

مقارنة أداء نظام اتصالات بصري متعدد الأطوال الموجية WDM يستخدم عدة تقنيات لتعويض التشتت

محمد نصر *

(تاريخ الإيداع 2019 / 1 / 29 . قُبل للنشر 2019 / 7 / 13)

المُلخَص

يُعدُّ التشتت المعوق الأساسي في إرسال الإشارة البصرية إلى مسافات طويلة؛ لذلك اقترحت عدة تقنيات لإزالة هذا التأثير، وتُعدُّ تقنية الليف البصري المعوّض للتشتت Dispersion Compensation Fiber DCF الأكثر استخداماً وانتشاراً لتحقيق هذه الغاية، حيث يمكن وضعه بعدة أماكن ضمن النظام البصري. يملك معوض التشتت DCF قيمة سالبة للتشتت تساعد على التقليل من أثر التشتت الموجب عند الانتشار ضمن الليف البصري الوحيد النمط القياسي Standard Single Mode Fiber SSMF.

استخدمنا ضمن هذا البحث ثلاث تقنيات لتعويض تشتت الألياف البصرية، لنظام اتصالات WDM يستخدم 5 قنوات، بمعدل إرسال 100 Gbps لكل قناة. وضعنا ضمن التقنية الأولى معوّض التشتت قبل الليف البصري "بعد المرسل" Pre Compensation، أما ضمن التقنية الثانية فقمنا بوضع المعوض بعد انتشار الإشارة ضمن الليف "قبل المستقبل" Post Compensation، ووضعنا في الثالثة المعوض قبل الانتشار وبعده ضمن الليف "جزء من المعوض بعد المرسل والجزء الآخر قبل المستقبل" Symmetric Compensation.

تمت المقارنة بين أداء الأنظمة الثلاثة من خلال منحنى العين Eye Diagram، وحساب معدل الخطأ BER لجميع القنوات، استخدمنا برنامج Optisystem لتصميم ومحاكاة الأنظمة البصرية المقترحة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة البصرية، التشتت، WDM, DCF, معوضات التشتت, BER, EDFA.

Performance comparison of WDM optical communication system using several compensation techniques

Dr. Mohammad Nassr *

(Received 29 / 1 / 2019 . Accepted 13 / 7 / 2019)

ABSTRACT

Dispersion is the major factor to impedes long haul transmission optical communication systems. To eliminate dispersion different compensation techniques was used, but among these DCF is the most popular and common one. DCF is used in different compensation schemes, it has negative dispersion which opposite the positive that the standard single mode fiber SSMF has. In this paper we investigate three different compensation techniques for WDM optical system using 5 channel each one transmit at 100 Gbps, we first put the compensator at the transmitter side before the fiber, then we removed it to the receiver side after the fiber, after that we but the compensator at the transmitter as well as receiver. Eye diagram and BER had been used to compare the performance of the proposed systems, Optisystem program used for the design as well as simulation.

Key Words: Optical systems, Dispersion, WDM, DCF, Dispersion compensation, EDFA.

*Associate Professor, , Communication Technology Engineering Department, Information and communication Technology Engineering Faculty , Tartous University, Syria .

مقدمة

تُعدُّ تقنية Wavelength Division Multiplexing WDM من أكثر التقنيات فعالية، من أجل زيادة ساعات الإرسال ضمن النظم البصرية [1]، حيث يمكن زيادة سعة الإرسال إما بزيادة معدل إرسال القناة الواحدة وإما بإرسال مزيد من القنوات معاً ضمن الليف. يتأثر الإرسال ضمن نظم WDM بالتخامد Attenuation، والتشتت اللوني Chromatic dispersion، والتشتت القطبي Polarization Mode Dispersion، وكذلك بلا خطية الليف البصري Nonlinear Fiber والتي تحدث عند مستويات عالية للاستطاعة [2]. يمكن استخدام المكبرات البصرية كمكبر رامان Raman Amplifier أو مكبر الليف البصري المشاب بشوارد الإربيوم Erbium Doped Fiber EDFA Amplifier لتعويض التخامد الناتج عن الانتشار ضمن الليف وذلك لجميع الأطوال الموجية المستخدمة، حيث يعمل مكبر EDFA عند الأطوال الموجية بجوار 1550 nm وهو المجال C من الطيف البصري المخصص للاتصالات والذي يكون عنده التخامد أقل ما يمكن [3].

