوية ستكون تابعة لتشتت PMD ويمكن استخدامها للمراقبة.

تصنف تقنيات تحليل الطيف الترددي الراديوي إلى: تقنيات معتمدة على إضافة نغمة دليلية pilot tone، وتقنيات معتمدة على نغمة إشارة الساعة clock tone.

تعتمد تقنية إضافة نغمة دليلية على إضافة حامل فرعي (نغمة دليلية) إلى إشارة المعطيات. ترسل جنباً إلى جنب مع إشارة الحزمة الأساسية baseband عبر الليف الضوئي، وهذا ما يجعلها معرضة لنفس العوامل السلبية التي تتعرض لها إشارة الحزمة

الأساسية. يمكن استخلاص النغمة من أي عقدة في الشبكة عبر دارة الكترونية بسيطة لمراقبة البارامترات الضوئية المختلفة بما فيها تشتت PMD.

في المقابل تعتمد تقنية نغمة إشارة الساعة على وجود مركبة ترددية موجودة أصلاً ضمن الطيف الضوئي، والتي تقع عند تردد يساوي معدل نقل البتات وتعرف بنغمة إشارة الساعة [21]. تستغل هذه التقنية أيضاً ما تحدثه العوامل السلبية المختلفة لليف (كتشتت PMD) من إضعاف لاستطاعة هذه المركبة بشكل مشابه لتقنية النغمة الدليلية. وبالتالي إمكانية قياس PMD [4,5].

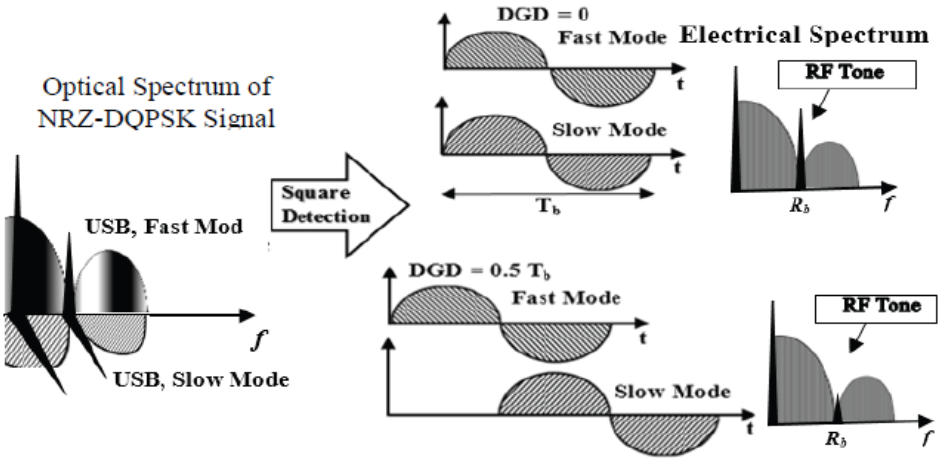
بفرض أنه تم استخدام ترميز RZ للبتات المرسلة، وتم تعديل الإشارة الضوئية على شكل حزمتين جانبيتين (DSB)، وأُرسلت الإشارة الناتجة عبر ليف ضوئي، وتم أخذ كل من تأثيرات التشتت اللوني CD، وتشتت نمط الاستقطاب PMD، والزقزقة chirp بعين الاعتبار، يمكن عندئذ حساب الاستطاعة الراديوية للنغمة المستقبلة بعد الكشف الضوئي وفق العلاقة التالية [22]:

$$P_{\mathrm{DSB}} = P_0[1 - 4\gamma(1-\gamma)\sin^2(\pi f_S DGD)] \,.\, (1+\alpha^2)\cos^2\left(\frac{\pi D_{total}\lambda^2 f_S^2}{c} + \arctan\alpha\right) \quad (3)$$

P_0 : الاستطاعة الراديوية بدون تأثيرات كل من CD, PMD، وتعتمد على استطاعة الإشارة المستقبلة. γ: نسبة تقسيم الاستطاعة ما بين مركبتي استقطاب الإشارة المتعامدتين. DGD: تأخير المجموعة التفاضلي. α: بارامتر الزقزقة chirp. D_{total} : التشتت اللوني الناتج عن الليف وأية عناصر ضوئية أخرى. f_{sc}: تردد الحامل الفرعي الراديوي (النغمة الدليلية)، λ: طول موجة الحامل الضوئي. تشير هذه المعادلة إلى أن استطاعة النغمة الدليلية تتناسب عكساً مع تأخير المجموعة التفاضلي DGD ضمن مجال محدد له، وهذا ما يمكن الاستفادة منه في مراقبة PMD.

يوضح الشكل (4) مبدأ عمل تقنية مراقبة تشتت PMD من خلال نغمة إشارة الساعة (RF Tone في الشكل). عندما يكون DGD=0 لا تتأثر استطاعة النغمة بعد الكشف الضوئي، في المقابل تتلاشى الاستطاعة عندما يساوي DGD نصف زمن البت،

ونسبة تقسيم الاستطاعة ما بين مركبتي الاستقطاب γ=50% (الحالة الأسوأ لتشتت PMD) [5].



الشكل (4) : تغير استطاعة الطيف الالكتروني بعد الكشف الضوئي، عندما تتعرض الإشارة الضوئية لتأخير مجموعة تفاضلية DGG في حالتين DGD=0 ، DGD=$0.5T_b$ حيث T_b زمن البت [5].

