

Received 2025/12/31
Accepted 2026/01/21
Published 2026/01/22

تم استلام الورقة العلمية في
تم قبول الورقة العلمية في
تم نشر الورقة العلمية في

دراسة تأثير تغير دورة عمل النظام (D) على كفاءة نظام اتصالات الألياف البصرية

إسراء محمد بن حميدة سعاد أبو القاسم المجاور سعاد أبو زريبة

جامعة مصراته، مصراته، ليبيا

lyabwzyd697@gmail.com suadabu@yahoo.com esra.ben712@gmail.com

الملخص

في هذا البحث تم تقديم دراسة لتقدير تأثير تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على أنظمة الإرسال الألياف البصرية وذلك من خلال مقاييس الأداء المتمثلة في عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER). تم تقدير نتائج عامل الجودة (Q-Factor) ومعدل الخطأ النبضي (BER) للمتغير المتمثل في دورة عمل النظام (D). تعتبر دورة عمل النظام (D) مقياساً مهماً في أنظمة الألياف البصرية، حيث أنها تشير إلى عرض النسبة بالنسبة إلى إجمالي فترات البت المستخدمة في صيغ التضمين. ويؤثر تغيير دورة عمل النظام (D) في الأنظمة البصرية بشكل كبير على كفاءة النظام. بينت الدراسة أن هذا المتغير يؤثر على أداء وجودة عمل أنظمة الإرسال. ولقد أظهرت النتائج أنه بزيادة قيمة دورة عمل النظام (D) تقل قيمة عامل الجودة (Q-Factor) وتزداد قيمة معدل الخطأ النبضي (BER). وبالتالي فإنه من المهم جدًا مراعاة تأثير دورة عمل النظام (D) عند تصميم وتنفيذ نظام الاتصالات البصرية.

الكلمات المفتاحية: تشتت نمط الاستقطاب، دورة عمل النظام، حامل الموجة البصرية، الدليل الموجي، التضمين، معدل الخطأ النبضي، عامل الجودة.

Study the effect of the change of Duty Cycle (D) on the Optical Fiber Communication System Efficiency

Esra Mohamed Ben
Hemia

Suad Aboulgasim
Almujawir

Suad Mohamed
Abuzariba

University of Misurata, Misurata, Libya
esra.ben712@gmail.com suadabu@yahoo.com lyabwzyd697@gmail.com

Abstract

This research presents a study to evaluate the effect of polarization mode dispersion (PMD) on fiber optic transmission systems using performance metrics such as quality factor (Q-Factor) and bit error rate (BER). The results of the (Q-Factor) and (BER) were evaluated for the system duty cycle (D) variable. The system duty cycle (D) is a crucial metric in fiber optic systems, as it indicates the pulse width relative to the total bit duration used in modulation modes. Variations in the system duty cycle (D) significantly impact system efficiency. This study demonstrated that this variable affects the performance and quality of transmission systems. The results showed that as the system's duty cycle (D) increases, the quality factor (Q-Factor) decreases and the bit error rate (BER) increases. Therefore, it is crucial to consider the impact of the system's duty cycle (D) when designing and implementing an optical communication system.

Keywords: Polarization Mode Dispersion (PMD), Duty Cycle, Optical Wave Carrier, the Waveguide, Modulation, (Bit Error Rate (BER), Q-Factor.

1. المقدمة

يعرف الاتصال بشكل واسع على أنه نقل للمعلومات من مكان إلى آخر، وغالباً ما يتم نقل المعلومات بواسطة موجة حاملة كهرومغناطيسية [1,2] إن نظام اتصالات الألياف البصرية مماثل في المفهوم الأساسي لأي نوع نظام اتصال، حيث تستخدم أنظمة الاتصالات البصرية الموجات الكهرومغناطيسية كنافلات لنقل المعلومات، ويتم عادة إرسال المعلومات ضمن هذا النظام بواسطة تضمين (تعديل) لهذه المعلومات في موجة كهرومغناطيسية، وهي التي تعمل كنافل لإشارة المعلومات [3,4].

في وقتنا الحاضر نجد أن الألياف البصرية أخذت مساحة كبيرة في مجال الاتصالات والتي قد جاءت نتيجة لمجموعة واسعة من المزايا التي تمتلكها [5]، حيث تعتبر الألياف البصرية من أفضل التقنيات الحديثة في مجال الاتصالات الذي يستخدم موجة حاملة بصرية موجهة على طول الليف البصري لنقل المعلومات إلى مسافات طويلة بمعدل بيانات عالي وخسارة قليلة [6, 7].

لكي نستطيع فهم كيفية انتشار الضوء خلال الليف البصري يجب دراسة الأنماط المنتشرة خلال دليل الموجة المستوي والذي يمثل النموذج الأبسط لليف البصري، حيث يمكن أن نتصور هذا الدليل على أنه مقطع مستوي طولي لليف البصري، يتتألف من شريحة من مادة عازلة شفافة، سماكتها الذي يمثل قطر لب الليف البصري بمعامل انكسار (n_1) محصور بين قطعتين من مادة عازلة ذات معامل انكسار (n_2) [8]، يدعم العاكس تركيب الدليل الموجي وهو أيضًا عندما يكون سميك بما فيه الكفاية يخفض خسارة الإشعاع إلى الوسط المحيط [9]. وبالتالي فإنه من المفيد دراسة تداخل مكونات الموجة المستوية ضمن هذا الدليل الموجي العازل لكي نتحصل على نموذج محسن لانتشار الشعاع البصري [2, 10].

