دراسة تأثير تشتت نمط الاستقطاب والفقد المعتمد على الاستقطاب على بارامترات الأداء في أنظمة اتصالات الالياف البصرية

سعاد محمد ابوزريبة، سمية محمد الطرشي، سعاد ابوالقاسم مجاور
قسم الفيزياء–كلية العلوم – جامعة مصراتة
suadabu@yahoo.com (218918108138)

الملخص

في هذا البحث تم دراسة تأثير الفقد الاستقطابي للإشارات الداخلة في انظمة اتصالات الالياف البصرية على كفاءة الاشارات الخارجة عن طريق نموذج حاملات الموجة المار عبر الالياف البصرية وحيدة النمط مع اعتبار التشتت الحاصل في الموجات المارة خلال الليف البصري الناجم عن التشتت اللوني و تشتت نمط الاستقطاب للموجات المارة خلال الليف البصري وفق القوانين الفيزيائية لفيزياء الألياف البصرية التي تعمل على اظهار الإشارة الخارجة من نظام الاتصالات الألياف البصرية بكفاءة معينة وذلك من خلال دراستنا لتأثير الفقد الاستقطابي (PDL) على معدل الخطأ النبضي (BER) في أنظمة الألياف البصرية. زيادة على ذلك تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على حساب معدل الخطأ النبضي (BER) للإشارات الخارجة و وجد انه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يزداد معدل الخطأ النبضي (BER), ويكون أفضل قيمة (BER) عندما يكون (PDL=0dB و PMD=2ps) , كما تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على عامل الجودة (Q–Factor) و وجدنا بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل عامل الجودة (Q–Factor), إضافة الى ذلك تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على نسبة الإشارة الى للتشويش المستقبلة في اجهزة الاستقبال (OSNR) أوضحت الدراسة انه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) . أوضحت الدراسة ان أفضل قيمة (Q–Factor) ومعدل الخطأ النبضي و كذلك نسبة الإشارة البصرية للتشويش عندما يكون PDL=0dB وPMD=2ps. أجريت كافة الحسابات في هذا البحث باستخدام برنامج الماتلاب.

الكلمات المفتاحية: الالياف البصرية ‘ تشتت نمط الاستقطاب ‘ الفقد المعتمد على الاستقطاب‘ معدل الخطأ النبضي‘ عامل الجودة.

مقدمة

مع التطور الهائل والقفزة النوعية العالية في مجال تقنيات المعلوماتية، والاتصالات، ومع التزايد السكاني الكبير الذي يفرض حاجةً على التواصل بين الأفراد، مما يسبب ضغطاً على نظم الاتصالات العامة، فقد أصبحت الحاجة ملحة إلى تطوير شبكات نقل ذات عرض حزمة أكبر بحيث تستطيع نقل المعلومات بسرعة أكبر، وزمن أقل، مما مهد السبيل للحاجة إلى خدمات شبكة ذات عرض حزمة أعلى [1].

عند إرسال الإشارات ضمن قناة اتصال فإنها تعاني بعض التشوهات نتيجة للتشويش الناتج عن تراكب الضجيج (التشويش) عليها إضافة إلى تأثير ممانعة بعض أنواع خطوط النقل على جودة ونوعية الإشارات المرسلة غيرها وبالتالي صعوبة كشف تلك الإشارات بشكلها الحقيقي في قسم الاستقبال نتيجة المؤثرات الموجودة في قناة الاتصال [2]. بعد مسافة الإرسال تعاني الاشارة البصرية أثناء انتشارها ضمن الألياف من عدة عوامل فقد طاقية، تنتج عن عيوب الدليل الموجي وامتصاص المادة المكونة لليف والاستطارة ومعوقات أخرى منها التشتت اللوني (CD) وتشتت نمط الاستقطاب (PMD) والفقد الاستقطابي (PDL) لهذا تستخدم المضخمات البصرية من أجل تعويض هذا الفقد حيث تضيف المضخمات تشويش وتؤثر على نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR). لذلك من المهم من وجود مقاييس لتقييم جودة النظام ومن أهم هذه المقاييس معدل الخطأ النبضي (BER) وعامل الجودة (Q-Factor) ونسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) تعد هذه المقاييس من أهم العوامل التي تحدد كفاءة النظام المتمثلة في معدل البتات ومسافة الإرسال [3].

في سنة 1995 قامجيسين N.Gisin وزملائه بدراسة مشكلة تعيين الاحصائي لـ N من عناصر ذات الفقد الاستقطابي (PDL) المتصلة بواسطة الألياف البصرية المتسلسلة, وقد تمت مناقشة كل من التوهين والفقد الاستقطابي (PDL) وتم اقتراح تعريفات أساسية واشتقاق صيغ كل من القيمة المتوسطة والانحرافات المعيارية [4].في سنة 2002 قام أنطونيو ميكوزي Antonio Mecozzi وزملائه بدراسة إحصائيات الفقد الاستقطابي (PDL) في الأنظمة البصرية. ووضحوا أن توزيع PDL هو توزيع ماكسويل عندما يتم التعبير عنه بالديسبيل, وقارنوا النتائج التحليلية مع المحاكاة العددية, حيث تمت ملاحظة وجود اتفاق ممتاز بينهما [5].

سنة 2007 قام ليانغ تشن Liang Chen وزملائه بتقديم تقييم تحليلي جديد لاحتمالية الخطأ الناتج عن الاستقطاب للأنظمة البصرية التي تتكون من PMD وPDL. باستخدام نموذج مبسط يحتوي على قطع الألياف PMD وPDL, ومضخم الضوضاء ASE, مع المصفى البصري والمصفى الكهربي, حيث تمت دراسة تأثيرين مرتبطين بالاستقطاب وهما الفقد الاستقطابي وتشتت نمط الاستقطاب, أي اقتران بين اتجاه متجهي PMD وPDL وقد تم استنتاج ان التداخل الناجم عن الاستقطاب يعتمد تأثيره على معدل الخطأ في البتات بشدة على قيمة PDL [6].

في سنة 2010 قام فرحان حسن Farhan Hussainوزملائه بدراسة تأثير الفقد الاستقطابي على نظام اتصال الألياف البصرية عالي السرعة, ولقد وجد أنه في وجود PDL فإن BER وQ–factor في المستقبل يخضعان لتقلبات مما يتسبب في عدم استقرار النظام وتظهر النتائج أنه يرجع بشكل أساسي إلى تذبذب نسبة الإشارة الضوئية إلى الضوضاء الموازية (OSNR) وقيمة معامل الجودة عموما Q–factor الامر الذي يؤثر على معدل الخطأ في البتات (BER) [7].