8-وحدة مراقبة تشتت نمط الاستقطاب المقترحة

يبين الشكل (5) مخططاً صندوقياً لوحدة مراقبة تشتت PMD المقترحة. يتم في البداية تمرير الإشارة الضوئية المطلوب مراقبتها إلى فرعين. في الفرع الأول يتم فيه قياس استطاعة نغمة إشارة الساعة P_1 كما هو الحال في التقنية التقليدية والتي تم شرحها مسبقاً في الفقرة (7)، حيث تمرر الإشارة بداية على كاشف ضوئي Photo detector (PD) لتحويلها إلى المجال الكهربائي. ومن ثم يُستخدم مرشح تمرير حزمة Band Pass Filter (BPF) ذو عرض حزمة ضيق لتمرير نغمة إشارة الساعة، وقياس استطاعتها (P_1). يمكن وصف هذه الاستطاعة كما ورد في المعادلة (3).

$$P_1 = P_0[1 - 4\gamma(1-\gamma)\sin^2(\pi f_S DGD)] \cdot (1+\alpha^2)\cos^2\left(\frac{\pi D_{total}\lambda^2 f_S^2}{c} + \arctan\alpha\right) \quad (4)$$

في الفرع الثاني يتم قياس استطاعة نغمة إشارة الساعة P_2 لكن بعد إضافة تأخير DGD_{offset} على الإشارة الضوئية. كما هو موضح في الفرع الثاني تمرر الإشارة المستقبلة

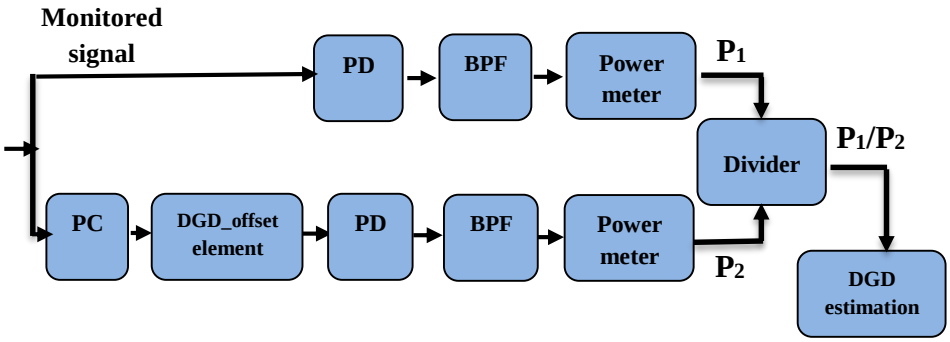
إلى متحكم استقطاب Polarization Controller (PC) ، ومن ثم عنصر ضوئي يضيف تأخير مجموعة تفاضلي (DGD_{offset}). إذا كانت زاوية الربط ما بين وصلة الليف (المراد قياس DGD لها) والعنصر الضوئي المضاف (DGD_{offset}) تساوي 0 فإنه من الممكن جمع DGD و DGD_{offset} بشكل مباشر [23]. تمرر الإشارة بعد ذلك إلى كاشف ضوئي PD ، ومرشح BPF ومقياس استطاعة الذي يعطي في خرجه استطاعة النغمة (P_2) والتي يمكن وصفها بالعلاقة التالية بشكل مشابه لـ P_1 ولكن مع إضافة DGD_{offset} :

$$P_2 = P_0\left[1-4\gamma(1-\gamma)\sin^2\left(\pi f_s\left(DGD+DGD_{offset}\right)\right)\right].(1+\alpha^2)\cos^2\left(\frac{\pi D_{total}\lambda^2 f_s^2}{c}+\arctan\alpha\right) \quad (5)$$

بعد ذلك نقوم بإيجاد نسبة الاستطاعة P_1 إلى الاستطاعة P_2 كما يلي بعد الاختصار :

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{[1-\ 4\gamma(1-\gamma)\sin^2(\pi f_s DGD)]}{\left[1-4\gamma(1-\gamma)\sin^2\left(\pi f_s(DGD+DGD_{offset})\right)\right]} \quad (6)$$

يلاحظ من العلاقة الأخيرة أن نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 لا تعتمد على التشتت اللوني والزقزقة chirp واستطاعة الإشارة المستقبلة كما هو الحال في نغمة إشارة الساعة التقليدية. باعتبار أن كلاً من تردد نغمة الساعة f_s ، وقيمة التأخير DGD_{offset} ثابتان في وحدة المراقبة، فإن النسبة P_1/P_2 ستتغير بشكل متناسب مع قيمة DGD المطلوب قياسها. بالتالي فإننا نكون قد عزلنا تأثير هذه البارامترات على قياس DGD وهذا ما يميز تقنية المراقبة المقترحة وسيتم إثبات ذلك في الفقرات التالية باستخدام برنامج المحاكاة الضوئية.



الشكل (5) : مخطط صندوقي لوحدة مراقبة تشتت نمط الاستقطاب المقترحة.

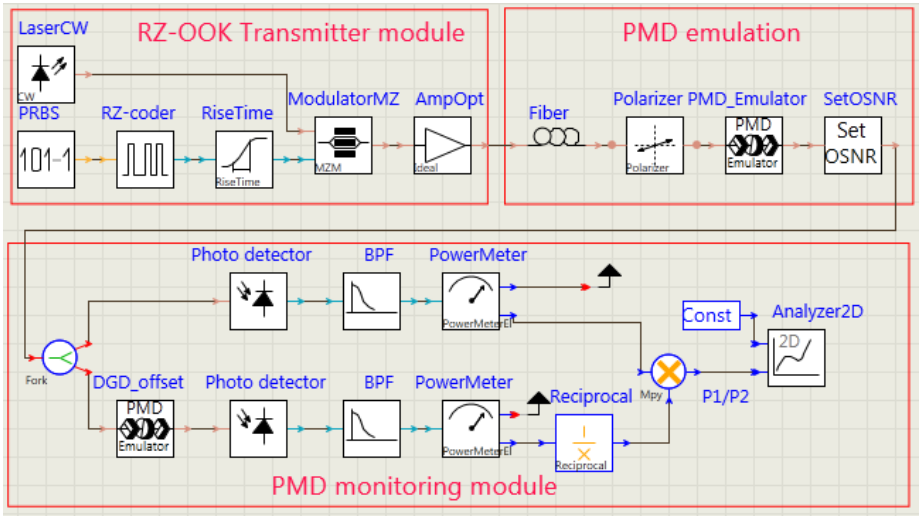
9-تصميم وحدة مراقبة تشتت نمط الاستقطاب المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة الضوئي VPI photonics

تم نمذجة وحدة مراقبة تشتت نمط الاستقطاب باستخدام برنامج المحاكاة الضوئي VPI photonics لإثبات صحة عملها، وتحليل أدائها. يوضح الشكل (6) النموذج المصمم والذي يتكون من الأجزاء التالية :

1- وحدة إرسال ضوئية RZ-OOK : يتم توليد إشارة RZ-OOK (On Off Keying) من خلال تعديل إشارة المنبع الليزري ببتات رقمية عشوائية مرمزة على شكل العودة للصفر Return to Zero (RZ) باستخدام المعدل ماك زينر Mach-Zehnder.