على الرغم من أن مزايا كابلات الألياف البصرية تتجاوز بكثير العيوب، إلا أن هناك بعض المشاكل أو العيوب المرتبطة باستخدام الألياف البصرية في أنظمة الاتصالات لابد من الإشارة لها بالرغم من أنها لا تقلل من أهمية الألياف البصرية في مجال الاتصال [11]، إن عيوب الإرسال البصري سيؤدي إلى تشوهات في الإشارة المرسلة وبالتالي يؤدي إلى حدوث خلل في نظام الاتصال، عليه فإنه يتوجب دراسة هذه العيوب بعناية كبيرة للحد من تأثيرها أثناء استخدام الألياف البصرية في شتى المجالات. وبسبب ذلك، كانت هناك دراسات عديدة كل منها يركز على عيب أو أكثر [12, 1]. من جهة أخرى في مجال الاتصالات، تعتبر أنظمة الاتصال ذات معدل البيانات المرتفع عرضة تماماً للعديد من مشكلات تدهور الإشارة، حيث تسببت هذه المشكلات البصرية في قيود عديدة على أداء نظام اتصالات الألياف البصرية، ومن أهم هذه القيود فقد الطاقة في الألياف البصرية والتشتت وبعض التأثيرات اللاخطية سواء كان معدل البيانات المرسلة منخفض نسبياً أو مع معدل البيانات العالي [3, 1]. في أنظمة اتصالات الألياف البصرية الأكثر تعقيداً ومع معدل البيانات العالي، يصبح تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ذو تأثير واضح على

كفاءة الإشارة. ومن ثم، يجب دراسة تأثيره وذلك للحد منه والوصول إلى نظام اتصالات ذو جودة عالية [7,2]. حيث أصبح معرفة تشتت نمط الاستقطاب (PMD) قضية رئيسية في تصميم نظام الاتصال مما يسببه من ضعف كبير لأنظمة ذات معدل البتات العالي، وذلك لأنه يؤدي إلى توسيع النبضات ومن ثم تشويهاً وهذا يؤدي إلى تدهور أداء نظام الاتصال [6,1]. على عكس العيوب الخطية الأخرى، نجد أن تشتت نمط الاستقطاب (PMD) يتغير بشكل عشوائي مع الزمن مما يجعل من الصعب تقديره أو مواجهته أو التعامل معه. لذلك، فإن الفهم الدقيق لتشتت نمط الاستقطاب (PMD) الذي يفرض تأثيرات ضارة إذا لم يتم التعامل معه بشكل صحيح ضروري لمهندسي النظام لضمان اتصال موثوق به بمعدلات بتات عالية عبر وصلات الألياف البصرية [1].

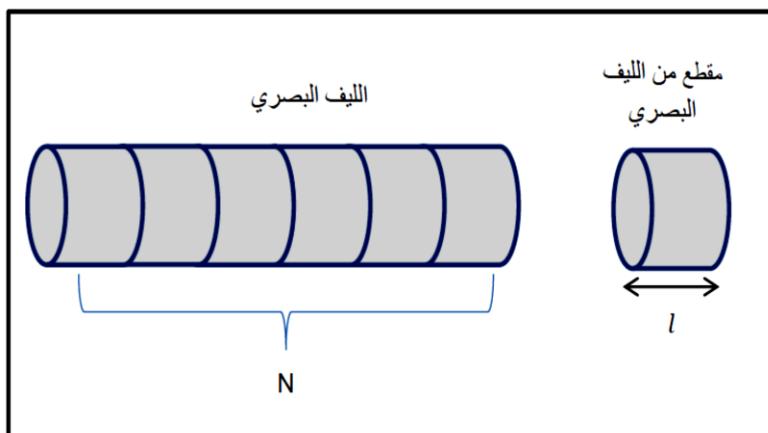
في أنظمة الألياف البصرية، لا تعد دورة عمل النظام (D) مقاييسًا بسيطًا للكفاءة ولكنها تشير إلى عرض النسبة بالنسبة إلى إجمالي فترات البت المستخدمة في صيغ التضمين المحددة مثل العودة إلى الصفر (RZ)، حيث يعمل تغيير دورة عمل النظام (D) على تحسين تحمل التشتت والكافاءة الطيفية، مما يجعل النظام أكثر اقتصاداً وقوة ضد ضعف الألياف البصرية. يؤثر تغيير دورة عمل النظام (D) في الأنظمة البصرية بشكل كبير على الكفاءة، مما يسمح بمعدلات بيانات أعلى من خلال استخدام الفترات الزمنية بشكل أفضل، وتقليل الحساسية للتشتت اللوني (CD)، وتحسين كفاءة الطاقة، على الرغم من أن دورة عمل النظام (D) الأمثل يعتمد على التشكيل المحدد وضعف النظام مثل التشتت، وغالباً ما يفضل انخفاض دورة عمل النظام (D) (نبضات أقصر) للحصول على أداء أفضل في الأنظمة عالية السرعة.

في هذا البحث تم دراسة تأثير تغيير قيم دورة عمل النظام (D) على عامل الجودة (Q) مع اعتبار تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وذلك لعدد البتات الداخلية لنظام ($n = 128$)، حيث تم الحصول على قيمة جيدة لعامل الجودة (Q-Factor).