توجد عدة طرق لتعويض تشتت انتشار الأطوال الموجية ضمن الليف نذكر منها: تقنية التعويض باستخدام الشرائح الإلكترونية Micro Chip Copensating، تعويض الطور المرافق Optical Phase Conjugating، ليف تشبيك براغ Fiber Bragg Grating [4].

ركزنا خلال بحثنا هذا على طريقة تعويض التشتت باستخدام الليف البصري المعوض Dispersion DCF Compensation Fiber، حيث وضع المعوض في ثلاثة أماكن مختلفة ضمن النظام ثم قمنا بعدها بتقييم الأداء من خلال حساب معدل خطأ البت لكل قناة ضمن الليف؛ وبنتيجه المقارنة اقترحنا النظام الأفضل.

هدف البحث

يهدف العمل إلى تحسين أداء النظم البصرية، من خلال الوصول إلى أفضل تشكيلة ممكنة للمعوض البصري DCF؛ بحيث يتم تعويض تشتت الأطوال الموجية WDM المستخدمة على أفضل وجه، وكذلك مقارنة النتائج بين الأنظمة المقترحة؛ الأمر الذي يمكن المصمم من الاختيار بينها بحسب الإمكانيات المتوفرة.

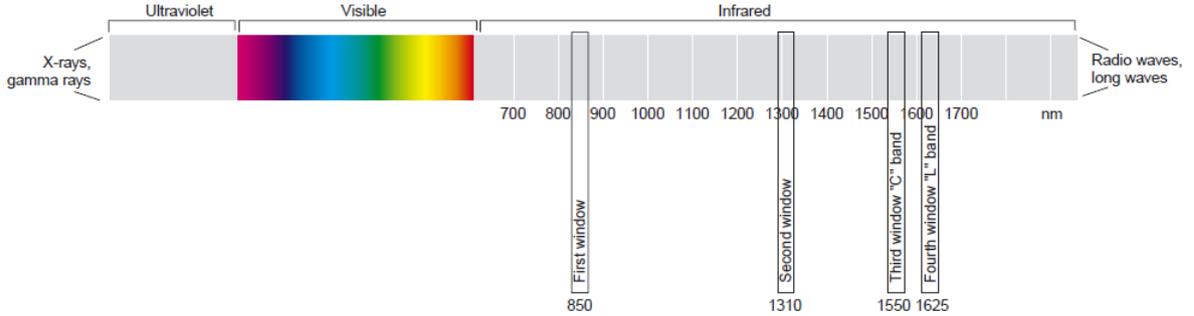
طرائق البحث ومواده

أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسات ومراجع علمية حديثة وعديدة تختص في هذا المجال وقد أخذت نتائجها وتوصياتها بعين الاعتبار، كما استخدمت البيئة البرمجية OptiSystem في وضع النماذج الرياضية والمحاكاة الحاسوبية واستخلاص النتائج [5][6].

الألياف البصرية وحيدة النمط

يُعدُّ الليف البصري وحيد النمط SMF هو الوسط المستخدم للربط بين الشبكات التي تفصل بينها مسافات طويلة وطويلة جداً Ultra-Long Haul، حيث يواجه هذا الليف الضوء ذو النمط الوحيد فقط (ذو استقطابين متعامدين [7])، ويمكن الحصول عليه من أجل قيمة للتردد المقيس $v < 2.405$. حتى ينقل الليف البصري نمطاً وحيداً يجب أن لا يتجاوز قطر النواة $10 \mu m$ ، في حين يبلغ قطر الغلاف لجميع أنواع الألياف $125 \mu m$ وذلك ليتوافق الليف مع الوصلات المصنعة من أجله Connectors.