2- وحدة محاكاة التشتت اللوني لليف، وتشتت نمط الاستقطاب، والتحكم بنسبة OSNR: تتكون من ليف fiber يقدم تشتتاً لونياً لدارسة تأثيره على عملية القياس، ومن مستقطب خطي polarizer ، ومحاكي تشتت الاستقطاب PMD emulator الذي من خلاله يمكن ضبط DGD والتي تمثل القيمة المجهولة المطلوب قياسها من قبل وحدة المراقبة. بعد ذلك تم إضافة إشارة ضجيج إلى الإشارة الضوئية المستقبلة عند منفذ دخل وحدة المراقبة باستخدام عنصر Set OSNR بهدف مسح قيم مختلفة من نسبة OSNR.

3- وحدة مراقبة تشتت نمط الاستقطاب المقترحة: وتتكون من فرعين كما ذكرنا. في الفرع الأول يوجد كاشف ضوئي photo detector ، ومرشح BPF ، ومقياس استطاعة P_1. في الفرع الثاني يوجد متحكم استقطابي (PC)، وعنصر إضافة DGD_{offset} ، كاشف ضوئي ، ومرشح BPF، ومقياس استطاعة P_2 . أخيراً يمكن حساب النسبة P_1/P_2 والتي تم تحليل قيمتها وعلاقتها مع تأخير DGD المطلوب قياسه في الفقرة التالية. تم اختيار نسبة تقسيم الاستطاعة ما بين مركبتي استقطاب الإشارة المتعامدتين بشكل متساوي (γ=0.5) بحيث يتم محاكاة الحالة الأسوأ لشتت نمط الاستقطاب. يبين الجدول (1) بارامترات المحاكاة الأساسية.

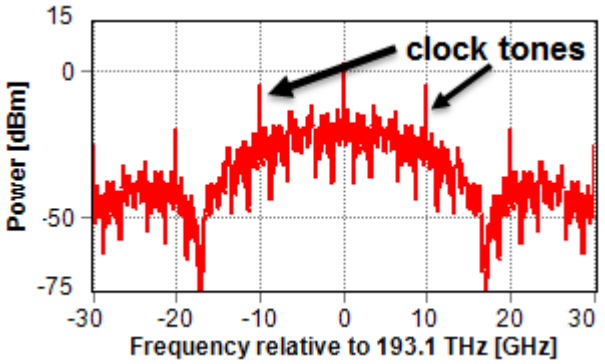


الشكل(6): محاكاة وحدة مراقبة PMD باستخدام برنامج VPI photonics.

الجدول (1): بارامترات المحاكاة الأساسية.

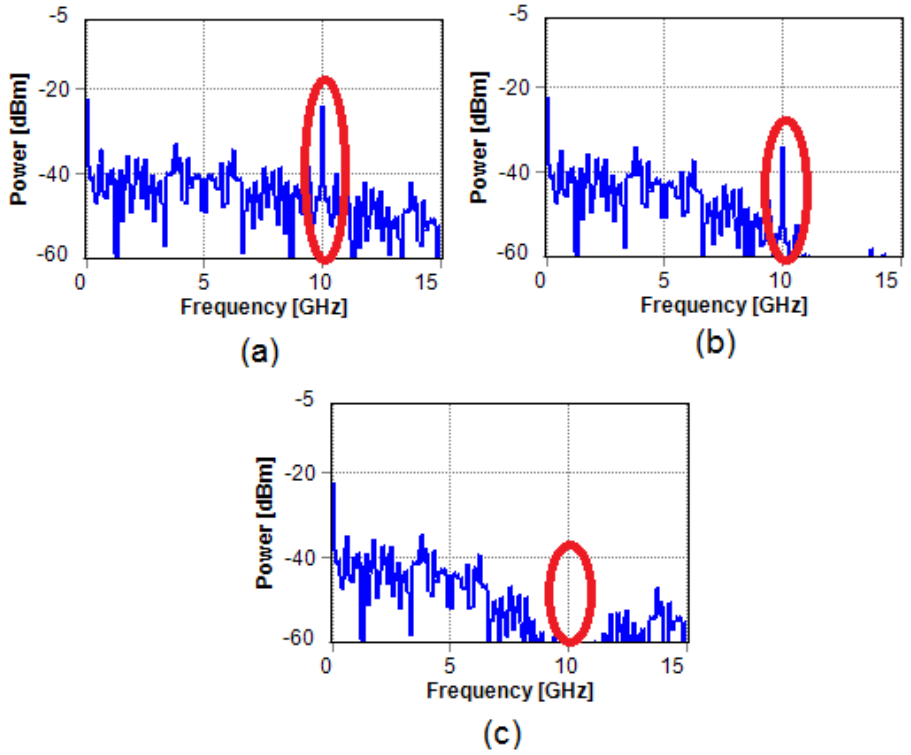
البارامتر	القيمة
معدل بتات البيانات	10 Gb/s
ترميز البتات	50% RZ
التعديل الضوئي	OOK
تردد الحامل الضوئي	193.1 THz
الاستطاعة المتوسطة للإشارة المرسلة	5 mW
معامل التشتت اللوني	16 ps/(nm.Km)
نسبة تقسيم الاستطاعة ما بين مركبتي استقطاب الإشارة المتعامدتين	50%
نوع الكاشف الضوئي	PIN
التردد المركزي لمرشح تمرير الحزمة BPF	10 GHz
عرض حزمة مرشح تمرير الحزمة BPF	100 MHz

يبين الشكل (7) الطيف الضوئي لإشارة RZ OOK ذات معدل نقل بتات 10Gb/s. يمكن ملاحظة وجود نغمة الحامل الضوئي ذي التردد 193.1THz في منتصف الطيف، بالإضافة لنغمتي إشارة ساعة clock tones ذات استطاعة عالية نسبياً على طرفي الحامل الضوئي. تبتعد النغمتان عن الحامل الضوئي 10GHz.