2. نموذج النظام

إن الهدف الرئيسي من تصميم نموذج لنظام البصري هو الحصول على هامش مناسب للدراسة مع مراعاة العديد من العوامل، مثل التدهور الناتج عن الضوضاء البصرية، والعيوب الخطية وتشوهات شكل الموجة، وتقلبات بaramترات الأداء ودورة عمل النظام.

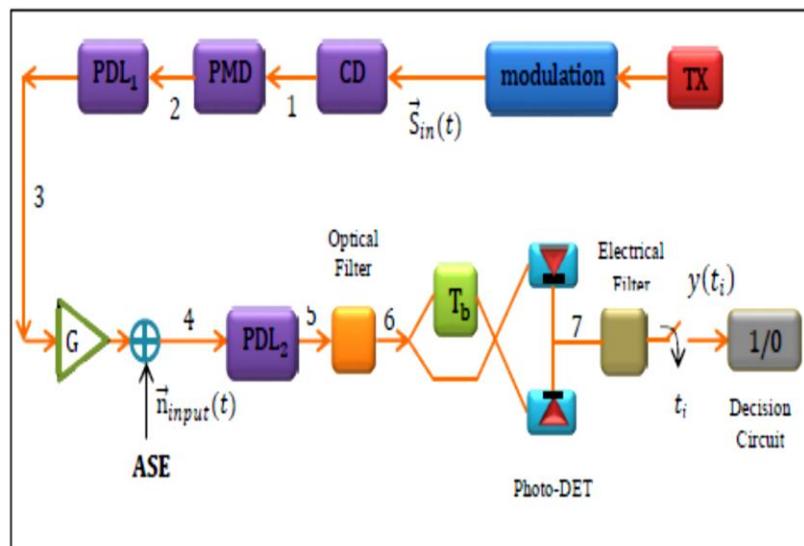
إضافة إلى أن معلمات التصميم الرئيسية كثيرة من بينها طول الليف البصري، عدد مقاطع الليف البصري. نظام الاتصال الليف البصري من أنظمة الإرسال لمسافات طويلة، وبالتالي فإنه يتم استخدام أطوال كبيرة جدًا للألياف البصرية، وعند النظر في الجوانب البصرية للواجهة، من المفيد النظر إلى معلمات الألياف البصرية، وسيط الإرسال بين المرسل والمستقبل. يمكن وصف الليف البصري بخصائص عديدة من بينها طول الليف البصري، قطر اللب، ومقاييس معامل الانكسار، والفتحة العددية، والتوهين وغيرها. تؤثر هذه المعلمات المترابطة بشكل مباشر إلى حد ما على متطلبات إخراج المرسل ومدخلات جهاز الاستقبال، الشكل (1) يظهر الليف البصري تحت الدراسة في الشكل المبسط له، حيث سنركز هنا، على جزء (أو مقطع) من الليف البصري ذو طول (l)، الذي يلخص فكرة النظر في المقاطع المجمعة التي يكون عددها الكلي (N)، والتي تشير إلى الليف البصري في الوضع الحقيقي.



شكل (1): الليف البصري قيد الدراسة باستخدام طريقة الحامل الموجي

يتطلب نقل المعلومات على شكل انتشار الضوء داخل الألياف البصرية التنفيذ الناجح لنظام اتصالات الألياف البصرية. يتتألف هذا النظام من عدد من المكونات المنفصلة التي ترتبط بعضها البعض بطريقة تمكّنهم من أداء المهمة المطلوبة. لتحقيق اتصال موثوق وآمن باستخدام الألياف البصرية، فإنه من الضروري أن تكون جميع المكونات داخل نظام الاتصال متوافقة بحيث يؤدي أدائها الفردي، قدر الإمكان، إلى تحسين أداء النظام الكلي

بدلاً من إضعافه. وبالتالي فإنه من المهم أن يتضمن تصميم نظام اتصالات الألياف البصرية تحسين عدد كبير من المعلومات المرتبطة بأجهزة الإرسال والألياف البصرية والمضمومات وأجهزة الاستقبال. الشكل (2) يمثل نموذج مكافئ لنظام الاتصال البصري المستخدم (نظام ليف بصري خطي) في الدراسة، والذي يظهر المكونات الرئيسية لنظام اتصالات الألياف البصرية، الذي يجمع بين جميع المكونات الأساسية مع القوى البصرية المناسبة في المرسل والمستقبل وذلك لتلبية متطلبات دراسة نظام الاتصال البصري.



شكل (2): نموذج نظام الاتصالات البصرية قيد الدراسة

لقد تم تصميم النموذج السابق بحيث يتمثل في أربعة مراحل يتم تقسيمها كالتالي: المرحلة الأولى: يتم فيها إطلاق الضوء المنبعث من المصدر البصري إلى النظام البصري مدمجة داخل الليف البصري الذي يشكل وسيط الإرسال في هذا النظام، حيث نلاحظ أن الإشارة البصرية ($\vec{S}_{in}(t)$) بدأت في الدخول في نظام اتصال الليف البصري بحيث يتم تضمينها بأحدى صيغ التضمين المناسبة ومن ثم تمر على مصدر التشتت اللوني (CD) ثم تنتقل لنعبر المسار (1) وتمر بمصدر تشتت نمط الاستقطاب (PMD) لتمر بعدها خلال مصدر فقد الاستقطابي (PDL₁) وذلك بعد أن تعبر المسار (2).