يستخدم الليف البصري لنقل نافذتين من الأطوال الموجية؛ الأولى مركزها 1550 nm وهي المستخدمة للاتصالات البعيدة بسبب التخامد المنخفض الذي تعانیه الموجة عند انتشارها بجوار هذا المجال، والثانية مركزها 1300 nm وتستخدم للاتصالات المتوسطة، يفصل بين النافذتين امتصاص عالٍ بسبب وجود ذرات OH^- .
يبين الشكل (1) الطيف الترددي ضمن مجال عمل الألياف البصرية.



الشكل (1) الطيف الترددي لمجال عمل الاتصالات البصرية. [8]

يستخدم المجالان ($1530 \text{ nm}, 1565 \text{ nm}$) Conventional C- و Long band L- ($1565 \text{ nm}, 1625 \text{ nm}$) الموضحان ضمن الشكل (1) لنقل الاتصالات متعددة القنوات WDM والسبب الأساسي لاستخدام هذين المجالين هو التخامد المنخفض الذي تعانیه الأمواج، إضافة إلى توفر المضخمات البصرية التي يمتد مجال ربحها ليشمل هذين المجالين.
تم تصنيع العديد من الألياف البصرية وحيدة النمط إلا أن دراستنا اقتصرت على الليف البصري وحيد النمط القياسي Standard Single Mode Fiber SSMF.

التشتت ضمن النظم البصرية

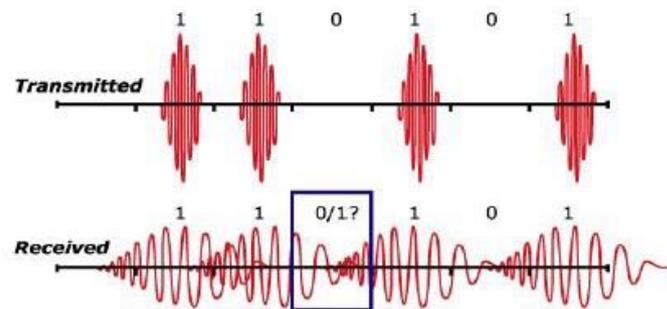
يحدث التشتت ضمن الليف البصري بسبب كون الضوء الصادر عن الليزر أو الثنائي البصري يحوي مجالاً من الترددات وليس تردد وحيد، إضافة إلى أن سلوك وسط الانتشار يختلف باختلاف التردد المنتشر؛ إذ يعطى معامل انكسار الليف بدلالة التردد وفق علاقة Sellmeier [9]

$$n^2(w) = 1 + \sum_{j=1}^M \frac{B_j w_j^2}{w_j^2 - w^2} \quad (1)$$

w_j : تردد الرنين لبلورات الليف المستخدم.

B_j : قدرة الاهتزاز (Resonance Strength) يتم تحديد هذه القيم تجريبياً.

يبين الشكل (2) ظاهرة التشتت وكيفية حدوثها.



الشكل (2) ظاهرة التشتت [10].

Material Dispersion: تشتت المادة

تصدر الثنائيات الضوئية والليزرات حزمة من الترددات، ينتشر كل تردد بسرعة مختلفة عن الآخر، بحسب المعادلة (1) مما يجعل هذه الترددات تصل بأوقات مختلفة إلى نهاية الليف. يعطى التأخير الناتج عن تشتت المادة وفق العلاقة الآتية [11]:

$$\tau_{mat} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (2)$$

L : طول الليف المستخدم.

n : معامل الانكسار لوسط الانتشار.

λ : طول موجة الضوء المستخدم.

بفرض عرض النبضة الناتج عن تشتت المادة هو σ_{mat} تحسب هذه القيمة وفق العلاقة التقريبية الآتية:

$$\sigma_{mat} \approx \left| \frac{d\tau_{mat}}{d\lambda} \right| \sigma_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda} L}{c} \left| \lambda \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right| = \sigma_{\lambda} L D_{mat} \quad (3)$$

σ_{λ} : عرض الطيف الناتج عن الثنائي البصري.

D_{mat} : تشتت المادة.