سنة 2010 قام مكسيم كوشنيروف Maxim Kuschnerovوزملائه بتقييم أداء الأنظمة البصرية المتعددة الاستقطاب في وجود الفقد الاستقطابي (PDL) للمستقبلات الخطية والاحتمالية القصوى والضوضاء المجمعة في المستقبل، وناقشوا طرق انقاص قيمة الفقد الاستقطابي (PDL)[8]. في سنة 2015 قام كل من انجري ليو Yangzi Liuوزملائه بتصميم محاكي للفقد الاستقطابي مع وحدات تحكم الاستقطاب التي تعمل بالكمبيوتر والنمط الأحادي, واثبتت هذه الدراسة أن الفقد الاستقطابي PDL يتبع توزيع ماكسويل عندما يتم التعبير عنه بالديسبيل ووضع وحدات تحكم الاستقطاب في أماكن مختلفة في رابط المحاكي, وقد تم أيضًا استنتاج ان مواضع مكونات PDL لها تأثير كبير على احصائيات PDL في نظام الاتصال بطول ثابت نظرًا لأن عدد مكونات الاستقطاب المعنية وطول الاتصال يبقى ثابتًا, اضافة الى انه كلما كان عدد الالياف الواصلة أطول كلما كان أصغر متوسط قيم PDL أصغر [9]. في سنة 2019 قدم كل من براين كيربي Brian T. Kirbyوزملائه نموذجًا نظريًا يصف كيف يؤثر عاملي حجم واتجاه الفقد الاستقطابي (PDL) على جودة النظام وميزوا نظريًا كيف يمكن تطبيق PDL في

قناة ليفية واحدة على النحو الأمثل من أجل تعويض الفقد الناتج عن (PDL) وقدموا نتائج تجريبية تتحقق من الوضع النظري [10]. في سنة 2020 قام جهانجيز علم JahangirAlam وزملائه باقتراح مخطط لتقنيات التعديل المختلفة لتحسين معدل الخطأ النبضي (BER) في اتصالات الألياف البصرية. تم اختبار النظام المطور على أنظمة الألياف البصرية التي تعمل بتعديل العودة إلى الصفر (NRZ) بمعدلات إرسال تصل 10Gbps, أظهرت المحاكاة العددية تحسناً ملحوظًا في نظام (BER) بعد تحسين عملية المعالجة المقترحة على الإشارات الكهربائية المكتشفة عند أطوال موجية مركزية في منطقة 1310nm [11].في هذا البحث ستتم دراسة تأثير الفقد الاستقطابي للإشارات الداخلة في انظمة اتصالات الالياف البصرية على كفاءة الاشارات الخارجة عن طريق نموذج حاملات الموجة المار عبر الالياف البصرية وحيدة النمط مع اعتبار التشتت الحاصل في الموجات المارة خلال الليف البصري الناجم عن التشتت اللوني و تشتت نمط الاستقطاب للموجات المارة خلال الليف البصري وفق القوانين الفيزيائية لفيزياء الألياف البصرية التي تعمل على اظهار الإشارة الخارجة من نظام الاتصالات الألياف البصرية بكفاءة معينة وذلك من خلال دراستنا لتأثير الفقد الاستقطابي (PDL) على معدل الخطأ النبضي (BER) في أنظمة الألياف البصرية. كفاءة الاشارات المستقبلة ستقاس عن طريق حساب معدل الخطأ النبضي (BER), وعامل الجودة (Q-Factor), ونسبة الإشارة الى للتشويش المستقبلة في اجهزة الاستقبال (OSNR).

الدراسة الرياضية التحليلية

عندما تسافر الإشارة داخل الليف البصري في أنظمة اتصالات الألياف البصرية فأنها تعاني من خسائر مختلفة، تسبب هذه الخسائر صعوبة ضبط الإشارة عند المستقبل، وبالتالي عند نقل الإشارة إلى مسافات طويلة في الليف من ضروري دعم الإشارة داخل الليف البصري [12]. لذلك تستخدم المضخمات لاستقبال وتضخيم الإشارة المرسلة إلى شدتها الأصلية ومن ثم يتم تمريرها إلى الألياف الرئيسية [13].

التشويش (الضوضاء) هو إشارات غير مفيدة تجمع مع الإشارة مسببة تغييرًا غير مرغوب فيه مما يؤدي إلى قلة مردودها وسوء أدائها وتخفيض جودتها، الامر الذي يتسبب في حدوث أخطاء في نظام الاتصال، ويقيم أداء نظام الاتصال بمعرفة نسبة الإشارة البصرية إلى التشويش

(الضوضاء)، لا يمكن أن يحدث التضخيم البصري من دون توليد انبعاث تلقائي مضخم(ASE) (Amplified Spontaneous Emission)،هذا التشويش (الضوضاء) الناتجة عن مضخم الانبعاث التلقائي تعبر من أهم العيوب التي تحد من قدرة النظام [14]:

(1)

$$P_{ASE} = 2hV.\Delta V.n_{sp}(G-1)$$

حيث P_{ASE} هي قوة ASE (الضوضاء) في عرض النطاق الترددي البصري ΔV, h تابت بلانك،v التردد البصري، n_{sp} معامل الانبعاث التلقائي،G كسب المضخم البصري، تضاف هذه المساهمات بشكل تراكمي على طول السلسلة المضخم، وتؤدي إلى زيادة إشارة الضوضاء التلقائية عند المستقبل، وهو الحد الأساسي للتشويش في نظام إرسال المضخم بصرياً [15].

يمكن تمييز ضعف الإشارة التلقائية من حيث نسبة الإشارة البصرية إلى نسبة التشويش Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) كما هو موضح في المعادلة (2) ويتم تعريفها على أنها نسبة قدرة قناة الإشارة إلى قدرة ASE في عرض نطاق بصري محدد [16]:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{2hV.\Delta V.n_{sp}(G-1)} \qquad (2)$$

البتات المستلمة عندما يعرف عدد الأخطاء يمكن تحديد BER على النحو التالي [4]:

$$BER = \frac{Number\ of\ error}{Numer\ of\ transmitted\ bits} \qquad (3)$$

الدالة المولدة للعزوم (Moment Generating Function Method) (MGF): هي واحدة من أكثر دوال التوزيع أهمية لأنها يستخدم لتقييم أهم باراميتر أداء متوسط معدلالخطأ(BER) لأنظمة الاتصالات الرقمية، يمكن استخدام MGF للحصول على متوسط معدل(BER) بمختلف صيغ التعديل لذلك [17‘18].

تعد نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) أحد المعلمات الرئيسية التي تحدد المدى الذي يمكن أن ينتقل إليه طول الموجة قبل التجديد. تعمل (OSNR) كمؤشر معياري لتقييم أداء الأنظمة الإرسال البصرية، تحتاج شبكات الاتصال إلى العمل فوق حد (OSNR) الخاص بها لضمان تشغيل فوق حد (OSNR) الخاص بها لضمان التشغيل الخالي من الأخطاء [19,16].

توجد علاقة مباشرة بين نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) ومعدل الخطأ النبضي (BER) حيث (BER) هي القيمة النهائية لقياس جودة الإرسال. لحساب (BER) للألياف

أحادية النمط هي [20] , ولكي يكون نظام ذو كفاءة عالية يجب أن يكون معدل الخطأ النبضي (BER) منخفض ونسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) عالي [21].

معدل الخطأ النبضي (BER) للنظام قد يكون في بعض منخفضًا جدًا بحيث لا يمكن قياسه خلال فترة زمنية معقولة، فمن المفيد اعتماد قياس عامل الجودة (Q–Factor) كطريقة غير مباشرة لقياس معدل الخطأ في البتات (BER), حيث أن عامل الجودة (Q–Factor) هي معلمة بلا أبعاد تستخدم على نطاق واسع لقياس أداء أنظمة اتصالات البصرية [11].