المرحلة الثانية: وبالتالي في هذه المرحلة تدخل الإشارة البصرية إلى المضخم البصري ذو الكسب البصري (G) بعد مرورها عبر المسار (3) حيث تتم عملية التضخيم لهذه الإشارة الداخلية. ولكن لسوء الحظ، فإن التضخيم البصري غير ممكن بدون توليد الانبعاث التلقائي للمضخم، والمضوضاء الناتجة عنه ربما تشكل أشد ضعف يحد من مدى وصول هذه الأنماط وقدرتها. يساهم كل مضخم بصري في مضوضاء الانبعاث التلقائي المضخمة (ASE)، وتضييف هذه المساهمات بشكل تراكمي على طول مسافة الإرسال.

المرحلة الثالثة: في هذه المرحلة تعبر الإشارة البصرية المسار (5) لتدخل للمصفى البصري ليتم تصفيتها بصرياً، وعلى افتراض أن المرشح البصري ليس له أي تأثير على استقطاب الإشارة حيث أن تأثير فقد الاستقطابي (PDL) المحتمل للمرشح البصري على الإشارة والمضوضاء يمكن أن يكون تضمينه في فقد الاستقطابي (PDL₂) الذي تم إهماله في هذه الدراسة.

المرحلة الرابعة: في هذه المرحلة تمر الإشارة البصرية خلال المسار (7) لتدخل إلى المفصى الكهربائي، حيث يتم تحويل الضوء الخارج من الطرف البعيد لوسط النقل مرة أخرى إلى إشارة كهربائية بواسطة المفصى الكهربائي 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.

3. المعالجة الفيزيائية لنظام الاتصالات البصري

عادةً ما تكون مسافة الإرسال لأنظمة اتصالات الألياف البصرية محدودة بسبب فقد الألياف البصرية. بالنسبة لأنظمة المسافات الطويلة، تم التغلب تقليدياً على قيود الخسارة باستخدام المضممات، حيث يتم تحويل الإشارة الضوئية أولاً إلى تيار كهربائي ثم إعادة توليدتها باستخدام جهاز الإرسال. وبالتالي فإن استخدام المضممات يتطلب أجهزة كثيرة مما يجعل هذه المضممات معقدة للغاية ومكلفة لأنظمة الاتصالات المختلفة [13]. الاعتبار الرئيسي في تحديد موقع هذه المضممات هو التأكد من أن الإشارة ليست متدهورة بشكل مفرط بحيث يصبح استرداد الإشارة الأصلية مستحيلًا في المضخم [14]. التشويش (المضوضاء) هو إشارات غير مفيدة تجمع مع الإشارة مسببة تغييرًا غير مرغوب فيه مما

يؤدي إلى قلة مردودها وسوء أدائها وتخفيف جودتها، الأمر الذي يتسبب في حدوث أخطاء في نظام الاتصال، ويقيّم 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 تعبّر من أهم العيوب التي تحدّ من قدرة النظام [8]:

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

حيث (P_{ASE}) هي قوة (ASE) (الضوضاء) في عرض النطاق الترددي البصري (ΔV ، (ΔV) ثابت بلانك، (V) التردد البصري، (n_{sp}) معامل الانبعاث التلقائي، (G) كسب المضخم البصري، تؤدي هذه المساهمات المتتالية إلى زيادة إشارة الضوضاء التلقائية عند المستقبل، وهو الحد الأساسي للتشويش في نظام إرسال المضخم بصريًا [15]. يمكن تمييز ضعف الإشارة التلقائية من حيث نسبة الإشارة البصرية إلى نسبة التشويش (OSNR) (Optical Signal to Noise Ratio) كما هو موضح في المعادلة (2) ويتم تعريفها على أنها نسبة قدرة قناة الإشارة إلى قدرة (ASE) في عرض نطاق بصري محدد [4]:

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

البيانات المستلمة عندما يُعرف عدد الأخطاء يمكن تحديد (BER) على النحو التالي [6]:

$$BER = \frac{\text{Number of error}}{\text{Number of transmitted bits}} \quad (3)$$

تعد نسبة الإشارة البصرية للتشويش (OSNR) أحد المعلمات الرئيسية التي تحدّد المدى الذي يمكن أن ينتقل إليه طول الموجة قبل التجديد. تعمل (OSNR) كمؤشر معياري لتقييم أداء الأنظمة لإرسال البصري، تحتاج شبكات الاتصال إلى العمل فوق حد

(OSNR) الخاص بها لضمان تشغيل فوق حد (OSNR) الخاص بها لضمان التشغيل الحالي من الأخطاء [16,4].

توجد علاقة مباشرة بين نسبة الإشارة البصرية للتلویش (OSNR) ومعدل الخطأ النبضي (BER) حيث (BER) هي القيمة النهائية لقياس جودة الإرسال. لحساب (BER) للألياف أحادية النمط هي [5]، ولكي يكون نظام ذو كفاءة عالية يجب أن يكون معدل الخطأ النبضي (BER) منخفض ونسبة الإشارة البصرية للتلویش (OSNR) عالي .[17]

معدل الخطأ النبضي (BER) للنظام قد يكون في بعض منخفضاً جداً 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_0) متوسط ($\log 0$), ($\log 1$), و (σ_1), و (σ_0) هي الانحرافات المعيارية المقابلة.

تعطى العلاقة الرياضية بين عامل الجودة (BER) و (Q-Factor) بالمعادلة التالية [18]:

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

المرحلة الأولى: في هذه المرحلة نلاحظ أن الإشارة البصرية ($\tilde{s}_{input}(t)$) بدأت في الدخول في نظام الليف البصري بحيث يتم تعديها بأحدى 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).