Waveguide Dispersion: تشتت التوجيه

بفرض أن معامل الانكسار للليف n مستقل عن طول الموجة، وباعتبار أن تأخير المجموعة الناتج عن هذا التشتت لمسافة L هو τ_{wg} للحصول على استقلالية التشتت عن معامل الانكسار فإننا نعبر عن ثابت انتشار النمط β باستخدام ثابت الانتشار المقيس وفق العلاقات الآتية [12]:

$$b = 1 - \left(\frac{ua}{v} \right)^2 \quad (4)$$

$$u = \sqrt{(k_1^2 - \beta^2)} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda} \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \quad (7)$$

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (8)$$

a : نصف قطر اللب. n_2 : معامل الانكسار للغلاف. يمكن كتابة b وفق العلاقة الآتية:

$$b = \frac{\beta/k - n_2}{n_1 - n_2} \quad (9)$$

بحل هذه المعادلة بالنسبة إلى β نجد:

$$\beta \approx n_2 k (b\Delta + 1) \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (11)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (12)$$

وهي المعادلة التي تنتج من الفرض بأن معامل الانكسار مستقل عن طول الموجة.

انطلاقاً من ذلك يمكن حساب تأخر المجموعة الناتج عن تشتت التوجيه وفق العلاقة:

$$t_{wg} = \frac{L}{c} \frac{d\beta}{dk} = \frac{L}{c} \left[n_2 + n_2 \Delta \frac{d(kb)}{dk} \right] \quad (13)$$

يمكن أن نعبر عن هذه العلاقة بدلالة ثابت الانتشار المقييس:

$$t_{wg} = \frac{L}{c} \left[n_2 + n_2 \Delta \frac{d(vb)}{dv} \right] \quad (14)$$

يعبر الجزء $n_2 \Delta \frac{d(vb)}{dv}$ عن تشتت التوجيه حيث يعطى المعامل $\frac{d(vb)}{dv}$ وفق العلاقة:

$$\frac{d(vb)}{dv} = b \left[1 - \frac{2J_v(ua)}{J_{v+1}(ua) J_{v-1}(ua)} \right] \quad (15)$$

J_v : تابع بيسل من النوع الأول والدرجة v , ومن أجل أي قيمة لـ v يتم تحديد الأنماط المنتشرة Linear LP

Polarization, يُعد تشتت التوجيه صغيراً مقارنة بتشتت المادة ويمكن إهماله.

يعبر عن عرض النبضة الناتج عن تشتت التوجيه بالعلاقة:

$$\sigma_{wg} \approx \left| \frac{d\tau_{wg}}{d\lambda} \right| \sigma_\lambda = L |D_{wg}(\lambda)| \sigma_\lambda = \frac{v}{\lambda} \left| \frac{d\tau_{wg}}{d\lambda} \right| \sigma_\lambda = \frac{n_2 L \Delta \sigma_\lambda}{c \lambda} v \frac{d^2(vb)}{dv^2} \quad (16)$$

D_{wg} : تشتت التوجيه ويعطى بالعلاقة:

$$D_{wg} = -\frac{n_2 \Delta}{c} \frac{1}{\lambda} \left[v \frac{d^2(vb)}{dv^2} \right] \quad (17)$$

يُعد تشتت اللوني مجموع تشتت المادة والتوجيه ويعطى بالعلاقة:

$$D = D_{mat} + D_{wg} \quad (18)$$

ويقدر بـ $ps/nm/km$ ويرتبط مع تشتت سرعة المجموعة β_2 Group Velocity Dispersion GVD

وفق العلاقة:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (19)$$

تشتت نمط الاستقطاب:

ينتج هذا التشتت بسبب الاختلاف في معامل انكسار المحور X لليف عن المحور Y مما يؤدي إلى اختلاف

سرعة انتشار النمط وفق هذه المحاور.

يُعدُّ النمط HE_{11} هو النمط الأساسي المنتشر ضمن الليف وحيد النمط ويملك حقلين كهربائيين وفق محوري x, y , بسبب اختلاف سرعة انتشار هذين النمطين وفق محوري الانتشار تشتت الاستقطاب، ويمكن أن نعرف معامل انكسار المحاور Birefringence وفق العلاقة الآتية:

$$B_f = n_y - n_x \quad (20)$$

ينتج هذا الاختلاف في معاملات الانكسار عن عدم مثالية تصنيع الليف؛ حيث لا تكون نواة الليف اسطوانية على كامل الطول المصنوع منه، كما أن عوامل الضغط التي تنتج في أثناء عملية وضع الكوابل ضمن الخدمة تؤدي إلى ظهور هذا النوع من التشتت.

