

Enhancing The Performance of WDM-PDM 16-QAM

Dr. Raghad Mohammad Fayez Alalfi*¹, Dr. Abdulkareem Alsalem¹

¹ Faculty of Mechanical and Electrical Engineer | Al-Baath University | Syria

Received:
07/06/2023

Revised:
18/06/2023

Accepted:
18/09/2023

Published:
30/12/2023

* Corresponding author:
raghad.alalfi@gmail.com

Citation: Alalfi, R. M., & Alsalem, A. (2023). Enhancing The Performance of WDM-PDM 16-QAM. *Journal of engineering sciences and information technology*, 7(4), 1 – 10.

<https://doi.org/10.26389/AJSRP.L070623>

2023 © AISRP • Arab Institute of Sciences & Research Publishing (AISRP), Palestine, all rights reserved.

• Open Access



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC) [license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Abstract: In this paper, an optical wavelength division multiplexing system using 16-QAM modulation has been proposed, with Gray coding at the transmitter, coherent detection and digital signal processing at the receiver that allow more tolerance for carrier phase noise with compensation of chromatic dispersion and polarization mode dispersion, and enable high spectral efficiency and ability to transmit at high rates. Simulation carried out using Optisystem environment. Performance tested and evaluated using important metrics based on spectral efficiency, BER, capacity, Q-factor and OSNR.

WDM-PDM 16-QAM coherent system was designed using 8 channels, with 10 Gb/s rate for each channel and channel spacing of 25GHz gives an optical spectral efficiency of 4b/Hz, with performance tested for a distance of 250 km. The system performance was compared when using Gray coding and differential coding. Gray coding used in transmitters showed better performance compared to differential coding.

Keywords: coherent optical communication system, DSP, WDM, Optisystem.

تحسين أداء نظام ضوئي مترابط عالي السعة باستخدام WDM-PDM 16QAM

الدكتورة / رغد محمد فايز الألفي*¹، الدكتور / عبد الكريم السالم¹

¹ كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية | جامعة البعث | سوريا

المستخلص: في هذا البحث تم اقتراح نظام تجميع بتقسيم الطول الموجي وتقسيم الاستقطاب باستخدام التعديل 16-QAM، مع تطبيق ترميز جراي في المرسل وتطبيق في طرف الاستقبال الكشف المترابط ومعالجة الإشارة الرقمية لتعويض ضجيج الطور واللاخطية مع التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب، وذلك لتحسين الأداء ويتيح فعالية طيفية عالية مع إمكانية الإرسال بمعدلات عالية. أجريت المحاكاة باستخدام بيئة Optisystem وتم تقييم الأداء باستخدام أهم مقاييس الأنظمة الضوئية: الفعالية الطيفية وسعة الإرسال بالإضافة إلى معاملات Q-factor و BER و OSNR. حيث تم تصميم نظام WDM-PDM 16-QAM ذو ثمان أقنية معدل كل قناة 10 Gb/s وبمعدل إجمالي 80 Gb/s، وتباعد بين القنوات مقداره 25GHz مما سمح بالوصول لفعالية طيفية ضوئية أكبر من 4b/Hz، مع اختبار الأداء من أجل مسافة 250 Km. وتمت مقارنة أداء النظام عند استخدام ترميز جراي والترميز التفاضلي، حيث يظهر ترميز جراي المستخدم في أجهزة الإرسال أداءً أفضل مقارنةً بالترميز التفاضلي.

الكلمات المفتاحية: نظام اتصال ضوئي مترابط، معالجة الإشارة الرقمية، التجميع بتقسيم طول الموجة، Optisystem.

1- مقدمة:

يستمر التزايد في حركة البيانات على الإنترنت مع تزايد استخدام شبكات Wi-Fi، وإنترنت الأشياء IoT، والألعاب التفاعلية عبر الإنترنت، والحوسبة السحابية، وخدمات الوسائط المتعددة عالية الدقة، إلخ. ووفقاً لبيانات شركة Cisco سيكون هناك نمو بمقدار 2.5 ضعف في سرعة النطاق العريض وحركة البيانات خلال الفترة 2018-2023 [1]. مدفوعاً بالطلب المتزايد على المجال الترددي المحدود مما يستدعي ضرورة البحث عن آليات جديدة لزيادة السعة للبنية التحتية للشبكة الحالية بشكل اقتصادي. حيث تم اقتراح تقنيات التجميع المختلفة مثل التجميع بتقسيم التردد المتعامد OFDM، التجميع بتقسيم النمط MDM، التجميع بتقسيم الاستقطاب PDM، والتجميع بتقسيم الطول الموجي WDM، مما ساهم بزيادة سعة الشبكة وتمكينها من مواجهة تزايد حركة البيانات. يمكن زيادة سعة الليف الضوئي الفردية حتى M مرة باستخدام قناة M-channel WDM. إلا أن زيادة عدد القنوات سيزيد من آثار التشتت الناتجة عن أسباب مختلفة منها عدم الخطية. ويمكن تخفيف هذه التأثيرات غير الخطية بالاختيار المناسب لاستطاعة المنابع الضوئية أو من خلال خوارزميات معالجة الإشارات الرقمية DSP عند المستقبل لتعويض التشتت الخطي والآثار غير الخطية [9]. كما تعد أشكال التعديل الضوئي المتقدمة ذات المراتب العالية ضرورة حتمية لتلبية الطلب المتزايد على معدل البيانات لنظام ضوئي يستخدم ليفاً واحداً وزيادة كفاءة الطيف. ومع أن، تقنيات التعديل ذات الترتيب الأعلى تبدي تسامحاً أقل لضجيج طور الإشارة الضوئية، وحساسية أقل للمستقبل، إلا أنها ذات متطلبات OSNR متزايدة، مما يحد بدوره من مدى النظام ومسافة الإرسال القصوى بمعدل خطأ بت BER مقبول. علاوة على ذلك، تحد الآثار غير الخطية من مقدرة وإمكانات ومدى الليف عموماً وبالتالي تعتبر أشكال التعديل QPSK و 16-QAM مناسبة للاتصالات طويلة المدى نظراً لانخفاض متطلباتها من OSNR مع حساسية أفضل للمستقبل [7].