يمكن كتابة الإشارة الداخلة للنظام على صورة متسلسلة فورييه كالتالي:

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

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

- التشتت اللوني (CD): يمثل بالعلاقة التالية:

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

حيث ($\beta_2 = -\lambda^2 D(\lambda)/(2\pi c)$), حيث 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 (T_{PMD}) لتشتت نمط الاستقطاب (PMD) من الدرجة الأولى بواسطة العلاقة:

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

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 ($\vec{\tau}_0 = \vec{\tau}/\tau$) يفترض أن يكون غير معتمد على التردد. واتجاهه (DGD) فإنه يتم إعطاءها بواسطة العلاقة:

الفقد الاستقطابي (PDL) بالنسبة لمصفوفة جونز (T_{PDL}) لفقد الاستقطابي (PDL) فإنه يتم إعطاءها بواسطة العلاقة:

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

حيث تربط هذه المصفوفة بين دخل وخرج فقد الاستقطابي (PDL_1), ويكون لها متجهين ذاتيين متعمدين وهما ($>|\vec{\alpha}_0|$) و ($>|\vec{\alpha}_\perp|$) في فضاء جونز ثانوي البعد.

عندما تسافر الإشارة في أنظمة اتصالات الألياف البصرية يحدث تهويين لهذه الإشارة مما يسبب ضعف في جودة المعلومات عند استقبالها في المستقبل، لهذا وجب استخدام مضخمات بصرية لتضخيم الإشارة حيث يتم إدخالها في أماكن محددة لتعزيز الإشارات البصرية، يتتيح هذا التعزيز إرسال الإشارات بنجاح من خلال طول الكابل المتبقى. وبالتالي 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 للمضخم، تشويش الناتج من المضخم البصري يدعى تشويش الانبعاث التلقائي للمضخم (ASE) يضعف النظام ويقلل من جودته ويعزز بشكل سلبي على نسبة الإشارة إلى التشويش (OSNR).

بعد خروج الإشارة المضخمة من المضخم البصري عند المسار (3) نجد أن ضوضاء الانبعاث التلقائي للمضخمة (ASE) قد أضيفت إلى الإشارة على هيئة ضوضاء جاووس ($\vec{n}_{\text{input}}(t)$) (بافتراض أن القوة المدخلة للنظام منخفضة بما فيه الكفاية، مما يجعل تأثير التشويش غير الخططي الناجم عن ضوضاء الانبعاث التلقائي للمضخمة (ASE) مهملاً). يمكن أن تحل الضوضاء الناتجة عن ضوضاء الانبعاث التلقائي للمضخمة (ASE) ($\vec{n}_{\text{input}}(t)$) في متوجهين جونز المتعامدين (أي $|\vec{e}_x| > |\vec{e}_y|$ ، كما يمكن كتابتها على صورة فورييه باستخدام مفكوك (Karhunen-Loeve) على الصورة التالية:

$$\begin{aligned} \vec{n}_{\text{input}}(t) &= n_x(t)|\vec{e}_x| + n_y(t)|\vec{e}_y| \\ &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left[(N_{in})_{x,m}|\vec{e}_x| + (N_{in})_{y,m}|\vec{e}_y| \right. \\ &\quad \left. > \right] e^{-j\frac{2\pi m(t-t_i+T_0)}{T_0}} \end{aligned} \quad (10)$$

في المعادلة (10)، نفترض أن الفترة الزمنية الكلية لاستجابة النبضة داخل المرشحات (المصفيات) البصرية (عرض النطاق الترددية لها B_0) والمرشحات الكهربائية (عرض النطاق الترددية لها B_r) تكون على الصورة $(T_0 = \mu(\frac{1}{B_0} + \frac{1}{B_r}))$ ، حيث يمثل (μ) معامل تسوية عديم الأبعاد يجب أن يحسب لكل فترة زمنية. تدخل الإشارة البصرية بعد ذلك إلى مصدر آخر لفقد الاستقطابي (PDL₂) وبالتالي فإن الإشارة تكون مشوهة بشكل

إضافي. الجدير بالذكر أنه يمكن دراسة تأثير ضوابط الانبعاث التلقائي المضخمة على النظام البصري السابق من خلال المقارنة لحالتين خاصتين، وهما:

- النظام ذو ضوابط (ASE) المستقطب جزئياً (على افتراض (PDL_2)) تكون غير مهملة).
- النظام ذو ضوابط (ASE) غير المستقطب (بافتراض أن (PDL_2)) تكون مهملة).

المرحلة الثانية: تعبير الإشارة البصرية المسار (4) لتدخل للمصفى البصري ليتم تصفيتها بصرياً، وعلى افتراض أن المرشح البصري ليس له أي تأثير على استقطاب الإشارة حيث أن تأثير فقد الاستقطابي (PDL) المحتمل للمرشح البصري على الإشارة والضوابط يمكن أن يكون تضمينه في فقد الاستقطابي (PDL_2) الذي تم إهماله في هذه الدراسة. بعد مرور الإشارة البصرية للمسار (5) يتم استقبالها للكشف عنها بصيغة التضمين المناسبة، ومن ثم تعبير المسار (6). تمر الإشارة البصرية خلال المسار (6) لتدخل إلى المصفى الكهربائي، حيث يتم تحويل الضوء الخارج من الطرف البعيد لوسط النقل مرة أخرى إلى إشارة كهربائية بواسطة المصفى الكهربائي 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 فاك التشفير أو إزالة التضمين من أجل الحصول على المعلومات المرسلة الأصلية.