يمكن كتابة عامل الجودة (Q–Factor) على أنه:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4)$$

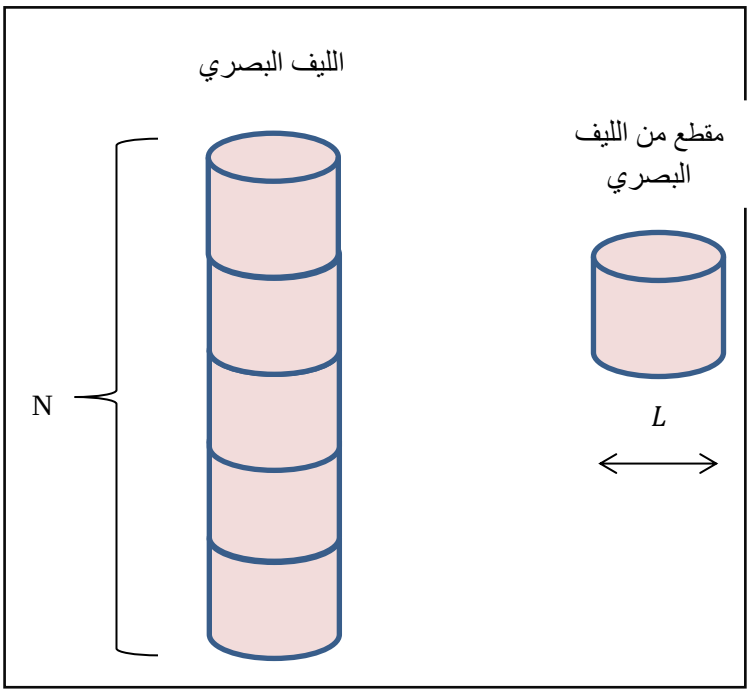
حيث أن μ_1 و μ_0متوسط 0 log, log1, وσ_1, σ_0 هي الانحرافات المعيارية المقابلة.

تعطى العلاقة الرياضية بين عامل الجودة (Q–Factor) و (BER) بالمعادلة التالية [22]:

$$BER = \frac{1}{2}\, erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (5)$$

نموذج النظام تحت الدراسة

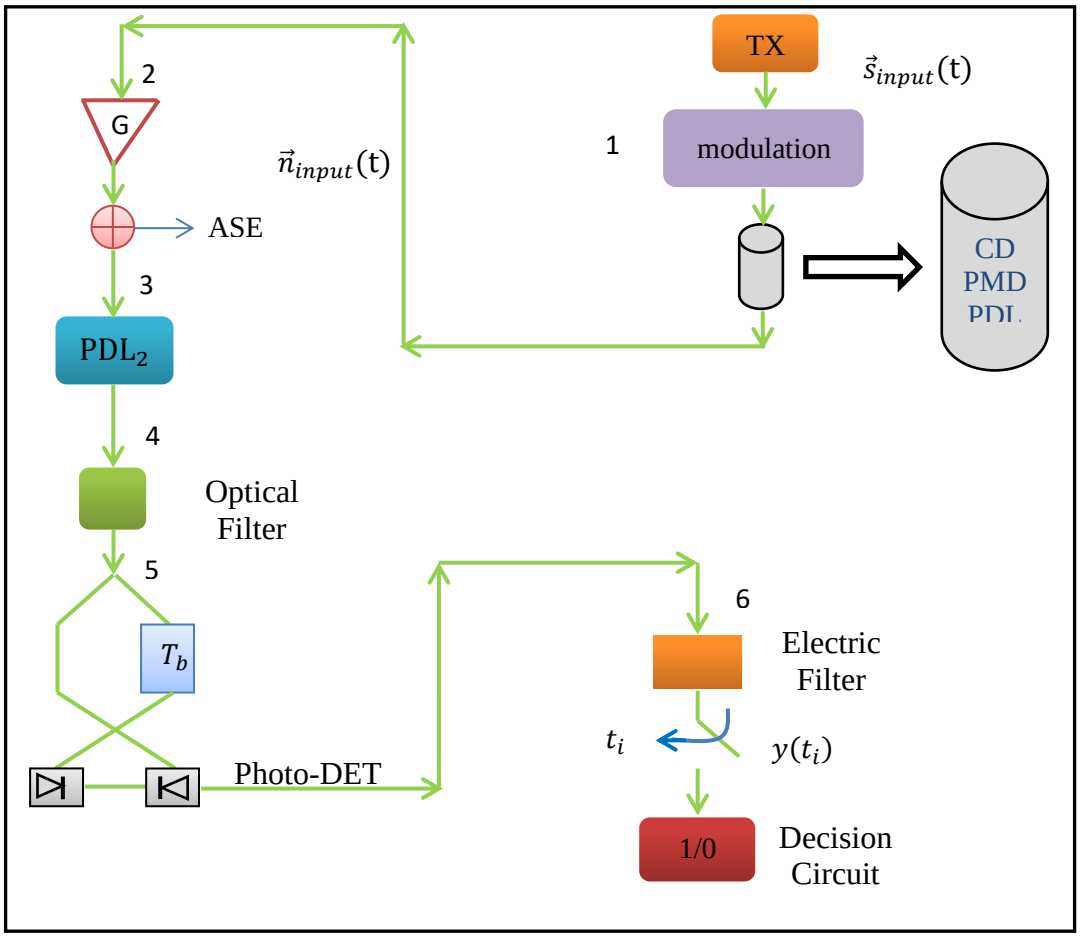
في الشكل (1) يظهر نموذج الليف البصري تحت الدراسة بحيث يتم تقسيمه إلى أجزاء صغيرة، سيتم التركيز على مقطع واحد طوله (L)، والذي يمثل الليف البصري المقسم إلى أجزاء عددها (N).



شكل (1) الليف البصري تحت الدراسة

التطور السريع في الاتصالات والرغبة الملحة للوصول إلى سرعات فائقة يجعلنا نلجأ إلى أنظمة اتصالات ذات نطاق عريض [23]، تعتبر الألياف البصرية الوسط المناسب والمستخدم لنقل المعلومات من نقطة إلى نقطة وذلك بتحميلها على أمواج ضوئية، ولضمان نقل تلك المعلومات واستقبالها بأفضل جودة ممكنة يتطلب مكونات نظام تؤدي وظيفتها لتحقيق نقل بيانات بجودة وسرعة عالية [24].

الشكل (2) يوضح مخطط النظام المدروس حيث تدخل الإشارة $\vec{s}_{input}(t)$ الى محور الإشارة في العملية المسماة عملية التحوير Modulation و تمر بعدة مراحل ليتم استقبالها في الشكل النهائي عند دائرة القرار Decision Circuit .



شكل (2) نموذج النظام تحت الدراسة

الدراسة النظرية

المرحلة الأولى : في هذه المرحلة نلاحظ أن الإشارة البصرية $\vec{s}_{input}(t)$ بدأت في الدخول في نظام الليف البصري بحيث يتم تعديها بأحدي صيغ التعديل المستخدمة ومن ثم تمر على مصدر التشتت اللوني (CD)ثم تمر بمصدر تشتت نمط الاستقطاب (PMD) لتمر بعدها خلال مصدر الفقد الاستقطابي (PDL_1) وذلك بعد أن عبرت المسار (1) [17].