2- مشكلة البحث:

على الرغم من أن استخدام تقنيات التجميع بتقسيم الطول الموجي WDM في أنظمة الاتصالات الضوئية المترابطة مثل DP-16-QAM توفر زيادة السعة، ولكن في هذه الأنظمة ذات رتبة التعديل العالية فإن انتشار الإشارة يتأثر بشكل كبير بالتشتت اللوني وتداخل الرموز إضافة إلى التأثيرات اللاخطية وضجيج الطور الذي يؤثر على دوران الرموز في مخطط التوضع الفراغي. لذلك لابد من استخدام تقنيات في الإرسال تحد من التداخل بين الرموز، إضافة إلى تطبيق معالجة الإشارة الرقمية في المستقبل المترابط لتعويض الآثار الخطية واللاخطية التي تؤثر على استعادة البيانات بشكل صحيح.

3- فرضيات البحث:

أجريت الدراسة على نموذج اتصال ضوئي مترابط باستخدام التجميع بالاستقطاب وتجميع طول الموجة. يستخدم المرسل تشكيل النبضة Nyquist للتخفيف من ISI والتعديل الطوري مع ترميز غراي لتحسين كفاءة الطيف وتقليل الأخطاء. تم في المرسل تجميع 8 قنوات WDM. وفي المستقبل تم تطبيق وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP لتعويض الموعات التي تؤثر على انتشار الإشارة. ويتم التحقق من موثوقية النظام باستخدام مقاييس الأداء BER، والنسبة OSNR، وحساسية المستقبل، والفعالية الطيفية كمقاييس للأداء.

4- هدف البحث:

يهدف هذا البحث إلى تحسين الأداء لنظام WDM-PDM-16QAM (8×10 Gb/s) عبر قناة اتصال ضوئية SMF (250 Km). وذلك من خلال الاعتماد على تشكيل نبضة نايكويست وترميز غراي في الإرسال واستخدام الكشف المترابط ومعالجة الإشارة الرقمية DSP في الاستقبال. وتقييم الأداء من خلال مقاييس OSNR، ودراسة أثر استطاعة المنبع الليزري على معدل خطأ البت BER، إضافة إلى مخططات التوضع الفراغي للإشارة المستقبلية. حيث إن معدل خطأ البت المرجعي BER المستخدم في هذه الدراسة تقريباً 3×10^{-3} .

5- أهمية البحث:

إن استخدام طرائق التجميع المختلفة مثل PDM و WDM تعد طريقة مناسبة لتعزيز سعة النظام للوصول إلى معدلات نقل من مرتبة Tbps باستخدام ليف ضوئي أحادي النمط SMF. علاوة على ذلك، يساعد تشكيل نبضات نايكويست Nyquist في تقليل التداخل بين الرموز ISI، كما يساعد ترميز غراي على تقليل معدلات الخطأ. حيث في الرموز ذات ترميز غراي، يقلل اختلاف البت بين الرموز المتتالية من الانتقالات المفاجئة بين الرموز وينتج عنه أخطاء أقل في الرموز بعد فك التعديل، وبالتالي أخطاء أقل في البيانات المنقولة. كما تساعد وحدة معالجة الإشارة الرقمية في تعويض الآثار الخطية وغير الخطية التي تؤثر على الإشارة، بحيث يتكامل عمل النظام المترابط وتتم استعادة البيانات بدقة وموثوقية.

6- الدراسات المرجعية:

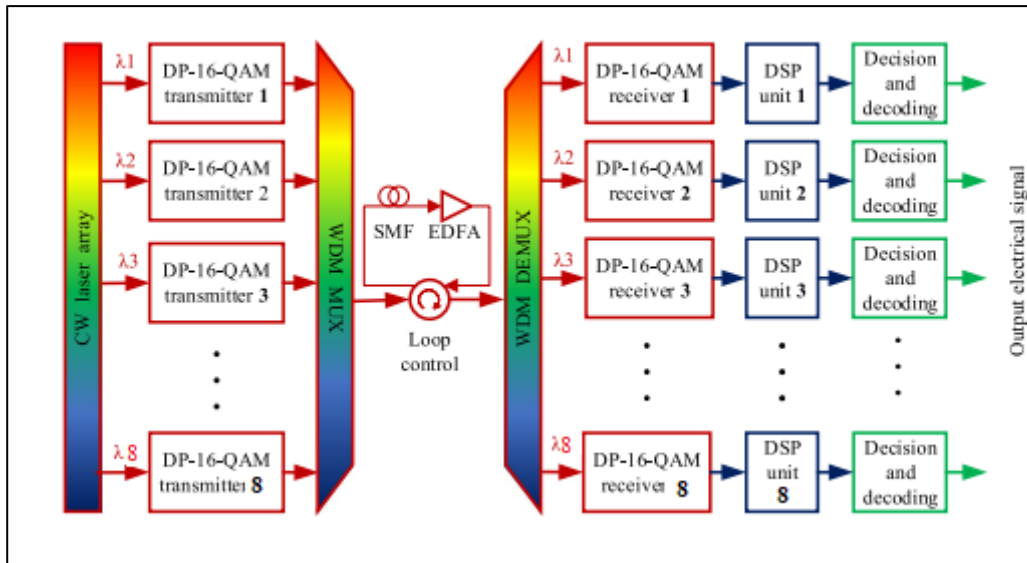
تم إجراء العديد من الأبحاث التي درست نظم الاتصالات الضوئية وآليات تحسين السعة في هذه النظم مثل تقنيات التجميع بتقسيم الطول الموجي والتجميع بتقسيم الاستقطاب وما يصاحب هذه الطرق من معوقات تؤثر على الإشارة. فقد قام الباحث Ali m وزملاؤه في الدراسة [5]، بتصميم نظام DWDM ذو 48 قناة، بمعدل 40 Gb/s لكل قناة واستخدام ليف أحادي النمط بطول 240 Km مع تعويض التشتت باستخدام DCF، وأظهر البحث تحسن الأداء بزيادة استطاعة المرسل. كما درس Norbert Z. وزملاؤه في [11] تحسين خصائص الإرسال لنظام DWDM على أساس تقنيات التضخيم.

وفي الدراسة [9] تم تحليل أداء نظام DP-16QAM ذو ثمان أقبية من أجل معدل BER وطاقة الإرسال وعامل Q، حيث يوفر التصميم المقترح لتعديل Nyquist DP-16QAM الاستخدام الفعال لعرض المجال الترددي لنقل كل قناة بمعدل بيانات مرتفع يصل إلى 640 Gb/s لكل قناة. كما قدم الباحثون في الدراسة [6] نظام اتصال يعتمد على التجميع بتقسيم الطول الموجي ذو 32 قناة وحقق النظام المقترح سعة قناة تزيد عن 320 Gb/s.