يعطى التيار الكهربائي 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 ($t_i = t_0 + T_b$ ، $i = (0, N - 1)$ ، $c. c.$) أو $[...]$ يمثل المراافق المركب للإشارة، ($\vec{s}^o(t_i)$) الإشارة الداخلة، ($\vec{n}^o(t_i)$) الضوابط الناتجة عن الانبعاث التلقائي المضخمة (عند خرج المصفى البصري). مساهمة الضوابط في التيار الكهربائي (t_i) ناتج عن الضوابط الداخلة خلال الفترة الزمنية $(t_i - T_0, t_i)$ ، حيث يتتألف 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.

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

الصيغة التالية:

$$\begin{aligned} \langle e^{s(c^2+2ca)} \rangle &= \int \frac{dc}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{c^2}{2\sigma^2}} e^{s(c^2+2ca)} \\ &= [1 - 2\sigma^2 s]^{\frac{1}{2}} e^{\frac{2\sigma^2 s^2 a^2}{1-2\sigma^2 s}} \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$\psi_{t_i}(s) = \langle e^{s[y(t)]} \rangle = e^{sy_{ss}(t)} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 |\tilde{b}_m^D(t_i)|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \quad (14)$$

يتمثل المتوسط على المتغيرات العشوائية، ($y(t)$) يتكون من ثلاثة أجزاء في النظام البصري كما هو موضح في المعادلة (12). بالتالي يمكن كتابة الدالة المولدة لنظام على الصورة:

$$\begin{aligned} \Psi_{t_i}(s) &= \langle e^{s[y_{ss}(t)+y_{nn}(t)+y_{ns}(t)]} \rangle \\ &= e^{sy_{ss}(t)} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 |\tilde{b}_m^D(t_i)|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \end{aligned} \quad (15)$$

في هذا العمل، الرمز $\langle \cdot \rangle$ يشير إلى متوسط الضوضاء، و $\langle \cdot \rangle_+$ الرمز يشير إلى المنتج الداخلي الهرمي. بالنسبة لدالة توليد العزوم (MGF)، يمكن الحصول على معدل الخطأ

النبضي (BER) والذي يعتبر باراميتر الأداء الأساسي لنظام الاتصالات البصرية باستخدام العلاقة التالية:

$$BER_{y_{th}} = \frac{\pm 1}{2\pi j} \int_{C_{\pm}} \frac{\psi_{t_i}(s)}{s} e^{-sy_{th}} ds \quad (16)$$

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 نحصل على:

$$BER_{y_{th}} = \frac{\pm 1}{2\pi j} \int_{C_{\pm}} ds \frac{e^{-(y_{th}-y_{ss})s}}{s} \prod_{m=1}^{2M+1} \frac{e^{\frac{s^2 2\sigma^2 |\tilde{b}_m^D(t_i)|^2}{1-s\beta_m}}}{(1-s\beta_m)^2} \quad (17)$$

متوسط معدلات الخطأ النبضي (BERs) على جميع البتات خلال الفترة [20,19] تعطى بالعلاقة ($t_i = t_0 + kT_b$):

$$BER = \sum_{i=0}^{N-1} BER_{y_{th}}(t_i)/N \quad (18)$$

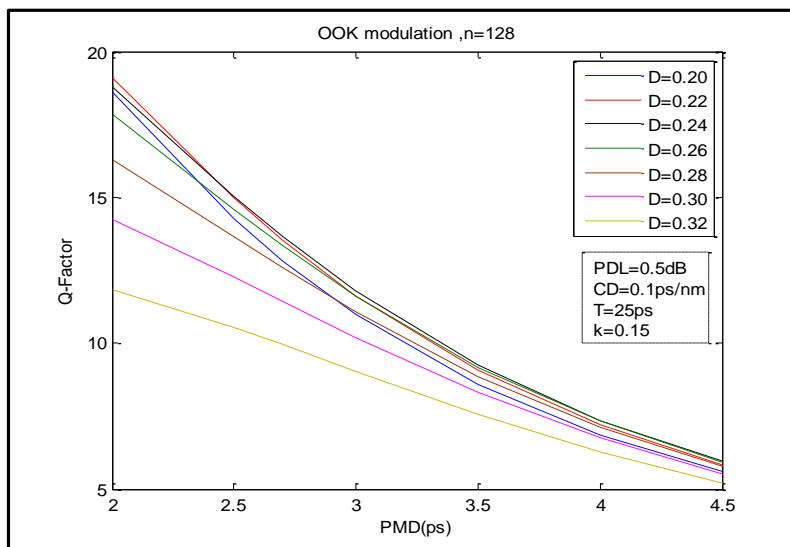
4. النتائج

أولاً: دراسة العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وعامل الجودة (Q) عند قيم ثابتة لدورة عمل النظام (D).

تم في هذا البند دراسة تأثير تغيير قيم دورة عمل النظام (D) على تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وعامل الجودة (Q) وذلك لثلاثة حالات مختلفة لعدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$), حيث تم الحصول على عامل الجودة (Q) باستخدام النموذج الرياضي المدروس سابقاً، كما تم استخدام برنامج الماتلاب لحساب قيم عامل الجودة (Q).