يمكن كتابة الإشارة الداخلة للنظام على صورة متسلسلة فوريه كالتالي:

$$\vec{s}_{in}(t) = s_{in}(t)|\vec{p}_s> = \sum_{l=-\infty}^{\infty} (s_{in})_l e^{j\omega_l t}\,|\vec{p}_s> \qquad (6)$$

حيث $|\vec{p}_s>$ يمثل متجه الوحدة و$\left(\omega_l = \frac{2\pi l}{NT_b}\right)$ يمثل التردد الزاوي، بحيث l طول قطعة الليف البصري، N يمثل عدد النبضات، T_bيمثل الفترة الزمنية لكل بت (نبضة). يمكن كذلك تمثيل مصادر الفقد في الإشارة البصرية المارة خلال الليف البصري من خلال المعادلات التالية:

- التشتت اللوني (CD): يمثل بالعلاقة التالية [17]:

$$H_{CD}(f) = e^{-2j\pi^2\beta_2 f^2 L} \quad (7)$$

حيث $\beta_2 = -\lambda^2 D(\lambda)/(2\pi c)$, بحيث يكون $D(\lambda)$ باراميتر التشتت اللوني (CD) لليف البصري في الطول الموجي λ، f تردد الموجة.

- تشتت نمط الاستقطاب (PMD): في مجال التردد، يتم إعطاء مصفوفة جونز $(\mathrm{T_{PMD}})$لتشتت نمط الاستقطاب (PMD)من الدرجة الأولى بواسطة العلاقة

$$\mathrm{T_{PMD}}(\omega_l) = \exp(-j\omega_l \vec{\tau}\cdot\vec{\sigma}/2) \quad (8)$$

حيث $(\vec{\sigma})$ يمثل التدوين القياسي لمصفوفات باولي التي تحقق العلاقة $\vec{\sigma}\times\vec{\sigma} = 2j\vec{\sigma}$, $\vec{\tau}$يمثل متجه ستوكس حقيقي ثلاثي الأبعاد. في هذا العمل، قيمته (DGD) واتجاهه $(\vec{\tau}_0 = \vec{\tau}/\tau)$ يفترض أن يكون غير معتمد على التردد. المصفوفة بالمعادلة (8) لها اثنين من المتجهات الذاتية $|\vec{\tau}_0>$ و $|\vec{\tau}_\perp>$ في فضاء جونز ثنائي البعد، تشير إلى اتجاهات البطيئة $(|\vec{\tau}_0>)$ والسريعة $(|\vec{\tau}_\perp>)$ للحالة الرئيسية للاستقطاب (PSP) مع عناصر المصفوفة:

حيث $|\vec{\tau}_0>$ يمثل متجه جونز المتوافق معمتجه ستوكس $\vec{\tau}_0$. للحصول على إشارة الدخل المقدمة في المعادلة (6)، نقدم مصفوفة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) لجونز المعطاة في المعادلة (8)بحيث أن متجه تشتت نمط الاستقطاب (PMD) $(\vec{\tau})$ يشير في الاتجاه البطيء، والذي يكون متفق عليه عادة.

- الفقد الاستقطابي (PDL): بالنسبة لمصفوفة جونز $(\mathrm{T_{PDL}})$ للفقد الاستقطابي (PDL) فإنه يتم إعطاءها بواسطة العلاقة [17]:

$$\mathrm{T_{PDL_1}} = \exp(-\alpha/2)\exp(\vec{\alpha}\cdot\vec{\sigma}/2) \quad (9)$$

حيث تربط هذه المصفوفة بين دخل وخرج الفقد الاستقطابي $(\mathrm{PDL_1})$، ويكون لها متجهين ذاتيين متعامدين وهما $(|\vec{\alpha}_0>)$ و$(|\vec{\alpha}_\perp>)$ في فضاء جونز ثنائي البعد.

عندما تسافر الإشارة في أنظمة اتصالات الألياف البصرية يحدث تهوين لهذه الإشارة مما يسبب ضعف في جودة المعلومات عند استقبالها في المستقبل، لهذا وجب استخدام مضخمات بصرية

لتضخيم الإشارة حيث يتم ادخالها في أماكن محددة لتعزيز الإشارات البصرية، يتيح هذا التعزيز إرسال الإشارات بنجاح من خلال طول الكابل المتبقي[17]. بالتالي في هذه المرحلة تدخل الإشارة البصرية إلى المضخم البصري ذو الكسب البصري G بعد مرورها عبر المسار (2) حيث تتم عملية التضخيم لهذه الإشارة الداخلة. من جهة أخرى، فإن التضخيم البصري يسبب في الانبعاث التلقائي المضخم، تشويش الناتج من المضخم البصري يدعى تشويش الانبعاث التلقائي المضخم (ASE) يضعف النظام ويقلل من جودته ويؤثر بشكل سلبي على نسبة الإشارة إلى التشويش (OSNR) [17].

بعد خروج الإشارة المضخمة من المضخم البصري عند المسار (3) نجد أن ضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة (ASE) قد أضيفت إلى الإشارة على هيئة ضوضاء جاوس $\vec{n}_{input}(t)$ (بافتراض أن القوة المدخلة للنظام منخفضة بما فيه الكفاية، مما يجعل تأثير التشويش غير الخطي الناجم عن ضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة(ASE) مهملة. يمكن أن تحلل الضوضاء الناتجة عن ضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة$\left(\vec{n}_{input}(t)\right)$ (ASE) في الشكل السابق في متجهين جونز المتعامدين (أي $|\vec{e}_x>$ و $|\vec{e}_y>$), كما يمكن كتابتها على صورة فوريه باستخدام مفكوك (Karhunen–Lo`eve) على الصورة التالية:

$$\vec{n}_{input}(t) = n_x(t)|\vec{e}_x> + n_y(t)|\vec{e}_y>$$

$$= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left[(N_{in})_{x,m}|\vec{e}_x> + (N_{in})_{y,m}|\vec{e}_y>\right] e^{-j\frac{2\pi m(t-t_i+T_0)}{T_0}} \qquad (10)$$

في المعادلة (10)، نفترض أن الفترة الزمنية الكلية لاستجابة النبضة داخل المرشحات (المصفيات) البصرية (عرض النطاق الترددي لها B_o) والمرشحات الكهربائية (عرض النطاق الترددي لها B_r) تكون على الصورة $\left(T_0 = \mu(\frac{1}{B_o} + \frac{1}{B_r})\right)$, حيث يمثل μ معامل تسوية عديم الأبعاد يجب أن يحسب لكل فترة زمنية. تدخل الإشارة البصرية بعد ذلك إلى مصدر آخر للفقد الاستقطابي (PDL_2) بالتالي فإن الإشارة تكون مشوهة بشكل إضافي. الجدير بالذكر أنه يمكن دراسة تأثير ضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة (ASE) على النظام البصري السابق من خلال المقارنة لحالتين خاصتين، وهما:

1- النظام ذو ضوضاء (ASE) المستقطب جزئيًا (على افتراض(PDL_2)تكون غير مهملة).

2- النظام ذو ضوضاء (ASE)غير المستقطب (بافتراض أن(PDL_2)تكون مهملة).

المرحلة الثانية: تعبر الإشارة البصرية المسار (4) لتدخل للمصفى البصري ليتم تصفيتها بصريًا، وعلى افتراض أن المرشح البصري ليس له أي تأثير على استقطاب الإشارة حيث أن تأثير الفقد الاستقطابي (PDL)المحتمل للمرشح البصري على الإشارة والضوضاء يمكن أن يكون تضمينه في الفقد الاستقطابي(PDL_2)الذي تم إهماله في هذه الدراسة.

بعد مرور الإشارة البصرية للمسار (5) يتم استقبالها للكشف عنها بصيغة التضمين المناسبة، ومن ثم تعبر المسار (6).