استخدمت الدراسات السابقة أشكال تعديل مختلفة في الإرسال وتقنيات متعددة في تعويض التشتت والآثار اللاخطية وضجيج الطور. حيث في هذا السياق يعتبر تطبيق ترميز غراي في الإرسال، وتطبيق في طرف الاستقبال الكشف المترابط ومعالجة الإشارة الرقمية حلاً مناسباً لأنظمة التجميع بتقسيم الطول الموجي الذي يمكن من استخدام PDM-16QAM. كما بينت الدراسات السابقة إمكانية تنفيذ الخوارزميات المختلفة في وحدة معالجة الإشارة الرقمية مما ساعد في تعويض ضعف الإشارة وتحسين أداء نظام الاتصال المترابط وذلك باستخدام أشكال تعديل برتب مختلفة. لذلك تم التوجه في هذا البحث إلى تصميم نظام اتصالات PDM-16QAM يعتمد على مزيج من التقنيات المدروسة في الدراسات السابقة التي استطاعت كل منها على حدة من تحسين أداء نظام الاتصال من أجل الحصول على نظام واعد لتعزيز قدرة الإرسال وتحسين الأداء من حيث مسافة الإرسال، OSNR، حساسية المستقبل، والفعالية الطيفية.

7- مواد البحث وطرائقه:

تم تصميم نظام الإرسال WDM-PDM-16QAM بسرعة 80Gb/s باستخدام برنامج المحاكاة Optisystem 20. وبين الشكل (1) المخطط العام لنظام الاتصال المدروس. حيث تم تصميم نظام التجميع باستخدام WDM-PDM 16-QAM، باستخدام ثمان أقبية وبتباعد 25GHz، مما سمح بفعالية طيفية أكثر من 4b/Hz ومدى 250Km. وتم توليد إشارات 16-QAM في المرسل بالاعتماد على معيار نايكويست لتشكيل النبضات واستخدام ترميز غراي. وفي طرف الاستقبال تم تطبيق خوارزميات وحدة معالجة الإشارة الرقمية لتعويض الآثار الخطية واللاخطية ومعالجة الضجيج الطوري. وقد تم اختبار النتائج وتقييمها من حيث الفاعلية الطيفية وسعة الإرسال ومعدلات BER و Q-factor و OSNR.



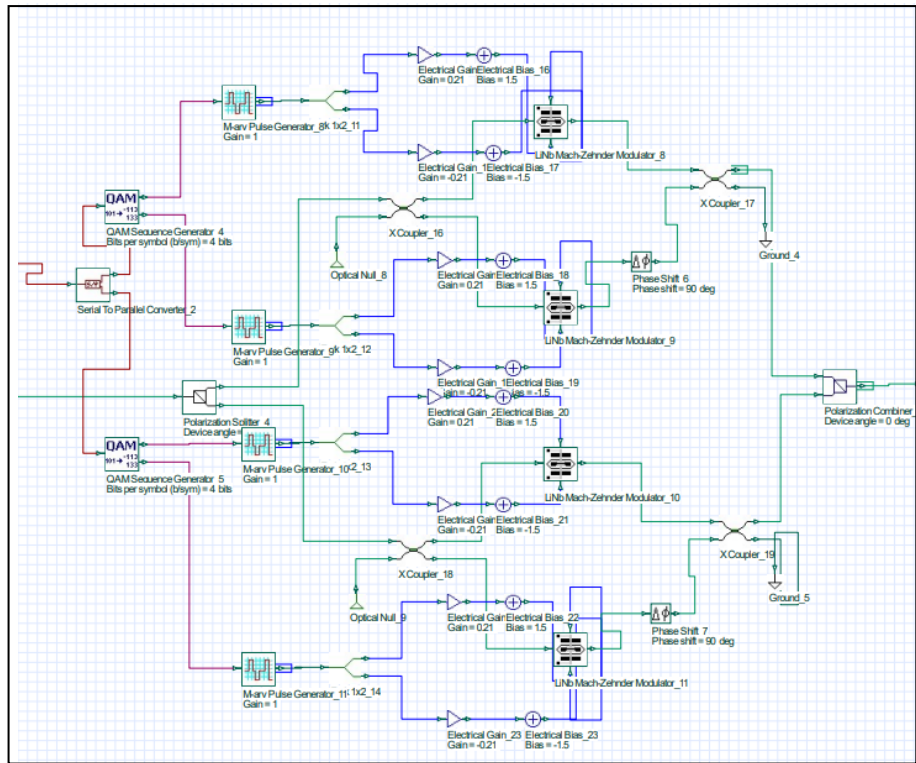
الشكل (1): نظام WDM PDM-16QAM.

تم في المرسل الضوئي لنظام الاتصال المدروس تشكيل إشارة WDM-DP16-QAM. وبين الشكل (2) تصميم مرسل DP-16-QAM. حيث يتم تحويل مسارات الدخل بشكل تسلسلي إلى تفرعي، ويتم إنشاء رموز 16-QAM، واستخدام ترميز غراي. كما يتم الاعتماد على معيار نايكويست Nyquist لتحديد عرض المجال الطيفي للإشارة. حيث يحدد معيار نايكويست وجود عائلة من أشكال النبضة $g(t)$ المناسبة التي من أجلها يتم الإرسال بدون تداخل بين الرموز intersymbol interference ISI، ومنها نبضات التجيب المرفوع Raised-Cosine. وفي النظام المدروس تم توليد نبضات التجيب المرفوع باستخدام مولد النبضات M-ary عن طريق تحويل بتات الدخل بتابع النقل $h(t)$ المعطى بالعلاقة التالية [4]:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi}{2\beta}\right), & t = \pm \frac{1}{2R\beta} \\ \text{sinc}(\pi R t) \cdot \frac{\cos(\pi\beta R t)}{1-(2\beta R t)^2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

حيث R هو معدل الرمز، و β معامل تدوير التابع roll-off Factor.

يتم بعد ذلك تعديل الإشارة من خلال المعدل المتوافق والمتعامد IQM. حيث تنقسم الإشارة الضوئية التي تدخل المعدل إلى مسارين، أحدهما مسؤول عن الطويلة والآخر عن الطور. ويتم استخدام الروابط الضوئية المناسبة لربط الإشارة الضوئية لينتج عن إعادة جمع الإشارة من كلا المسارين رمز ضوئي الذي يتوافق بدوره مع نقطة في مخطط التوضع الفراغي.