نلاحظ من الشكل (3) والذي يمثل العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وعامل الجودة (Q) عند قيم ثابتة لدورة عمل النظام (D) وذلك عندما تكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$), أن قيمة عامل الجودة (Q) يتراقص مع زيادة تشتت نمط الاستقطاب (PMD)، مع ملاحظة أن أكبر

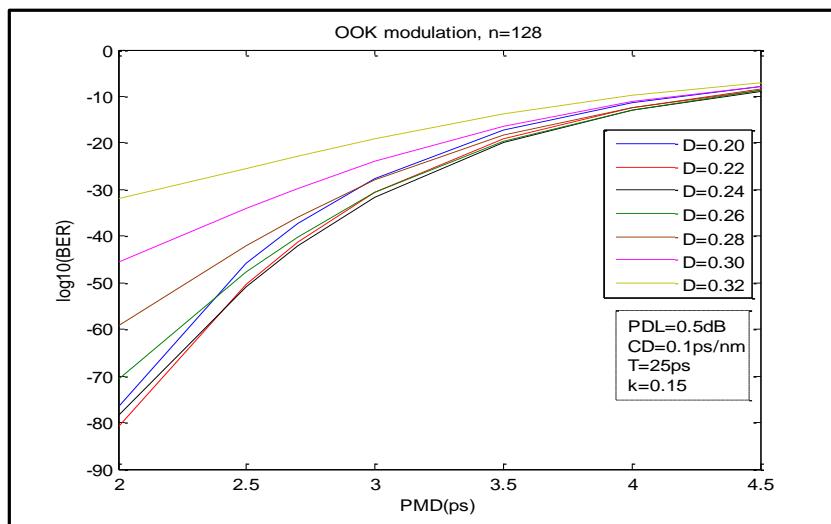
قيمة لعامل الجودة (Q) عند دورة العمل ($D=0.22$) بينما تتناقص هذه القيمة بزيادة قيمة دورة العمل (D). نستنتج من ذلك أنه بزيادة قيمة دورة عمل النظام (D) تقل جودة وكفاءة النظام.



شكل (3): العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) وعامل الجودة (Q) عندما يكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$) لقيم مختلفة لدورة العمل (D)

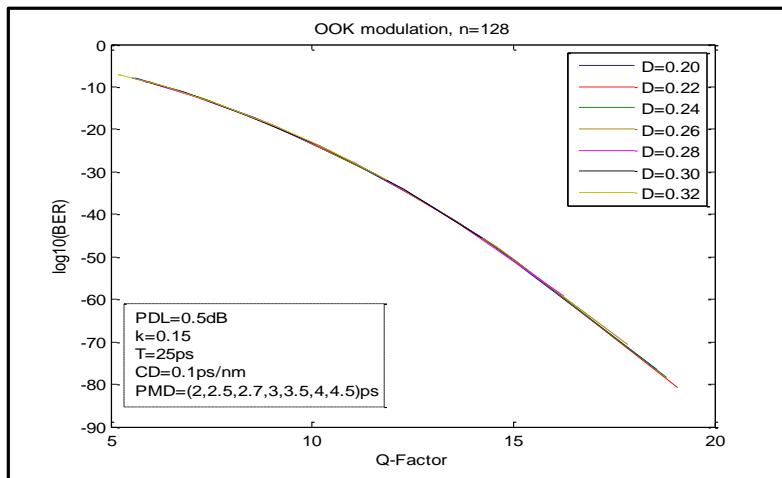
ثانياً: دراسة العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ومعدل الخطأ النبضي (BER) عند قيم ثابتة لدورة عمل النظام (D).

في هذا البند تمت دراسة العلاقة بين تشتت نمط الاستقطاب (PMD) ومعدل الخطأ النبضي (BER) عند قيم ثابتة لدورة عمل النظام (D) وذلك عندما يكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$), حيث تم الحصول على معدل الخطأ النبضي (BER) باستخدام النموذج الرياضي المدرس سابقاً، ثم استخدم برنامج الماتلاب لحساب قيم معدل الخطأ النبضي (BER).



شكل (4): العلاقة بين شتت نمط الاستقطاب (PMD) و($\log_{10}(\text{BER})$) عندما يكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$) لقيم مختلفة لدورة عمل النظام (D)

نلاحظ من الشكل (4) والذي يمثل العلاقة بين شتت نمط الاستقطاب (PMD) و($\log_{10}(\text{BER})$) عند قيمة ثابتة لدورة عمل النظام (D) وذلك عندما تكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$ ، أن قيمة ($\log_{10}(\text{BER})$) تتزايد بزيادة قيمة شتت نمط الاستقطاب (PMD)، وهذا يعني احتمالية حدوث خطأ في البتات المرسلة تكون أكبر. كما وجدنا أنه كلما زادت قيمة دورة عمل النظام (D) كانت قيمة ($\log_{10}(\text{BER})$) أكبر، مما يعني أنه بزيادة قيمة دورة عمل النظام (D) تزداد عدد البتات الخطأ المرسلة خلال النظام مما يؤدي إلى نقص في كفاءة النظام.