تمر الإشارة البصرية خلال المسار (6) لتدخل إلى المصفى الكهربي،حيث يتم تحويل الضوء الخارج من الطرف البعيد لوسط النقل مرة أخرى إلى إشارة كهربائية بواسطة المصفى الكهربي والذي يتم وضعه عند مدخل جهاز الاستقبال لتكون الإشارة البصرية على الصورة الكهربائية عند زمن t_i. يتم بعد ذلك تضخيم هذه الإشارة الكهربائية قبل فك التشفير أو إزالة التضمين من أجل الحصول على المعلومات المرسلة الأصلية.

يعطى التيار الكهربي الناتج عن هذه المرحلة بالعلاقة:

$$y(t_i) = \frac{1}{2}[\vec{s}^o(t_i + T_b) + \vec{n}^o(t_i + T_b)] \cdot [\vec{s}^o(t_i) + \vec{n}^o(t_i)]^* + c.c. \quad (11)$$

حيث t_i يمثل زمن العينة $(t_i = t_0 + T_b\ , i = 0, \dots, N-1)$, أو c. c. يمثل $[\dots]^*$ المرافق المركب للإشارة، $\vec{s}^o(t_i)$ الاشارة الداخلة، $\vec{n}^o(t_i)$ الضوضاء الناتجة عن الانبعاث التلقائي المضخمة (عند خرج المصفى البصري).مساهمة الضوضاء في التيار الكهربي $((t_i))$ ناتج عن الضوضاء الداخلة خلال الفترة الزمنية$(t_i - T_o, t_i)$, حيث يتألف هذا التيار من ثلاثة أجزاء في النظام البصري بحيث يمكن كتابته بالعلاقة التالية:

$$y(t) = y_{ss}(t) + y_{nn}(t) + y_{ns}(t) \quad (12)$$

حيث: $y_{ss}(t)$ تمثل تفاعل الإشارة – الإشارة المساهم في تيار المستقبل.

$y_{nn}(t)$ تمثل تفاعل الضوضاء – الضوضاء المساهم في تيار المستقبل.

$y_{ns}(t)$ تمثل تفاعل الإشارة – الضوضاء المساهم في تيار المستقبل.

تتم دراسة هذه الأجزاء الثلاثة للتيار الناتج كالتالي:

تفاعل الإشارة – الإشارة لنموذج قطعة (PMDوPDL):

يمكن تمثيل الإشارة المدخلة المعطاة في المعادلة (12) بواسطة رموز ديراك عن طريق المعادلة:

$$|\vec{s}_{in}(t_i) = \left[(S_{in})_{-L}e^{-j\frac{2\pi Lt_i}{NT_b}}, \dots, (S_{in})_L e^{j\frac{2\pi Lt_i}{NT_b}}\right]^T |\vec{p}_s > \qquad (13)$$

بمساعدة علاقات الاكتمال $|\vec{k}_0 >< \vec{k}_0| + |\vec{k}_\perp >< \vec{k}_\perp| = 1(\vec{k} = \vec{\tau}, \vec{\alpha})$ في فضاء جونز ثنائي البعد، نجد أن:

$$T_{PMD} = e^{-j\frac{\omega_l \tau}{2}}|\vec{\tau}_0 >< \vec{\tau}_0| + e^{j\frac{\omega_l \tau}{2}}|\vec{\tau}_\perp >< \vec{\tau}_\perp| \qquad (14)$$

$$T_{PDL1} = (|\vec{\alpha}_0 >< \vec{\alpha}_0| + |\vec{\alpha}_\perp >< \vec{\alpha}_\perp|)T_{PDL1}(|\vec{\alpha}_0 >< \vec{\alpha}_0| + |\vec{\alpha}_\perp >< \vec{\alpha}_\perp|)$$

$$T_{PDL1} = |\vec{\alpha}_0 >< \vec{\alpha}_0| + e^{-\alpha}|\vec{\alpha}_\perp >< \vec{\alpha}_\perp| \qquad (15)$$

وهو ما يعني عنصر مصفوفة الاستقطاب $(\vec{\tau}, \vec{\alpha})_{l,l/}$تكون نحو استقطاب الدخل $|\vec{p}_s >$ في اتجاهين متعامدين وهما:

$$P(\vec{\tau}, \vec{\alpha})_{l,l/}|\vec{p}_s >= (P_{\alpha_0})_{l,l/}|\vec{p}_s > +(P_{\alpha_\perp})_{l,l/}|\vec{p}_s > \qquad (16)$$

بحيث أن:

$$\left(P_{\alpha_0}\right)_{ll/}|\vec{p}_s >= \delta_{l,l/}|\vec{\alpha}_0 > \left[\langle\vec{\alpha}_0|\vec{\tau}_0\rangle\langle\vec{\tau}_0|\vec{p}_s\rangle e^{\frac{-j\omega_l\tau}{2}} + \langle\vec{\alpha}_0|\vec{\tau}_\perp\rangle\langle\vec{\tau}_\perp|\vec{p}_s\rangle e^{\frac{j\omega_l\tau}{2}}\right]$$

$$\equiv \delta_{l,l/}c_{l\alpha_0}|\vec{\alpha}_0 > \qquad (17)$$

$$\left(P_{\alpha_\perp}\right)_{ll/}|\vec{p}_s >= \delta_{l,l/}e^{-\alpha}|\vec{\alpha}_\perp$$

$$> \left[\langle\vec{\alpha}_\perp|\vec{\tau}_0\rangle\langle\vec{\tau}_0|\vec{p}_s\rangle e^{\frac{-j\omega_l\tau}{2}} + \langle\vec{\alpha}_\perp|\vec{\tau}_\perp\rangle\langle\vec{\tau}_\perp|\vec{p}_s\rangle e^{\frac{j\omega_l\tau}{2}}\right]$$

$$\equiv \delta_{l,l/}c_{l\alpha_\perp}|\vec{\alpha}_\perp > \qquad (18)$$

حيث يمكن تمثيل الإشارة الموضحة في المعادلة (18) بالعلاقة:

$$|\vec{s}^0(t_i) >= 0^s\left[\left(P_{\alpha_0} + P_{\alpha_\perp}\right)|\vec{p}_s >\right]\Phi_{CD}|s_{in}(t_i) >$$

$$= \left[\left(P_{\alpha_0} + P_{\alpha_\perp}\right)|\vec{p}_s >\right]|s^0(t_i) > \qquad (19)$$

لأن كل من المصفوفات الثلاثية الأبعاد $(2L + 1)$ في المعادلة (18) تكون قطرية، يمكن تخفيفها مع أي من المصفوفات الأخرى في المعادلة (18). يمكن الحصول بسهولة على تفاعل الإشارة – الإشارة المساهم في تيار المتلقي $y_{ss}(t)$

تفاعل تشويش (ضوضاء) – تشويش (ضوضاء) لنموذج قطعة(PMDوPDL):

إن معالجة ضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة (ASE) المدخلة عند المسار (3) في الشكل السابق لا يمكن معالجتها أو اعتبارها على أنها جزئيين أحدهما المقدار والآخر اتجاه. ومع ذلك، يمكننا أن تتحلل إلى عنصرين متعامد، بمعنى:

$$|\vec{N}_{in}> = |N_{in}^{\alpha_0}> \otimes |\vec{\alpha}_0> + |N_{in}^{\alpha_\perp}> \otimes |\vec{\alpha}_\perp> \quad (20)$$

وبشكل مشابه، يمكن كتابة التشويش المقابل عند المسار (4) في الشكل السابق بالصيغة:

حيث $U^\dagger$هي المصفوفة الهرميتية لـ U, والتي تُستخدم لترتيب قطرية تفاعل الضوضاء – الضوضاء $(O^n)^\dagger \Re^{nn}(T_b)O^n$. وبالتالي فإن التيار المصفى الناجم عن تفاعل الضوضاء – الضوضاء يعطى بالعلاقة:

تفاعل الإشارة – تشويش (ضوضاء) لنموذج قطعة(PMDوPDL):

بنفس النسق بالنسبة لتفاعل الإشارة والضوضاء، فإن المجال المحول $|\vec{b}\ (t_i)>$ يعطى بالصيغة:

$$|\vec{b}^D(t_i)> = B^D[P(\vec{\tau},\vec{\alpha})|\vec{p}_s>]|s^0(t_i)> = B^D\left[P_{\alpha_0}|\vec{p}_s>\right]|s^0(t_i)> + B^D\left[P_{\alpha_\perp}|\vec{p}_s>\right]|s^0(t_i)>$$

$$|\vec{b}^D(t_i)> \equiv \tilde{b}^D_{\alpha_0} \otimes |\vec{\alpha}_0> + \tilde{b}^D_{\alpha_\perp} \otimes |\vec{\alpha}_\perp> \quad (21)$$

حيث $|b^D(t_i)>$ تمثل مجال الانتقال، وتعطى على الصورة:

$$|b^D(t_i)> = U^\dagger(O^n)^\dagger R^n_{ns}|s^o(t_i)> = B^D|s^0(t_i)> \quad (22)$$

بالتالي فإن التيار المصفى كهربائيًا والناتج من تفاعل الإشارة والضوضاء يعطى بالعلاقة:

$$y_{ns}(t_i) = \langle \vec{Z}|\vec{b}^D(t_i)\rangle + c.c. = \langle Z_{\alpha_0}|\tilde{b}^D_{\alpha_0}(t_i)\rangle + \langle Z_{\alpha_\perp}|\tilde{b}^D_{\alpha_\perp}(t_i)\rangle + c.c. \quad (23)$$

استنتاج معدل الخطأ النبضي (BER) باستخدام دالة توليد العزوم (MGF):

بناءً على التيار الناتج$y(t)$يمكن الحصول على دالة توليد العزوم (MGF) عن طريق حساب المتوسط على الضوضاء عندالمسار (3) في الشكل السابق وذلك باستخدام الصيغة التالية:

$$\langle e^{s(c^2+2ca)}\rangle = \int \frac{dc}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{c^2}{2\sigma^2}} e^{s(c^2+2ca)} = [1-2\sigma^2 s]^{\frac{1}{2}} e^{\frac{2\sigma^2 s^2 a^2}{1-2\sigma^2 s}} \quad (24)$$

بالتالي يمكن كتابة دالة توليد العزوم(MGF) للتيار $y(t)$ الذي تمت تصفيته على الصورة:

$$\psi_{t_i}(s) = \langle e^{s[y(t)]} \rangle = e^{sy_{ss}(t)} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 \left|\tilde{b}_m^D(t_i)\right|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \qquad (25)$$

$\langle \ldots \rangle$ يمثل المتوسط على المتغيرات العشوائية , $y(t)$ يتألف من ثلاثة أجزاء في النظام البصري كما هو موضح في المعادلة (12). بالتالي يمكن كتابة الدلة المولدة للنظام على الصورة:

$$\psi_{t_i}(s) = \langle e^{s[y_{ss}(t)+y_{nn}(t)+y_{ns}(t)]} \rangle$$

$$= e^{sy_{ss}(t)} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 \left|\tilde{b}_m^D(t_i)\right|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \qquad (26)$$

في هذا العمل، الرمز $\langle . \rangle$ يُشير إلى متوسط الضوضاء، و$\langle . | . \rangle$ الرمز يشير إلى المنتج الداخلي الهرميتي. بالنسبة لدالة توليد العزوم (MGF)، يمكن الحصول على معدل الخطأ النبضي (BER) والذي يعتبر باراميتر الأداء الأساسي لنظام الاتصالات البصرية باستخدام العلاقة التالية:

$$BER_{y_{th}} = \frac{\pm 1}{2\pi j} \int_{C_{\pm}} \frac{\psi_{t_i}(s)}{s} e^{-sy_{th}} ds \qquad (27)$$

حيث y_{th} تمثل عتبة الكشف ($BER_{y_{th}}$ يمثل معدل الخطأ في البتات عند عتبة الكشف)، بحيث تؤخذ حدود التكامل $+$ و C_+ عندما يكون $y_{ss} < y_{th}$, بينما تؤخذ حدود التكامل $-$ و C_- عندما يكون $y_{ss} > y_{th}$. بالتعويض عن دالة توليد العزوم (MGF) في المعادلة الأخيرة نتحصل على:

$$BER_{y_{th}} = \frac{\pm 1}{2\pi j} \int_{C_{\pm}} ds \frac{e^{-(y_{th}-y_{ss})s}}{s} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 \left|\tilde{b}_m^D(t_i)\right|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \qquad (28)$$

متوسط معدلات الخطأ النبضي (BERs) على جميع البتات خلال الفترة $t_i = t_0 + kT_b$ تعطى بالعلاقة [10]:

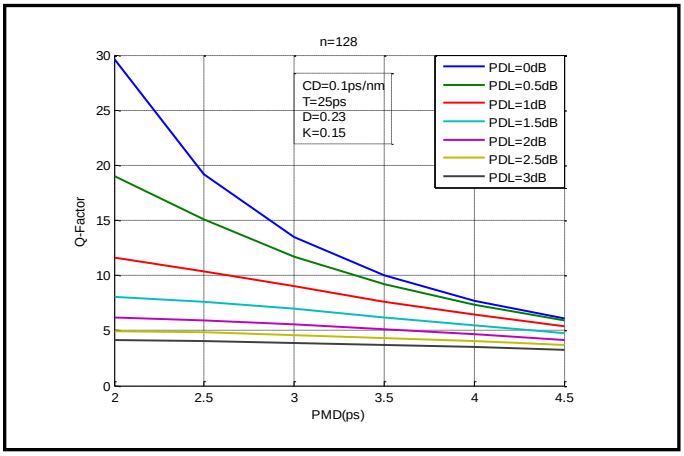
$$BER = \sum_{i=0}^{N-1} BER_{y_{th}}(t_i)/N \qquad (29)$$

النتائج

أولا: دراسة تأثير تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على بارامترات الأداء

في هذه المرحلة تم دراسة تأثير نمط الاستقطاب (PMD) على بارامترات الأداء المتمثلة في عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER) ونسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) حيث تم الحصول على قيم عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER) ونسبة الإشارة للتشويش (OSNR) على المراحل التالية:

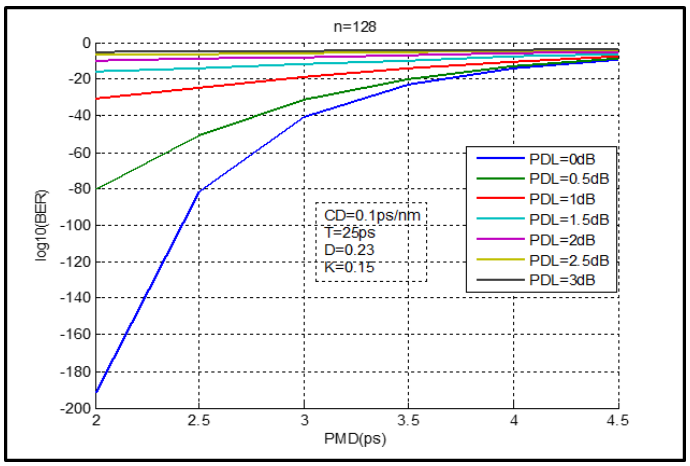
1- دراسة تأثير تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على عامل الجودة (Q-Factor)



شكل(3) العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وعامل الجودة (Q-Factor) مع تغير الفقد الاستقطابي (PDL)

نلاحظ من خلال الشكل (3) أعلاه أنه كل ما زاد تشتت نمط الاستقطاب (PMD) والفقد الاستقطابي (PDL) قل عامل الجودة (Q-Factor), في المنحنى الأزرق كان الاضمحلال كبير, عندما كان (PDL = 0) وكان (PMD = 0.5Ps) كانت أكبر قيمة لعامل الجودة (Q-Factor) ومع زيادة PMD وPDL النقصان في عامل الجودة يكون طفيف والاضمحلال يكون صغير وهذا بسبب التفاعل بين PMD وPDL.