الشكل (2): مرسل DP-16-QAM.

وبعد توليد إشارات DP16-QAM الثمانية يتم جمعها من خلال MUX. حيث يتكون مُجمع WDM (MUX) المبين في الشكل (1) من مرشح Bessel وجامع. ويتم الحصول على ثمان قنوات إشارة ضوئية (N=8) عند خرج MUX. يمكن التعبير عن الإشارة الضوئية عند خرج مُجمع WDM من خلال العلاقة (2): [4]

$$E(0, t) = \sum_{i=1}^N \left[E_{s(i)} e^{j(\omega_{s(i)} t + \varphi_{s(i)})} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\cos^2 \left(\frac{V_{R(i)}(t)}{2V_{\pi}} \pi \right) + \cos^2 \left(\frac{V_{Q(i)}(t)}{2V_{\pi}} \pi \right)} \cdot e^{j \tan^{-1} \left\{ \cos \left(\frac{V_{Q(i)}(t)}{2V_{\pi}} \pi \right) / \cos \left(\frac{V_{R(i)}(t)}{2V_{\pi}} \pi \right) \right\}} \cdot (e_x + e_y \cdot e^{j90^\circ}) \right] \quad (2)$$

حيث $E_{s(i)}$ مطال الحقل الكهربائي، $\omega_{s(i)}$ التردد الزاوي، $\varphi_{s(i)}$ هي الطور الابتدائي، i المجال من 1 إلى N ، $V(t)$ هو جهد العمل لمعدل IQ الضوئي، $V\pi$ جهد نصف الموجة لمعدل ماك زينر، e_x و e_y هما مكونا الاستقطاب في المستويين الأفقي والشاقولي، على التوالي. ونستعرض في الجدول (1) أهم البارامترات التي تم استخدامها في طرف المرسل.

الجدول (1): بارامترات المرسل.

المحدد	القيمة
سرعة النقل	10 Gbps/channel
نوع التعديل	16-QAM
طول موجة الحامل	1550 nm
طاقة الإرسال للمنبع الليزري	Variable
عرض الخط للمنبع الليزري	0.1 MHz

7-2 قناة الاتصال:

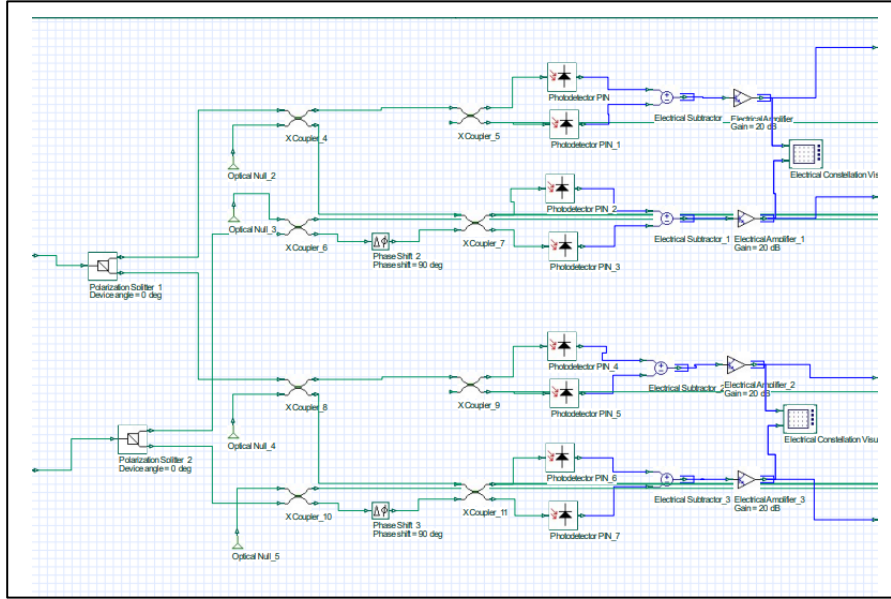
يتم إرسال الإشارة في ليف ضوئي أحادي النمط SMF يمثل قناة الاتصال، يوضح الجدول (2) أهم بارامترات المحاكاة لقناة الألياف الضوئية.

الجدول (2): بارامترات قناة الاتصال.

المحدد	القيمة
SMF pan length	250 Km
EDFA length	20 mm
معامل التشتت اللوني	16.75 ps/nm/Km
معامل الانحدار	0.075 ps/nm ² /Km
ثابت التخامد	0.2 dB/Km

7-3 المستقبل:

يوضح الشكل (3) المخطط الصندوقي لمستقبل DP-16-QAM المترابط. حيث يتكون من منبع ضوئي ليزري مستمر، مقسم حزمة الاستقطاب، (2×4) رابط اتجاهي 90 درجة (hybrid-90)، كاشفات متوازنة BD، ومضخمات كهربائية.

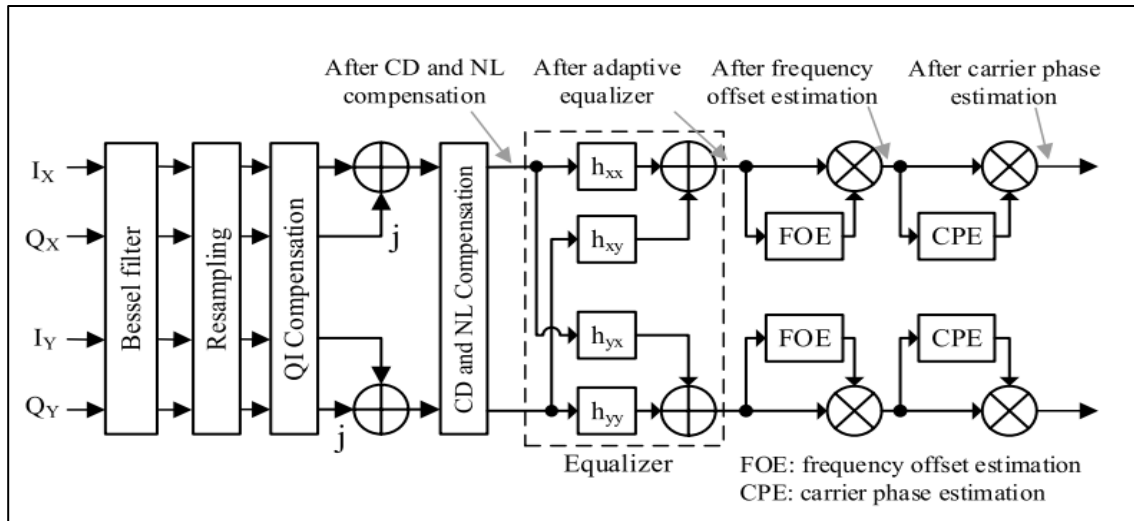


الشكل (3): مستقبل DP-16-QAM الضوئي المترابط.