الشكل (7): الطيف الضوئي لإشارة RZ–OOK المرسلة ذات معدل نقل 10 Gb/s.

تنتشر إشارة RZ–OOK ضمن وسط النقل على شكل مركبتي استقطاب، وتتعرض المركبتان لتأخير DGD ، الذي يسبب فرقاً طورياً بينهما. لهذا فإن استطاعة نغمة الساعة ستتغير بعد الكشف الضوئي وبشكل يتناسب مع DGD. يبين الشكل (8) الطيف الالكتروني بعد الكاشف الضوئي الناتج عن الفرع الأول لتقنية المراقبة المقترحة من أجل قيم مختلفة للتأخير DGD : 0ps ، 40ps ، 50ps . يلاحظ أنه من دون DGD تكون استطاعة نغمة الساعة (P_1) مرتفعة نسبياً ، وتقل مع زيادة DGD، حتى نصل عند زمن نصف البت $0.5T_b = \frac{0.5}{R_b} = \frac{0.5}{10\times10^9} = 50ps$ ، لتتلاشى النغمة بشكل نهائي كنتيجة للتداخل الهدام التام كما تم ذكره سابقاً في الفقرة (7).



الشكل (8): الطيف الالكتروني للإشارة المستقبلة RZ–OOK بعد الكشف الضوئي من أجل : (a) DGD=0 ، (b) DGD=40ps ، (c) DGD=50ps .

10–النتائج والمناقشة

10–1–علاقة نسبة الاستطاعة P_1 إلى الاستطاعة P_2 مع تأخير المجموعة التفاضلي DGD

تم في هذه الفقرة اختيار ست قيم للتأخير المضاف DGD_{offset} : 0ps ، 10ps ، 30ps ، 50ps ، 60ps . من أجل كل قيمة تم إيجاد العلاقة ما بين نسبة الاستطاعة P_1 إلى الاستطاعة P_2 مع تأخير المجموعة التفاضلي DGD المطلوب قياسه ضمن المجال من 0 ps وحتى 50 ps ، وتم التوصل للشكل (9). لم يتم أخذ التشتت اللوني وعامل الزقزقة chirp ، والضجيج بعين الاعتبار في هذه المرحلة. من الشكل يمكن أن نستنتج ما يلي:

- من أجل $DGD_{offset}=0$ (أي من دون إضافة أي تأخير DGD في الفرع الثاني): يمثل هذه الحالة المنحني ذو اللون الأزرق (رمز الدائرة). يلاحظ أن النسبة $P_1/P_2=1$ من أجل جميع قيم التأخير DGD المطلوب قياسه. هذه النتيجة صحيحة ومنطقية وذلك لأن $P_1=P_2$ ، ولكن لا فائدة منها حيث لا يمكن من خلالها قياس DGD.
- من أجل $DGD_{offset}=10$ ps : يمثل هذه الحالة المنحني ذو اللون الأسود (رمز المثلث). يلاحظ أن النسبة P_1/P_2 تتزايد مع تزايد DGD المطلوب قياسه حتى DGD=40 ps حيث نصل لأعظم قيمة للنسبة P_1/P_2 ، وبعد ذلك تتناقص. لهذا يمكن القول بأنه عند اختيار $DGD_{offset}=10$ ps يكون مجال القياس يمتد من 0 ps وحتى 40 ps ، وتكون الحساسية (تغير النسبة P_1/P_2 مع DGD) ذات قيمة صغيرة عند القيم المنخفضة لـ DGD ، وتكون كبيرة بالقرب من نهاية المجال. القيمة الكبيرة للحساسية تعد أفضل ، لهذا فإن الحساسية تعد سيئة عند بداية المجال.
- من أجل $DGD_{offset}=30$ ps : يمثل هذه الحالة المنحني ذو اللون الأخضر (رمز المعين). يلاحظ أن النسبة P_1/P_2 تتزايد أيضاً مع تزايد DGD المطلوب قياسه حتى DGD=20 ps حيث نصل لأعظم قيمة للنسبة P_1/P_2 ، وبعد ذلك تتناقص. لهذا يمكن القول بأنه عند اختيار $DGD_{offset}=30$ ps يكون مجال القياس يمتد من 0 ps وحتى 20 ps ، أي أن المجال هنا أقل من الحالة السابقة. أما الحساسية فهي أيضاً ذات قيمة صغيرة عند القيم المنخفضة لـ DGD ، وكبيرة بالقرب من نهاية المجال كما هو الحال للحالة السابقة، لكن يلاحظ أن الحساسية هنا أفضل. أي أنه يوجد مقايضة ما بين مجال القياس والحساسية.
- من أجل $DGD_{offset}=50$ ps : يمثل هذه الحالة المنحني ذو اللون الأحمر (رمز النجمة). يلاحظ أن النسبة P_1/P_2 تتناقص مع تزايد DGD المطلوب قياسه حتى DGD=50 ps. لهذا يمكن القول بأنه عند اختيار $DGD_{offset}=50$ ps يكون مجال القياس يمتد من 0 ps وحتى 50 ps . وهي القيمة الأكبر لمجال القياس

بالمقارنة مع الحالات السابقة. عند زيادة DGD عن 50 ps سيكرر منحني P_1/P_2 نفسه، ويعد ذلك خارج مجال القياس. الحساسية ذات قيمة كبيرة عند بداية المجال ونهاية المجال. وتأخذ قيمة متوسطة في منتصف المجال. يعد ذلك الحالة الأفضل للحساسية بالمقارنة مع الحالات السابقة.