شكل (5): العلاقة بين عامل الجودة (Q) و($\log_{10}(\text{BER})$) عندما يكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$) لقيم مختلفة لتشتت نمط الاستقطاب (PMD) ودورة عمل النظام (D)

الشكل (5) يمثل العلاقة بين عامل الجودة (Q) و($\log_{10}(\text{BER})$) وذلك عندما يكون عدد البتات الداخلة للنظام ($n = 128$), لقيم مختلفة لتشتت نمط الاستقطاب (PMD) ودورة عمل النظام (D), حيث نلاحظ من الشكل أنه كلما كانت قيمة عامل الجودة (Q) أكبر فإن قيمة ($\log_{10}(\text{BER})$) تكون أصغر، وهذا يعني أن نسبة عدد البتات المرسلة الصحيحة يكون أكبر مما يعني زيادة في جودة وكفاءة النظام، حيث نلاحظ تحقق هذه العلاقة لقيم مختلفة لتشتت نمط الاستقطاب (PMD) ودورة عمل النظام (D).

5. الخلاصة

في هذا البحث تم تقديم دراسة تأثير تغيير قيم دورة عمل النظام (D) على تشتت نمط الاستقطاب (PMD) على أنظمة الإرسال الألياف البصرية وذلك من خلال مقاييس الأداء المتمثلة في عامل الجودة (Q) ومعدل الخطأ النبضي (BER). تظهر النتائج المتحصل عليها أنه بزيادة قيمة دورة عمل النظام (D) تقل قيمة عامل الجودة (Q) وتزداد قيمة معدل الخطأ النبضي (BER)، وكانت أفضل قيم لمعامل الجودة (Q) وأيضاً لمعدل الخطأ النبضي (BER) في مدى من (0.22) إلى (0.24) من دورة عمل النظام.

وبالتالي فإنه من المهم مراعاة تأثير قيمة دورة عمل النظام (D) عند تصميم وتنفيذ نظام الاتصال إلى جانب تشتت نمط الاستقطاب (PMD).

6. المراجع

- [1] Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", September 1998.
- [2] JOHN M. SENIOR assisted by Yousif Jamro, "Optical Fiber Communications", Third Edition 2009.
تأليف أ.د. محمد عبد الرحمن الحيدر، "الاتصالات الألياف البصرية"، الطبعة الأولى [3] 1995م، الناشر مكتبة العبيكات، الرياض.
- [4] J. P. Gordon and H. Kogelnik, " PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers", Review, Vol.97, No.9, pp4541-4550, April 25,2000.
- [5] Malcolm Johnson, "Optical Fibers, Cables And Systems ", 2009.
- [6] Gerd Keiser, " OPTICAL FIBER COMMUNICATION", Second Edition 1991.
- [7] PAUL L. KELLEY, IVAN P. KAMINOW, GOVIND P. AGRAWAL, " Nonlinear Fiber Optics", Third Edition 2001.
- [8] IVAN P. KAMINOW, TINGYE LI "OPTICAL FIBER TELECOMMUNICATIONS IV B SYSTEMS AND IMPAIRMENTS", 2002.
- [9] Tomáš Ivaniga, Petr Ivaniga, "Comparison of DPSK and RZ-DPSK Modulations in Optical Channel with Speed of 10 Gbps", SUBMITTED 02/16; ACCEPTED 04/17 , PP. 185-196 UDC 004.7:679.76 Original Scientific Paper, JIOS, VOL. 41, NO. 2 (2017).
- [10] X. Wei, X. Liu, and C. Xu, "Q-Factor in Numerical Simulations of DPSK With Optical Delay Demodulation", Manuscript submitted May 15- 2002 and revised June 21-2002, Available: <http://arXiv.org/abs/physics/0304002>.
- [11] Neophytos (Neo) Antoniades, Georgios Ellinas, Ioannis Roudas, Editors, "WDM Systems and Networks", Modeling, Simulation, Design and Engineering, Springer Science+Business Media, LLC 2012.
- [12] Ivan B. Djordjevic, " Advanced Optical and Wireless Communications Systems", Springer International Publishing AG 2018.

- [13] Malcolm Johnson, "Optical Fibers, Cables And Systems", 2009.
- [14] Ales VANDERKA, Lukas HAJEK, Jan LATAL, Jan VITASEK, Petr KOUDLAKA, "Design, Simulation and Testing of the OOK NRZ Modulation Format for Free Space Optic Communication in a Simulation Box", VOLUME: 12, NUMBER: 6, 2014, SPECIAL ISSUE.
- [15] Alan Rogers, "Polarization in Optical Fibers", 2008 ARTECH HOUSE, INC.
- [16] Wolfgang Freude, René Schmogrow, Bernd Nebendahl, Marcus Winter, Arne Josten, David Hillerkuss, Swen Koenig, Joachim Meyer, Michael Dreschmann, Michael Huebner, Christian Koos, Juergen Becker, Juerg Leuthold, "Quality Metrics for Optical Signals: Eye Diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER", Mo.B1.5, pp. 978-1-4673, ICTON 2012.
- [17] Md. Shazzad Hossain, Sujan Howlader, and Rinku Basak, "Investigating the Q-factor and BER of a WDM system in Optical Fiber Communication Network by using SOA", International Journal of Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014 Vol. 13 No. 1 Jan. 2015, pp. 315-322.
- [18] Tomáš Ivaniga, Petr Ivaniga, "Evaluation of the bit error rate and Q-factor in optical networks", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, pp. 2278-8735, Volume 9, (Nov - Dec. 2014), PP 01-03.
- [19] Nelson de Jesus, Cordeiro Muga, "Polarization Effects in Fiber-Optic Communication Systems", Universidade de Aveiro Departamento de Fisica 2011.
- [20] "Navy Electricity and Electronics Training Series", Module 24-Fiber Optics, NAVEDTRA 14196A S.N 0504LP1139777, 2013 Edition, June 2014.