تتمثل وظيفة الرابط الاتجاهي hybrid في تركيب الإشارة الضوئية التي تحمل البيانات المستقبلية على الموجة الحاملة الضوئية LO المولدة. مما يحول معلومات الطور في الإشارة المستقبلية إلى مكافئ شدتها ويستخرج إشارات I و Q، ثم تقوم الكواشف المتوازنة بكبت ضجيج الشدة النسبية وضجيج الانبعاث التلقائي للمضخم ASE. توفر المضخمات الكهربائية ربحاً خطياً لإشارات I و Q. لتتم معالجتها بعد ذلك في وحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP.

تتكون وحدة DSP من العديد من خطوات المعالجة المسبقة والخوارزميات حيث تتدهور مواصفات الإشارة الضوئية في الليف الضوئي أحادي النمط SMF. يتم تعويض هذا التدهور في المجال الرقمي، واستعادة الرموز المرسل باستخدام وحدة DSP. بعد ذلك، تقوم كل وحدة قرار كما هو موضح في الشكل (1) بإجراء عملية DC blocking والتسوية وحساب حجم متجه الخطأ لاتخاذ القرار والكشف الصحيح للبيانات، حيث يتم استقبال ومعالجة واستخراج الإشارات المرسل بناءً على إعدادات العتبة المعيارية المناسبة. يتم تسوية المطال لكل إشارة I و Q لتوافق رموز مخطط التوضع الفراغي لإشارة 16-QAM.

يوضح الشكل (4) المخطط الصندوقي لوحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP التي تنفذ خوارزميات التعويض في المجال الرقمي.



الشكل (4): المخطط الصندوقي لوحدة معالجة الإشارة الرقمية.

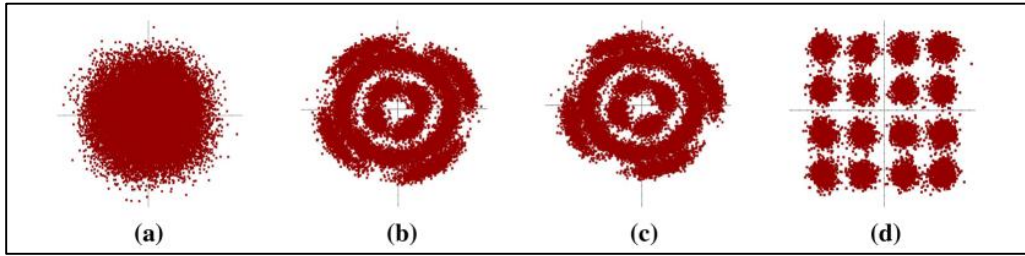
إن نقاط مخطط التوضع الفراغي المتداخلة ناتجة عن أخذ العينات غير المناسب للإشارات المستقبلية وعدم تطابق الطور بين الإشارات المرسل وإشارة ليزر المستقبل LO. لذلك من أجل استعادة الإشارة بشكل صحيح، يجب تطبيق تعويض عدم التوازن I/Q أولاً على الإشارات الرقمية ويمكن تنفيذ هذه العملية باستخدام خوارزمية Gram-Schmidt Orthogonalization Process (GSOP).

تعد خوارزمية GSOP طريقة فعالة لتحويل عينات البيانات غير المتوازنة أو غير المتعامدة إلى عينات بيانات متوازنة ومتعامدة. بدوره يعتبر التشتت اللوني Chromatic Dispersion أحد العوامل الأساسية التي تسبب تراجع أداء نظام الاتصالات الضوئية لذلك يتم في وحدة معالجة الإشارة DSP تعويض التشتت اللوني CD compensation. وبما أنه يمكن تمثيل استجابة القناة للألياف المزودة بالتشتت اللوني كدالة خطية، يمكن تحقيق تعويض التشتت اللوني في المجال الترددي بناءً على تابع النقل أو في المجال الزمني باستخدام مرشح استجابة نبضية محدودة FIR أو باستخدام المرشح الغوسي.

يتم بعد ذلك في وحدة معالجة الإشارة الرقمية تخمين مقدار الانزياح الزمني وتصحيحه clock recovery الناتج عن إزاحة الزمن التي قد تسببها المبدلات التشابكية الرقمية وذلك باستخدام خوارزميات استعادة الزمن مثل خوارزمية square-timing وخوارزمية Gardner-timing وهي مستخدمة بشكل واسع في الأنظمة المترابطة الرقمية. المرحلة التالية في وحدة DSP هي تعويض تشتت نمط الاستقطاب PMD، ويتم فيها استخدام معادلات الفراشة التكرارية الأربعة إضافة إلى خوارزمية المعامل الثابت لإزالة الاستقطاب وتعويض PMD.

أخيراً يتم في وحدة معالجة الإشارة الرقمية استعادة الموجة الحاملة من خلال مرحلتين وهما تعويض انزياح التردد ثم استعادة طور الحامل. وتم تطبيق خوارزمية البحث عن الطور الأعلى لاستعادة طور الحامل وتعويض ضجيج الطور.