- من أجل DGD_{offset}=60 ps : يمثل هذه الحالة المنحني ذو اللون النهدي (رمز الضرب). يلاحظ أيضاً أن النسبة P_1/P_2 تتناقص مع تزايد DGD المطلوب قياسه حتى DGD=50 ps. ولكن الحساسية منخفضة تقريباً على كامل المجال.

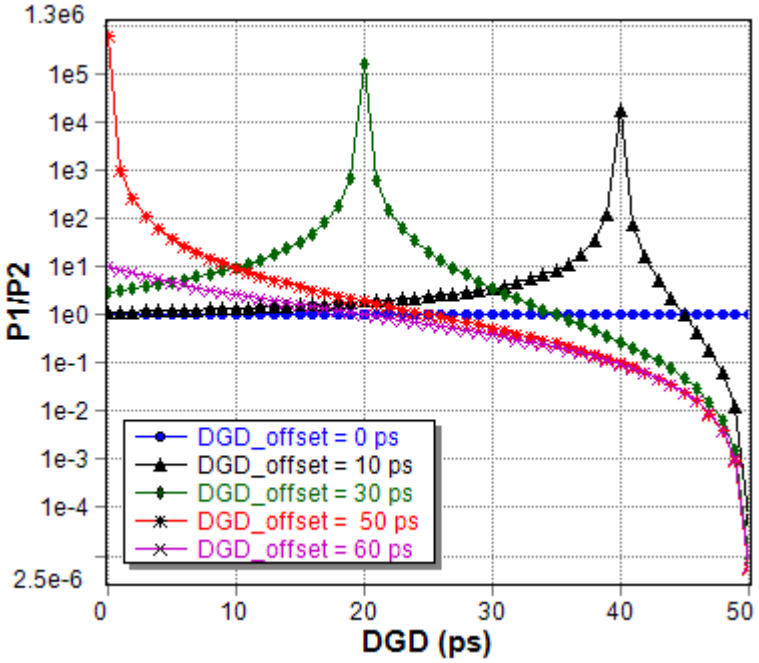
انطلاقاً ممكن سبق نجد أن اختيار DGD_{offset}=50 ps هي القيمة الأفضل حيث نحصل على أكبر مجال قياس و أفضل حساسية. ترتبط هذه القيمة مع معدل البتات ، لهذ يمكن تعميمها بأن القيمة المثلى لـ DGD_{offset} هي :

$$\mathrm{DGD_{offset}\ (optimum)} = \frac{1}{2\times R_b} = 0.5 \times T_b \qquad (7)$$

R_b : معدل نقل البتات. T_b: زمن البت.

كذلك نلاحظ أن مجال القياس range هو [0,50] ps، وهو يرتبط أيضاً مع معدل البتات ويمكن تعميم مجال القياس للتقنية المقترحة كما يلي :

$$\mathrm{DGD\ (range)} = \frac{1}{2 \times R_b} = 0.5 \times T_b \qquad (8)$$

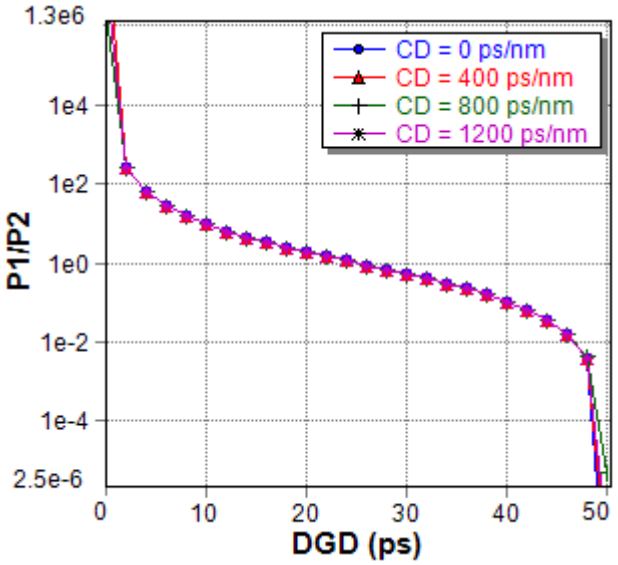


الشكل (9) : العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 و تأخير المجموعة التفاضلي DGD لقناة الاتصال ، وذلك من أجل قيم مختلفة لـ DGD_{offset} المضافة في الفرع الثاني لوحدة المراقبة.

10-2-تأثير التشتت اللوني على أداء التقنية المقترحة

تم التوصل من العلاقة (6) إلى أن نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 لا ترتبط مع التشتت اللوني. تم في هذه الفقرة دراسة تأثير التشتت اللوني على تقنية المراقبة من خلال برنامج المحاكاة الضوئي. تم التعبير عن التشتت في المحاكاة بمصطلح التشتت التراكمي و الذي يساوي حاصل ضرب معامل تشتت الليف اللوني بطول الليف، و واحدته هي ps/nm. تم تفعيل الليف الضوئي وأخذ خمس قيم للتشتت اللوني التراكمي (0,400,800,1200) ps/nm ، وتم التوصل إلى الشكل (10) الذي يوضح العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 مع DGD من أجل قيم مختلفة للتشتت اللوني. يلاحظ عدم تأثر التقنية المقترحة بالتشتت وذلك لأن استطاعة نغمة إشارة الساعة P_1 تتناسب مع