2- تأثير تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على معدل الخطأ النبضي (BER)

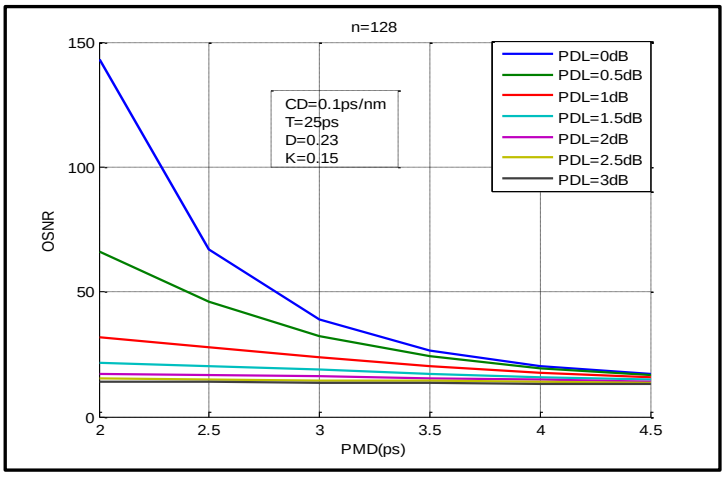


شكل (4) العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ومعدل الخطأ النبضي $\log_{10}(BER)$ مع تغير الفقد الاستقطابي (PDL)

نلاحظ من الشكل (4) أعلاه أنه يزداد معدل الخطأ النبضي (BER) بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وتشتت نمط الاستقطاب (PMD) أفضل قيمة لمعدل الخطأ النبضي (BER) عند (PDL = 0.5dB و PMD =2Ps)، مع زيادة PMD وPDL يقل الاضمحلال وذلك بسبب التفاعل بين PMDوPDL .

3- دراسة تأثير تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR)

نلاحظ من الشكل (5) أنه بزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) يقل نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR), أفضل قيمة ل (OSNR) عندما كان (PDL=0dB و PMD=2ps).



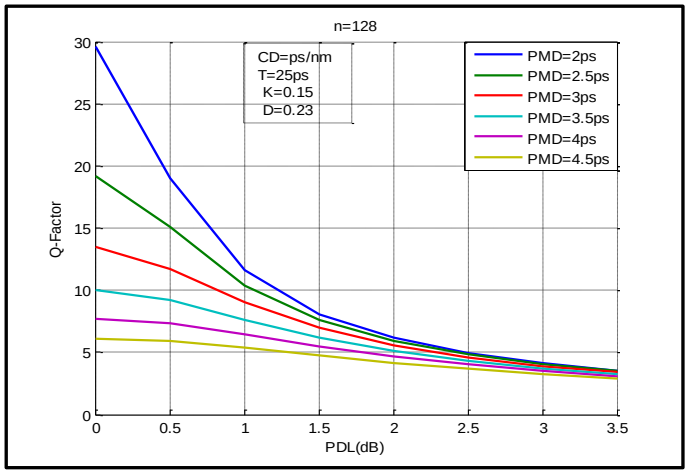
شكل (5) العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ونسبة الاشارة البصرية للتشويش (OSNR) مع تغير الفقد الاستقطابي (PDL)

ثانيا : تأثير الفقد الاستقطابي (PDL)على بارامترات الأداء

في هذه المرحلة تم دراسة تأثير الفقد الاستقطابي (PDL) على بارامترات الأداء المتمثلة في عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER) ونسبة الإشارة للتشويش (OSNR), حيث تم الحصول على قيم عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER) ونسبة الإشارة للتشويش (OSNR) حسب النموذج الرياضي المدروس باستخدام برنامج الماتلاب .

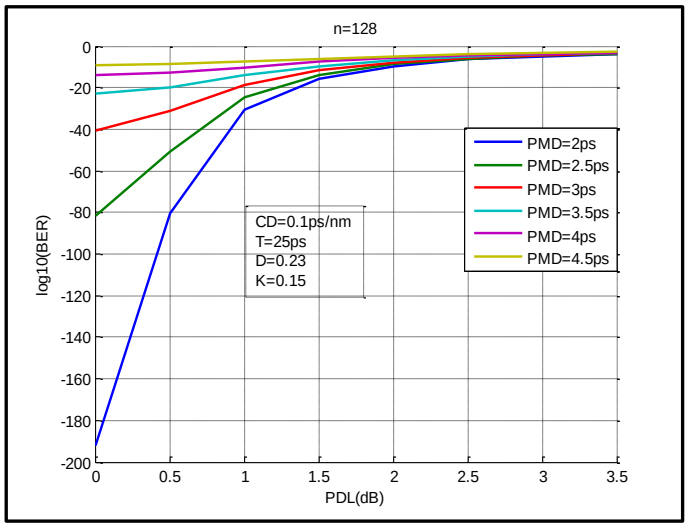
1- تأثير الفقد الاستقطابي (PDL)على عامل الجودة (Q-Factor)

نلاحظ من الشكل (6) أنه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل عامل الجودة (Q-Factor), ويكون أفضل قيمة (Q-Factor) عندما يكون (PDL=0dB و PMD=2ps) كما هو مبين في المنحنى الأزرق حيث كلما زاد كل من (PDL) و (PMD) يقل (Q-Factor) بشكل الكبير الأمر الذي يؤدي إلى إضعاف النظام ويقلل من كفاءته وجودة الإشارة المنتقلة عبر الليف.



شكل (6) العلاقة بين الفقد الاستقطابي (PDL) وعامل الجودة (Q-Factor) مع تغير تشتت نمط الاستقطاب (PMD)

2- تأثير الفقد الاستقطابي (PDL)على معدل الخطأ النبضي (BER)

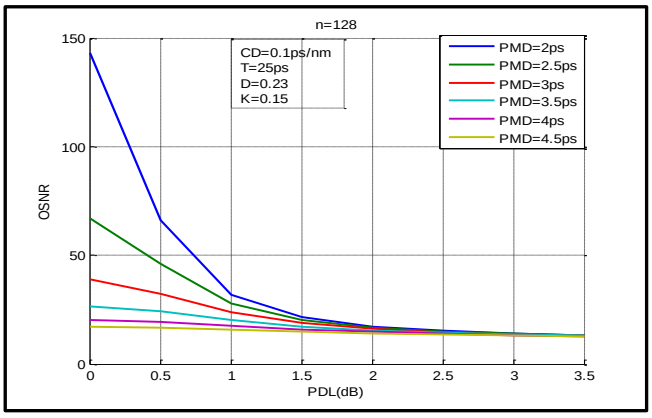


شكل (7) العلاقة بين الفقد الاستقطابي (PDL) معدل الخطأ النبضي $\log_{10}(BER)$ مع تغير تشتت نمط الاستقطاب (PMD)

نلاحظ من الشكل (7) أنه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يزداد معدل الخطأ النبضي (BER), ويكون أفضل قيمة (BER) عندما يكون (PDL=0dB و PMD=2ps) كما هو مبين في المنحنى الأزرق حيث كلما زاد كل من (PDL) و (PMD) يزيد (BER) بشكل الكبير الأمر الذي يؤدي إلى إضعاف النظام ويقلل من كفاءته وجودة الإشارة المنتقلة عبر الليف.