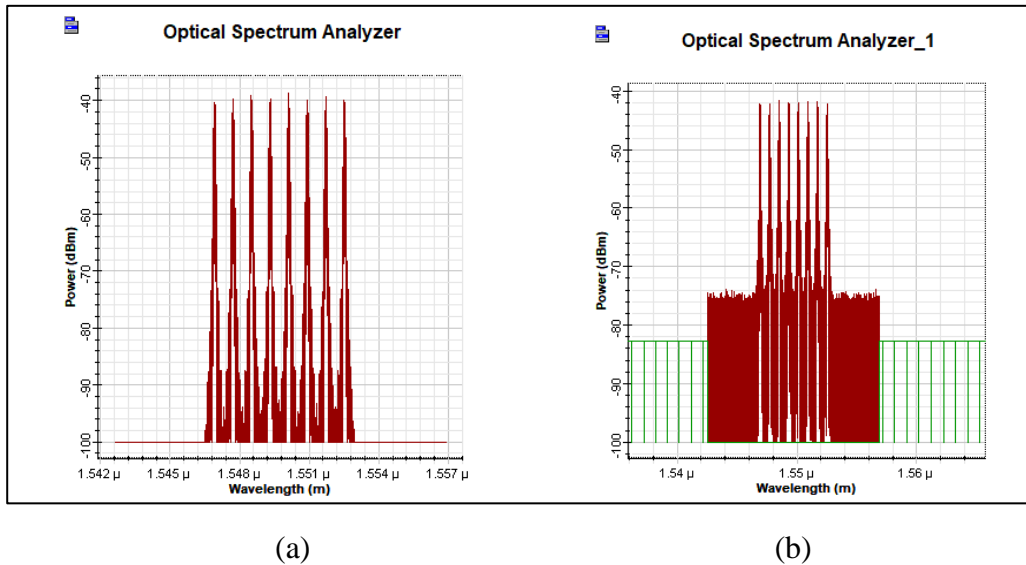
يوضح الشكل (5-b) نقاط مخطط التوضع الفراغي بعد المعادل التكميلي للرموز المستقبلية. يوضح الشكل (5-c) مخطط التوضع الفراغي بعد تقدير التردد (FOE). يتم ملاحظة نقاط المخطط الدوارة بسبب عدم تطابق الطور بين الإشارة المستقبلية وإشارة LO. ومن أجل تعديل 16-QAM، تعوض خوارزمية البحث عن الطور الأعلى عدم تطابق الطور بين الإشارة الضوئية المرسله وإشارة LO. حيث يوضح الشكل (5-d) نقاط مخطط التوضع الفراغي بعد تقدير طور الحامل CPE. ويلاحظ وضوح وتركيز النقاط في مخطط التوضع الفراغي بعد تنفيذ خوارزميات التعويض المختلفة وCPE.



الشكل (5): مخطط التوضع الفراغي لإشارة 16-QAM عند مراحل مختلفة لوحدة DSP.

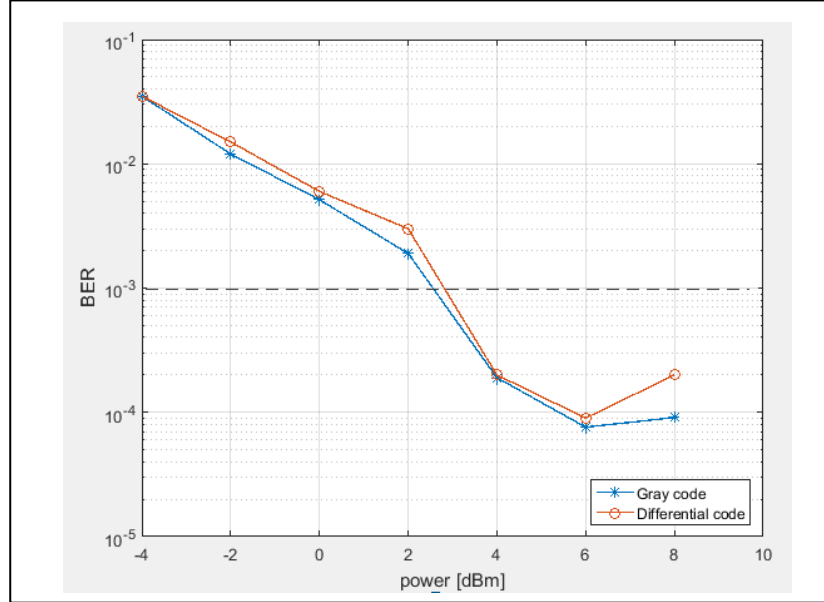
8- النتائج والمناقشة:

تم في هذا البحث محاكاة نظام اتصال ضوئي مترابط WDM PDM-16QAM، ودراسة أداء النظام من خلال معدل خطأ البت BER ومخطط التوضع الفراغي للإشارة المستقبلية ومقارنة الأداء في حال استخدام ترميز غراي والترميز التفاضلي. حيث تم إعداد المحاكاة لنموذج النظام المبين في الشكل (1). يبين الشكل (a-6) طيف الإشارة المرسله بنظام WDM. بينما يبين الشكل (b-6) طيف الإشارة عند المستقبل.



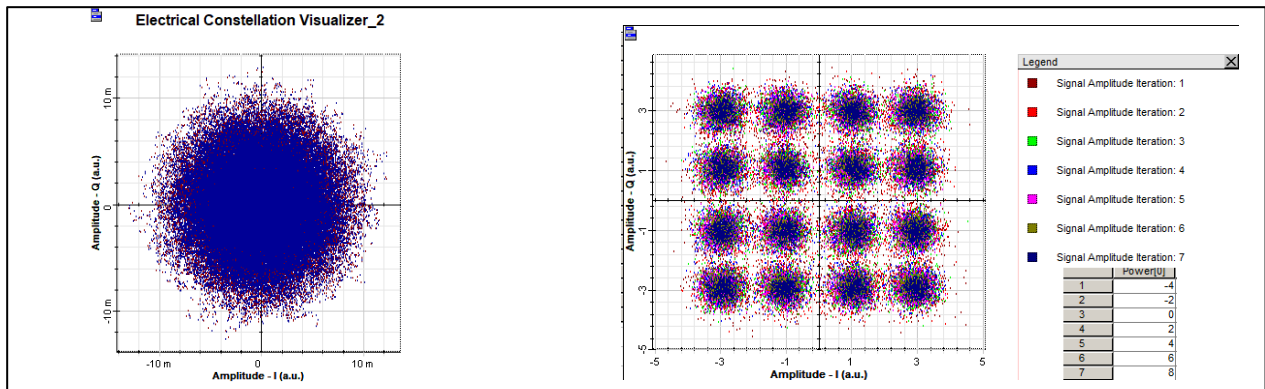
الشكل (6): (a) طيف الإشارة المرسل. (b) طيف الإشارة المستقبلية.