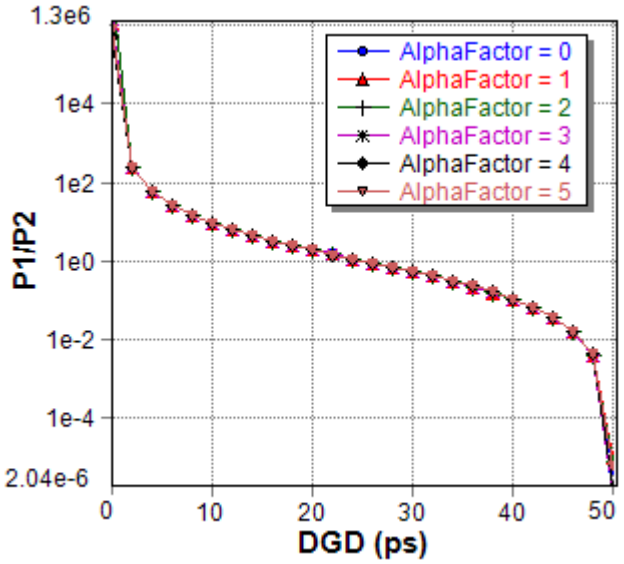
التشتت اللوني بنفس النسبة التي تتأثر بها P_2 ، وباعتبار أننا نستخدم القسمة P_1/P_2 فإنه سيتم التخلص من التشتت اللوني.



الشكل (10): العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 و تأخير المجموعة التفاضلي DGD من أجل قيم مختلفة للتشتت اللوني لليف الضوئي.

10-3-تأثير الزقزقة chirp على أداء التقنية المقترحة

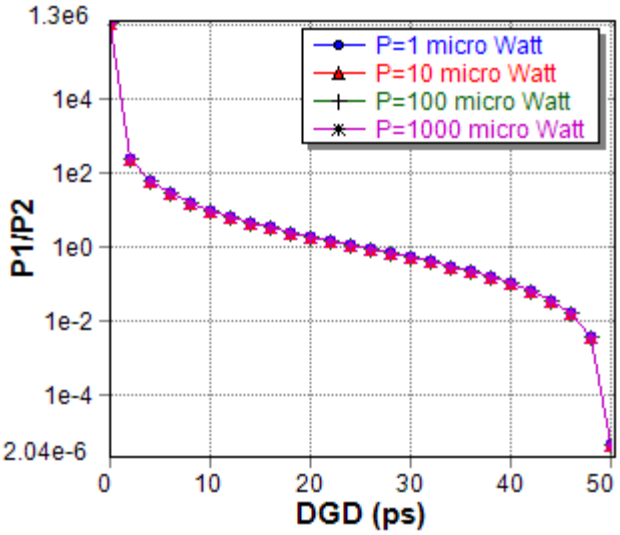
تم أيضاً التوصل من العلاقة (6) إلى أن نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 لا ترتبط مع الزقزقة chirp. تم من خلال برنامج المحاكاة دراسة مدى تأثير الزقزقة على التقنية المقترحة، وتم التوصل إلى الشكل (11) الذي يوضح العلاقة ما بين P_1/P_2 مع DGD من أجل خمس قيم عملية لعامل الزقزقة α . يلاحظ تطابق المنحنيات ، وهذا ما يؤكد صحة ما ذكرناه سابقاً بأن التقنية مستقلة عن الزقزقة chirp .



الشكل (11) : العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 و تأخير المجموعة التفاضلي DGD من أجل قيم مختلفة لعامل الزقزقة chirp (α factor).

10-4-تأثير استطاعة الإشارة المستقبلة على أداء التقنية المقترحة

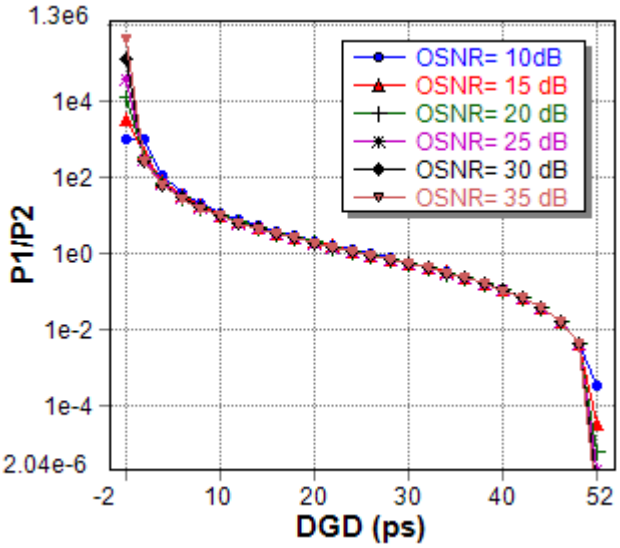
تتغير استطاعة نغمة إشارة الساعة وفق التقنية التقليدية مع استطاعة الإشارة الضوئية المستقبلة، وهذا ما يشكل تحدياً في قياس DGD. التقنية المقترحة تعتمد على استخدام نسبة استطاعتين P_1/P_2 بحيث يتم إلغاء تأثير استطاعة الإشارة المستقبلة، وهو ما تم إثباته سابقاً في العلاقة (6). تم من خلال برنامج المحاكاة تغيير استطاعة الإشارة المستقبلة من أجل أربع قيم مختلفة (1,10,100,1000) μW ، وتم رسم العلاقة ما بين P_1/P_2 و DGD في الشكل (12). يلاحظ أيضاً أن المنحنيات متطابقة، وهو ما يؤكد عدم وجود تأثير للاستطاعة المستقبلة.



الشكل (12): العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 و تأخير المجموعة التفاضلي DGD من أجل قيم مختلفة لاستطاعة الإشارة الضوئية المستقبلة.

10-5-تأثير نسبة الإشارة الضوئية إلى الضجيج على أداء تقنية المراقبة المقترحة

تتأثر التقنية التقليدية بشكل كبير بالضجيج، حيث يغير من الاستطاعة المقاسة لنغمة إشارة الساعة. تم في هذه الفقرة دراسة تأثير الضجيج الناتج عن المضخمات الضوئية من خلال تغيير نسبة استطاعة الإشارة الضوئية إلى الضجيج OSNR ضمن ست قيم مختلفة dB (10,15,20,25,30,35) ، وتم رسم العلاقة ما بين P_1/P_2 و DGD في كل مرة كما هو موضح في الشكل (13). يلاحظ أيضاً أنه يوجد تطابق في المنحنيات، باستثناء بداية ونهاية المجال، لكن بسبب أن الحساسية كبيرة في بداية ونهاية المجال فإن الأخطاء ستكون صغيرة.