3- تأثير الفقد الاستقطابي (PDL) على قوة الاشارة البصرية بالنسبة للتشويش (OSNR)

من الشكل (8) يتضح أنه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR), ويكون أفضل قيمة ل (OSNR) عندما يكون (PDL=0dB وPMD=2ps) كما هو مبين في المنحنى الأزرق حيث كلما زاد كل من (PDL) و (PMD) يقل (OSNR) بشكل الكبير الأمر الذي يؤدي إلى إضعاف النظام ويقلل من كفاءته وجودة الإشارة المنتقلة عبر الليف.



شكل (8) العلاقة بين الفقد الاستقطابي (PDL) ونسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) مع تغير تشتت نمط الاستقطاب (PMD)

الخلاصة

باستخدام الدراسة الرياضية التحليلية و برنامج الماتلاب لفهم الأسس العلمية لتأثير الفقد الاستقطابي على أنظمة اتصالات الالياف البصرية , تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على حساب معدل الخطأ النبضي (BER) للإشارات الخارجة من أنظمة اتصالات الالياف البصرية , و وجد انه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يزداد معدل الخطأ النبضي (BER), ويكون أفضل قيمة (BER) عندما يكون (PDL=0dB و PMD=2ps) , كما تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على عامل الجودة (Factor–Q) و وجدنا بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل عامل الجودة (Q–Factor), إضافة الى ذلك تمت دراسة تأثير الفقد الاستقطابي على نسبة الإشارة الى للتشويش المستقبلة في اجهزة الاستقبال (OSNR) أوضحت الدراسة انه بزيادة الفقد الاستقطابي (PDL) وزيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يقل نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) . أوضحت الدراسة ان أفضل قيمة (Q–Factor) ومعدل الخطأ النبضي وكذلك نسبة الإشارة البصرية للتشويش عندما يكون PDL=0dB و PMD=2ps.

References المراجع

1- Shahada al Mwssa, Moieen Yonees, Weal Hassan sakr, "DMT Modulation is the Best Option for Digital Subscriber Line VDSL", Journal for Studies Scientific Research-Engineering Sciences Series Vol.28, No.2, 2006.

2- Rouba Daoud, "Studying and Analyzing the modulators and Demodulators of PCM", Tishreen University Journal for Studies Scientific Research-Engineering Sciences Series Vol.40, No 4, 2018.

3- Sudhir Babu, K.v Sambasiva Rao, " Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes", International Journal of Computer Applications" Vol. 26 ,No.9,July 2011.

4- N.Gisin, "The statistics of polarization-dependent loss" Opt,Commun, vol.144,pp.399-405,1995.

5- A.Mecozzi and M.shtaif, "The statistics of polarization-dependent loss in optical communication systems", IEEE Photon. Techonol. Lett, vol.14, 2002.

6- Zhongxi Zhang, Liang Chen, Xiaoyi Bao "Accurate BER evaluation for lumped DPSK and OOK systems with PMD and PDL" OPTICS EXPRESS Vol. 15, No. 15, 2007.

7- Farhan Hussain and M.S.Islam "Limitation Imposed by Polarization-Dependent Loss on a Fiber Optic Communication System", Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol:4, No:8, 2010.

8- Maxim Kuschnerov, Mohamed Chouayakh, Kittipong Piyawanno, Bernhard Spinnler, Mohammad S. Alfiad,Antonio Napoli, and Berthold Lankl, "On the Performance of Coherent Systems in the Presence of Polarization-Dependent Loss for Linear and Maximum Likelihood Receivers" IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 22, NO. 12, JUNE 15, 2010.

9- Yangzi Liu, Peter Shepherd and Duncan Allsopp, "Polarization Dependent Loss Emulator Built with Computer-driven Polarization Controllers and Single Mode Fibre", In Proceedings of the 6th International Conference on Optical Communication Systems (OPTICS-2015), pages 42-47.

10- Brian T. Kirby, Daniel E. Jones, and Michael Brodsky, "Effect of Polarization Dependent Loss on the Quality of Transmitted Polarization Entanglement", J. OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 37, NO. 1, 2019.

11- Jahangir Alam S. M., M. Rabiul Alam. Hu Guoqing, Zakirul Mehrab, "Improvement of Bit Error Rate in Fiber Optic Communications", International Journal of Future Computer and Communication,Vol.3,No.4, August 2014.

12- M.A O thaman ,M,M,Ismail "erbium doped fiber amplifier (EDFA) for C – band optical communication system, JETIJENS 2012.

13- span katiyar, "Optical Communications", frist edition, New Delhi,2010.

14- A.Cem COKRAK ,Ahmet ALTUNCU" Gain and noise performance of erbium doped fiber amplifier, "J. OF ELECTRONIC ENGINEERING,2004.

15- Silvano Donati, Guido Giuliani, "Noise in an Optical Amplifier:Formulation of a New Semiclassical Model",IEEE J.OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL.33,NO.9,1997.

16- Rajdi AGALLIU, Michal LUCKI, "BENEFITS AND LIMITS OF MODULATION FORMATS FOR OPTICAL COMMUNICATIONS", OPTICS AND OPTOECTRONICS,VOL.12, No. 2,2014.

17- Farhan Hussain and M.S.Islam "Limitation Imposed by Polarization-Dependent Loss on a Fiber Optic Communication System", Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol:4, No:8, 2010.

18- Zhongxi Zhang, Liang Chen, Xiaoy Bao, "Moment-generating function method used to accurately evaluate the impact of linearized optical noise amplified by EDFAs", arxiv:1207.3362v2 [physics. optics]18Jun 2013.

19- T. S. Khatavker, D.S.Bormane, "OSNR CHALLENGE IN DWDMLINK ",INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING AND TECHNOLOGY(IJECT),Vol. 5, No.2, (2014).

20- Stamatios V. Kartalopoulos, "FREE SPACE OPTICAL NETWORKS for Ultra- Broad Band Services",Johan and Sons, Inc., Hobken,2011.

21- Mohamed Elbawab, Mohamed Abaza and Moustafa H. Aly,"Relay Selection Schemes for FSO Communications over Turbulent Channels", 2018.

22- EDWARD COLLETT, "POLARIZED LIGHT IN FIBER OPTICS", Library of Congress Cataloging-in-Publication Date 2003.

23- Abdelkerim Amari, Octavia A. Dobre, Ramachandran Venkatesan, O.S.Sunish Kumar, Phihippe Ciblat, and Yves Jaouen" A survey on fiber nonlinearity compensation for 400 Gbps and beyond optical communication systems", 2017.