ويوضح الشكل (7) أثر طاقة الإرسال ونوعية الترميز على معدل خطأ البت BER. ينخفض معدل خطأ البت الخاص بالنظام لكل من شبكات DWDM مع زيادة استطاعة الإرسال الضوئية. ومع ذلك، بعد مستويات معينة من الاستطاعة تبدأ الآثار غير الخطية بالظهور مما سيؤدي إلى زيادة معدل BER ثانية. حيث يُظهر النظام ذو ترميز غراي الحد الأدنى لمعدل خطأ البت عند قيمة استطاعة الإرسال المساوية لـ 6 dBm. وبالمثل، فإن النظام عند استخدام الترميز التفاضلي يكون معدل BER عند أدنى قيمة من أجل استطاعة الإرسال المساوية لـ 6 dBm. بالتالي فمن أجل تغير استطاعة الإرسال يكون أداء النظام في الحالتين هو نفسه تقريباً حيث يبين الشكل انخفاض معدل BER للنظام لكل من شبكات WDM مع زيادة الاستطاعة الضوئية.



الشكل (7): معدل خطأ البت مع تغير طاقة الضوئية للمرسل.

كما يبين الشكل (8) مخطط التوضع الفراغي للإشارة المستقبلية قبل وبعد معالجتها في وحدة معالجة الإشارة الرقمية في المستقبل الضوئي المترابط عند استخدام ترميز غراي. حيث نلاحظ أن نقاط مخطط التوضع الفراغي للإشارة المستقبلية بعد معالجتها من أجل قيم استطاعة الإرسال المنخفضة تكون أكثر توزعاً (مثل النقاط باللون الأحمر). بينما عند زيادة قيمة الاستطاعة تصبح نقاط المخطط أكثر تمركزاً حول القيم المرجعية لـ 16-QAM وهذا يدل على تحسن الأداء وانخفاض قيمة BER للنظام وبالتالي الاستعادة الصحيحة للبيانات.



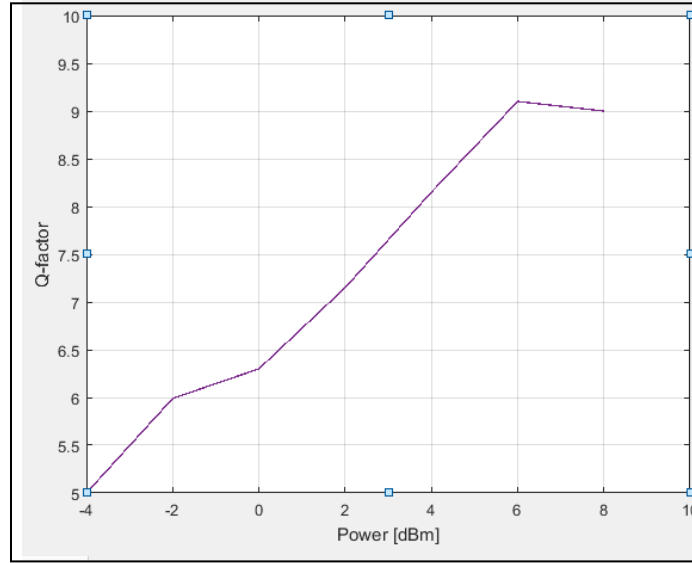
(a)

(b)

الشكل (8): (a) مخطط التوضع الفراغي قبل DSP. (b) مخطط التوضع الفراغي بعد DSP.

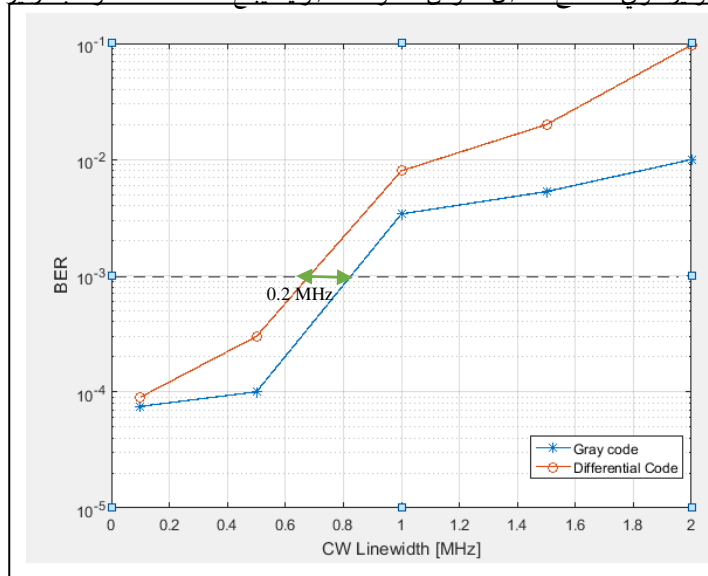
كما يوضح الشكل (9) قيمة Q-factor نسبة لتغير استطاعة الإرسال الضوئية عند استخدام ترميز غراي في نظام الاتصال المقترح. إن Q-factor هو مقياس جودة الإشارة في نظام الاتصال الضوئي. وهو تابع لمعدل خطأ البت BER، واستطاعة الإشارة واستطاعة الضجيج. بشكل عام، يزداد عامل Q مع زيادة استطاعة الإرسال، مما يشير إلى جودة إشارة أفضل. ومع ذلك، قد يصل عامل Q إلى

نقطة التشبع، ولا تؤدي الزيادة الإضافية في الاستطاعة إلى تحسين عامل Q. ويلاحظ من الشكل (9) زيادة قيمة Q-factor بتزايد استطاعة الإرسال حتى القيمة 6dBm حيث يتناقص بعدها بسبب الآثار غير الخطية التي تؤثر على أداء النظام بشكل عام.



الشكل (9): Q-Factor مع تغير الطاقة الضوئية للمرسل.

ويوضح الشكل (10) أداء النظام مع تغير العرض الطيفي للمنبع الضوئي linewidth. يُلاحظ أن زيادة linewidth تؤدي إلى تدهور معدل خطأ البت BER للنظام بشكل عام، حيث أن زيادة العرض الطيفي للمنبع الليزري يرافقه زيادة في الضجيج الطوري وبالتالي زيادة معدل BER. ولكن يُظهر ترميز غراي تسامح أفضل لعرض الحزمة الضوئية يبلغ 0.2 MHz مقارنة بالترميز التفاضلي.



الشكل (10): معدل خطأ البت مع تغير العرض الطيفي للمنبع الضوئي linewidth.