الشكل (13): العلاقة ما بين نسبة الاستطاعتين P_1/P_2 و تأخير المجموعة التفاضلي DGD من أجل قيم مختلفة لنسبة الإشارة إلى الضجيج الضوئية OSNR.

11-سلبيات التقنية المقترحة

على الرغم من المزايا المذكورة سابقاً للتقنية المقترحة إلا أنها تعاني من بعض السلبيات والتي يمكن إجمالها بما يلي:

أ-التعقيدية complexity: من الواضح أن التقنية تتطلب استخدام عناصر ضوئية والكترونية أكثر من تقنية إشارة الساعة التقليدية، والتقنيات المعتمدة على الزمن، وهذا ما يزيد من تكلفتها المادية.

ب-تتأثر التقنية بنسبة تقسيم الاستطاعة ما بين مركبتي استقطاب الإشارة المتعامدتين كما هو مذكور في العلاقة (6) . وفي الواقع أيضاً تتأثر بقية تقنيات المراقبة بهذه النسبة.

ج-لا يمكن من خلالها مراقبة بارامترات ضوئية أخرى كالتشتت اللوني والضجيج بالمقارنة مع التقنيات المعتمدة على الزمن (AAH,DTS) وتقنيات الذكاء الاصطناعي.

12-الخلاصة والتوصيات

تم من خلال هذا البحث اقتراح طريقة جديدة لمراقبة تشتت PMD للألياف الضوئية، وذلك من خلال إجراء تعديل على تقنية نغمة إشارة الساعة التقليدية. فبالإضافة لقياس استطاعة هذه النغمة بعد الكشف الضوئي، تم قياس أيضاً استطاعتها بعد إضافة تأخير DGD_{offset} للإشارة المطلوب مراقبتها. تم التوصل إلى أن نسبة هاتين الاستطاعتين تتناسب مع DGD وبالتالي إمكانية تخمين قيمة DGD. يمكن إجمال ما تم التوصل بما يلي:

1. القيمة المثلى لتأخير DGD_{offset} المضاف للإشارة المراقبة يساوي نصف زمن البت، حيث نحصل على أفضل مجال قياس وحساسية. من أجل R_b=10Gb/s القيمة المثلى تساوي 50 ps .
2. يرتبط مجال القياس مع قيمة DGD_{offset}. إذا تم اختيار قيمة DGD_{offset} المثلى والتي تساوي نصف زمن البت، فإن مجال قياس DGD أيضاً نصف زمن البت. من من أجل R_b=10Gb/s ، DGD_{offset}=50ps ، فإن مجال القياس يمتد من 0 وحتى 50 ps . مجال القياس للتقنية المقترحة مشابه للتقنية التقليدية.
3. ترتبط الحساسية مع قيمة DGD_{offset} . إذا تم اختيار قيمة DGD_{offset} المثلى سنحصل على أفضل حساسية خصوصاً عند بداية ونهاية المجال، وهذا يعد من مزايا التقنية المقترحة، حيث تكون الحساسية لوحدة المراقبة مهمة جداً في بداية المجال للتعويض الدقيق عن DGD لوصلة الليف.
4. تم عزل تأثير كل من التشتت اللوني، والزقزقة chirp، واستطاعة الإشارة المراقبة، والضجيج عند قياس نسبة الاستطاعتين. وهذا أهم ما يميز التقنية المقترحة.
5. كما هو الحال في تقنية نغمة إشارة الساعة التقليدية تمتاز التقنية بزمن استجابة منخفض بالمقارنة مع التقنيات المعتمدة على أخذ عينات من الإشارة بما فيها تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم العميق.
6. لا تحتاج التقنية لإضافة أي تعديل على المرسل كما في تقنية النغمة الدليلية، وتعتمد على نغمة موجودة أصلاً في الإشارة المراقبة. بالتالي بساطة تنفيذها.

تم مقارنة أداء التقنية المقترحة مع بقية التقنيات في الجدول (2) .

أخيراً يمكن المتابعة مستقبلاً لدراسة أهمية وفائدة تطبيق تقنية المراقبة المقترحة ضمن شبكة ليف ضوئية. التقنية تعمل أساساً ضمن الطبقة الفيزيائية، لهذا يمكن ربطها مع الطبقات الأعلى والمسؤولة عن إدارة المصادر وتصحيح الأخطاء، وتوجيه الرزم وغير ذلك. يمكن على سبيل المثال تطبيقها ضمن شبكة ديناميكية متكاملة تحتوي على معوضات تشتت متكيفة، وموجهات routers، ومن ثم دراسة مدى تحسن أداء الشبكة، بالإضافة إلى تطبيق خوارزميات تخصيص الموارد استناداً لمعلومات وحدة المراقبة.