9- مقارنة النتائج مع دراسات سابقة:

تم تصميم نظام الإرسال والاستقبال لنظام تجميع Nyquist-WDM بتعديل DP-16-QAM للاتصال عالي السرعة وباستخدام ترميز غراي في المرسل. تعوض وحدة DSP مع مختلف خطوات المعالجة المسبقة التشتت اللوني CD، تشتت نمط الاستقطاب PMD، والآثار غير الخطية وعدم تطابق الطور الموجود في الإشارات المستقبلية بعد إزالة التعديل. حيث تم دراسة أثر تغير الطاقة الضوئية المرسل والعرض الطيفي للمنبع على أداء النظام ومقارنة الأداء مع استخدام الترميز التفاضلي في المرسل. حيث كان أداء النظام في الحالتين متقارب، وكان معدل خطأ البت ذو قيم من مرتبة 1×10^{-5} من أجل قيم النظام المدروسة. وباستخدام ترميز غراي في المرسل تم تحقيق معدل للبيانات يبلغ 80 Gb/s من أجل مسافة إرسال (مدى) تبلغ 250Km، وتم التوصل إلى قيم BER من مرتبة 7×10^{-5} ، من أجل استطاعة ضوئية للمنبع مقدارها 6 dBm. كما وبينت النتائج تحسن الأداء مع نقصان العرض الطيفي للمنبع من أجل ترميز غراي الذي يعتبر أفضل أداءً من الترميز التفاضلي. بالتالي يُظهر ترميز غراي تحملاً أكبر للضجيج من الترميز التفاضلي ويُعزى ذلك إلى

العرض الكامل الأقل للطيف الضوئي عند منتصف القيمة العظمى (FWHM). حيث أن قيم BER لترميز غراي أقل مقارنة بالترميز التفاضلي وقدم تسامح في العرض الطيفي بمقدار 0.2 MHz.

يبين الجدول (4) مقارنة أداء التصميم المقترح مع نتائج دراسات مشابهة من الدراسات السابقة التي تأخذ في الاعتبار مقاييس الأداء المختلفة مثل معدل البت، ومسافة الإرسال، وطاقة المنبع الضوئي. يستخدم كل من هذه الأنظمة تقنية WDM لزيادة سعة النظام (معدل الإرسال).

البارامتر	المرجع [6]	المرجع [9]	المرجع [2]	البحث المقترح
النظام المدروس	CS-DP 16-QAM	DP-16QAM WDM	WDM DP16-QAM	WDM DP16-QAM Gray code
عدد الأقنية WDM	40	8	8	8
Channel spacing	75 GHz	100GHz	27.75GHz	25GHz
مسافة الإرسال	1200Km	80Km	500Km	250Km
طاقة المنبع الضوئي	2 dBm	13 dBm	5 dBm	6 dBm
BER	3×10^{-2}	1×10^{-13}	7×10^{-4}	7×10^{-5}

10- خلاصة البحث:

تعد الأنظمة الضوئية المترابطة حلاً مناسباً للوصول لاستغلال عرض المجال الترددي بصورة أفضل، وزيادة مسافة الإرسال وتحسين حساسية المستقبل. كما أن استخدام تقنيات التجميع المختلفة لـ WDM يعتبر حلاً مناسباً لمواجهة الطلب المتزايد على عرض الحزمة. تم استعراض ومحاكاة نموذج نظام 16-QAM ضوئي مترابط مع تقنيتي تعدد الاستقطاب والتجميع بتقسيم الطول الموجي. حيث تم دراسة أداء نظام WDM PDM 16-QAM ذو ثمانية أقنية وبينت النتائج أن النظام المدروس قدم أداءً جيداً مكن من زيادة السعة حتى 80Gb/s ولمسافة إرسال تجاوزت 250Km مع معدلات خطأ BER أقل من 10^{-5} .

11- التوصيات:

ركزت الدراسة على استخدام التجميع بتقسيم الطول الموجي ذو ثمان أقنية وبفاصل مقداره 25GHz لنظام اتصال ضوئي مترابط DP16-QAM وذلك من أجل زيادة سعة النظام وذلك عند مسافة إرسال تصل إلى 250 Km، إلا أنه من الممكن دراسة استخدام معوضات التشتت شبكة انعراج براغ لتعويض التشتت اللوني من أجل زيادة مدى الإرسال للنظام المقترح.

12- المراجع العلمية:

- [1] CISCO: Cisco annual internet report (2018-2023) white paper tech. rep(2020) .
- [2] Goyal, S., Kaler, R.S., Singh, H. (2020). Performance Analysis of Nyquist Superchannel with Multicast Overlay System. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 207, 164446.
- [3] Gupta Y. K., Goel A. (2023). Performance Analysis of Multiple-Beam WDM Free Space Laser-Communication System Using Homodyne Detection Approach. Heliyon. 9(2), e13325.
- [4] Kakati, D., Arya, S.C. (2019). Performance Of Grey-Coded IQM-Based Optical Modulation Formats on High-Speed Long-Haul Optical Communication Link. The Institution of Engineering and Technology. 13(18), 2904–2912.
- [5] Lazim M., Hammadi AM., and Al-Askery A. (2022). Improve Quality Factor by Using DWDM Technology for Long Distances and Different Power Levels. Journal of Techniques, 4(4), 12-23.
- [6] Li L, Xiao Z, Liu L, Lu Y. (2019). Non-Orthogonal WDM Systems with Faster Than Nyquist Technology. Optical Fiber Communication Conference (OFC), paper W1D.1.
- [7] Nagarjun M., Mahalakshmi M.N. (2022). Performance Analysis of Coherent DP-16-QAM Optical Communication System. International Journal of Research Publication and Reviews, 3(4), 1477-1486.
- [8] Singh M., Atieh A., Aly M.H. and Abd El-Mottaleb S.A. (2022): 120 Gbps SAC-OCDMA-OAM-based FSO Transmission System: Performance Evaluation Under Different Weather Conditions. Alexandria Engineering Journal, 61(12), 10407–10418.
- [9] Torres-Ferrera P., García-Yáñez M.A., Gutiérrez-Castrejón R. and Tomkos I. (2018). Coherent Optical WDM Systems For 1.6 Tb/S Ethernet Over 40 Km Of Single-Mode Fiber. Opt. Fiber Technol. 43, 180–187.
- [10] Yu J., Li X. and Zhang J., (2022). Digital Signal Processing for Optical Coherent Long-Haul Transmission System. World Scientific.
- [11] Zdravecký N., Ovseník L., Oravec J. and Lapčák M. (2022). Performance Enhancement of DWDM Optical Fiber Communication Systems Based on Amplification Techniques. Photonics, 9(8), 530.