الجدول (2) : مقارنة التقنية المقترحة مع بقية التقنيات

	التقنية المقترحة	نغمة إشارة الساعة التقليدية	نغمة دليلية	تقنية قياس درجة الاستقطاب	تقنيات الذكاء الاصطناعي
مجال المراقبة	تعتمد على معدل البت. من أجل 10Gb/s المجال [0,50] ps	تعتمد على معدل البت. من أجل 10Gb/s المجال [0,50] ps	تعتمد على تردد النغمة. من أجل 10GHz المجال [0,50] ps	تعتمد على معدل البت. من أجل 10Gb/s المجال [0,50] ps	تعتمد على معدل البت وحقل السمات Features domain
تأثير التشتت اللوني	لا تتأثر	تتأثر	تتأثر	لا تتأثر	لا تتأثر
تأثير الزقزقة chirp	لا تتأثر	تتأثر	تتأثر	لا تتأثر	لا تتأثر
تأثير استطاعة الإشارة المستقبلة	لا تتأثر	تتأثر	تتأثر		لا تتأثر
تأثير نسبة تقسيم الاستطاعة بين محوري الاستقطاب	تتأثر	تتأثر	تتأثر	تتأثر	تتأثر
زمن القياس	سريعة	سريعة	سريعة	سريعة	بطيئة
التعقيد	أعلى تعقيداً	أقل تعقيداً	أقل تعقيداً. ولكن تتطلب تعديلاً عند المرسل	أعلى تعقيداً	أعلى تعقيداً

References المراجع

[1] Subhendu Ghosh and Aneek Adhya. **Soft Failure Detection and Identication in Optical Networks Using Cascaded.** DOI:10.36227/techrxiv.172418543.34816590/v1. 2024

[2] D. K. Tizikara, J. Serugunda and A. Katumba, **Machine Learning-Aided Optical Performance Monitoring Techniques: A Review** , *Front. Commun. and Netw.*, pp. 63-79. 2022.

[3] A. Vyukusenge and J. Rabenandrasana, **Polarization Mode Dispersion Effects on Signal Quality and Compensation Methods, Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications**, pp. 1-6. 2020.

[4] Kazi Abu Taher, Satya P. Majumder, B. M. Azizur Rahman, **PMD Monitoring of Polarization Division Multiplex Transmission System Using RF Tone Harmonics**. Conference: 18th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). 2015.

[5] Kazi. A. Tahera, S. P. Majumder, B. M. A. Rahman, Y. Yuc, and Changyuan Yu. **Simultaneous Monitoring of CD and PMD Using RF Tone Power.** 8th International Conference on Materials for Advanced Technologies. 2016.

[6] Koushik Barman and Mritunjay Kumar Rai. **Pilot Tone based CD and PMD Monitoring Technique for Photonic Networks**. Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(47). 2016.

[7] Linsheng Fan, Yanfu Yang, Qun Zhang, Siyu Gong, Yuchen Jia, Chen Cheng, and Yong Yao. **Transceiver impairment robust and joint monitoring of PDL, DGD, and CD using frequency domain pilot tones for digital subcarrier multiplexing systems**. VOL. 16, NO. 11. 2024.

[8] Dawei Wang , Hao Jiang, Guowei Liang, Qianxin Zhan, Yao Mo, Qi Sui, and Zhaohui Li. **Optical Performance Monitoring of Multiple Parameters in Future Optical Networks.** JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 39, NO. 12. 2021.

[9] Yue Deng , Xinan Ye, Zhen Guo, Changjian Ke · Haoyu Wang, Chen Xing, Yibo Zhong, Deming Liu. **High wavelength‑resolved state of polarization monitoring method based on stimulated Brillouin scattering effect.** Optical and Quantum Electronics. 2020.

[10] Al-Wafai H. **Polarization Mode Dispersion Monitoring by Sampling the Two-Polarization Components of the Optical Signal and Histogram Analyzing.** Al-Baath Journal. Volume 44, number 493. 2022**.**

[11] XIAOJIE FAN , LINA WANG , FANG REN , YULAI XIE, XIANG LU, YIYING ZHANG,TIANWEN ZHANGSUN, WEI CHEN, AND JIANPING WANG. **Feature Fusion-Based Multi-Task ConvNet for Simultaneous Optical Performance Monitoring and Bit-Rate/Modulation Format Identification.** IEEE Access Vol: 7. pp. 126709 – 126719. 2019.

[12] Dativa K. Tizikara, Jonathan Serugunda and Andrew. Katumba. **Machine Learning-Aided Optical Performance Monitoring Techniques: A Review. Frontiers in Communications and Networks.** Volume 2. 2022.

[13] Waddah S. Saif , Maged A. Esmail , Amr M. Ragheb , Tariq A. Alshawi , and Saleh A. Alshebeili. **Machine Learning Techniques for Optical Performance Monitoring and Modulation Format**

Identification: A Survey. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 22, NO. 4. 2020.

[14] T. Jiang, Y. Xiang, L. Wang and M. Tang, **Joint CD, DGD, and PDL Estimation Enabled by FrFT Based Time-Frequency Reconstruction,** in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 2623-2630, 1 May1, 2023

[15] Bai, Chenglin and Yang, Fan and Xu, Hengying, **Intelligent Joint Multi-Parameter Optical Performance Monitoring Scheme Based on Ht Images and Mt-Resnet for Elastic Optical Network.** http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4516641. 2023

[16] M.Satyanarayana, V.N.Lakshmana Kumar، P. Ujjvala Kanthi Prabha. -**OPTICAL FIBER COMMUNICATION.** GCS PUBLISHERS. 258p. 2022.

[17] Ramaswami R, Sivarajan KN, Sasaki GH. - **Optical networks: A practical perspective**. 3nd edition. Morgan Kaufmann. 2010.

[18] Ayman Elmassarawy. **Light Waves and Data Streams: A Comprehensive Guide to Fiber Optic Communication: Empowering DWDM: Revolutionizing High-Capacity Data Transmission**. 420 pages. 2024.

[19] Shieh W, Djordjevic IB. **Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications.** San Diego: Elsevier Inc. 2010.

[20] Meflah L. **Multi-impairment and multi-channel optical performance monitoring. University College London**. Ph.D. thesis.

[21] Al-Wafai H. **Dispersion compensation of optical fiber using monitoring technique based on clock signal**. Al-Baath Journal. Volume 36, number 634. 2014.

[22] Liu N, Zhong W-D, Wen, YJ, Lu C, Cheng L, Wang Y. **PMD and chirp effects suppression in RF tone-based chromatic dispersion monitoring.** IEEE Photonics technology letters;18(5),673–675. 2006.

[23] Mateo RV. **Optical performance monitoring in optical packet-switched networks.** Chapter 7 in PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia. 2010