يعطى الفرق بين زمني وصول نمطي الانتشار المتعامدين E_x, E_y واللذان يحددان توسع النبضة وفق العلاقة:

$$\Delta t_{pol} = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \quad (21)$$

v_{gx}, v_{gy} : سرعة المجموعة المنتشرة لنمطي الانتشار x, y خلال المسافة المقطوعة L .

يُعبّر عن تشتت الاستقطاب وفق تشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion PMD، ويتغير هذا المعامل بشكل عشوائي على طول الليف وبالتالي لا يمكن التعبير عنه مباشرة ضمن معادلة التأخير Δt_{pol} وإنما يتم التعبير عنه إحصائياً وفق العلاقة الآتية:

$$\langle \Delta t_{pol} \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (22)$$

تقاس D_{PMD} بـ ps/\sqrt{km} وتتراوح بين $0.1-1 ps/\sqrt{km}$.

تقنية تعويض التشتت باستخدام الليف البصري DCF

انطلاقاً من القيمة المرتفعة لتشتت الألياف القياسية وحيدة النمط SSMF والتي تبلغ $17 ps/nm.Km$ كان لابد من البحث عن تقنيات لتعويض هذا التشتت وتم اقتراح العديد منها كما ذكرنا سابقاً. تملك الألياف البصرية المعوضة للتشتت DCF قيمة سالبة للتشتت ضمن المجال C بسبب المساحة الفعالة الصغيرة للنواة إضافة إلى معامل انكسارها المتغير، نتيجة لذلك يمكن استخدامها ضمن الشبكات التي تستخدم ألياف SSMF لتعويض التشتت الناتج عن الانتشار، تسبب المساحة الصغيرة للنواة ضياعاً كبيراً يصل إلى $\alpha \approx 0.5 dB/Km$ الأمر الذي يستوجب استخدام مضخم لتعويض الضياع بعد انتشار الإشارات ضمن هذه الألياف. هناك عامل آخر يجب أخذه بعين الاعتبار عند تصميم الشبكات العالية السرعة؛ وهو انحدار التشتت $S [ps/(nm^2.Km)]$ Dispersion Slop ويستخدم للتعبير عن ميل منحي التشتت للليف، ويقدم هذا البارامتر تشتتاً ناتجاً عن عدم المطابقة بين قيمتي انحدار الليفين. لمنع تأثير هذا البارامتر يجب تصنيع الليف المعوض للتشتت بحيث يعوض تشتت الانحدار الناتج عن الألياف القياسية، بالمحصلة يجب أن تتحقق معادلة تعويض التشتت الكاملة:

$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \quad (23)$$

$$S_1 L_1 + S_2 L_2 = 0 \quad (24)$$

D_1, S_1, L_1 : التشتت وميل التشتت وطول الليف الأول على الترتيب.

D_2, S_2, L_2 : التشتت وميل التشتت وطول الليف الثاني على الترتيب.

عند استخدام مجال ترددي عريض لإرسال قنوات WDM وإرسال المعلومات إلى مسافات بعيدة Long Haul يجب أخذ التشتت المتبقي Residual Dispersion بعين الاعتبار؛ حيث يتم تعويض التشتت بالقيمة نفسها لجميع الترددات المنتشرة بهذه التقنية، في حين يخضع كل تردد لقيمة مختلفة من التشتت عند الانتشار ضمن الليف [13].

تعويض التشتت في بداية الليف البصري Pre-Compensating

تم ضمن هذه الطريقة وضع المعوض DCF قبل الليف البصري القياس SSMF؛ وذلك لتعويض التشتت الموجب الناتج عن الانتشار.

تعويض التشتت عند نهاية الليف البصري Post-Compensating

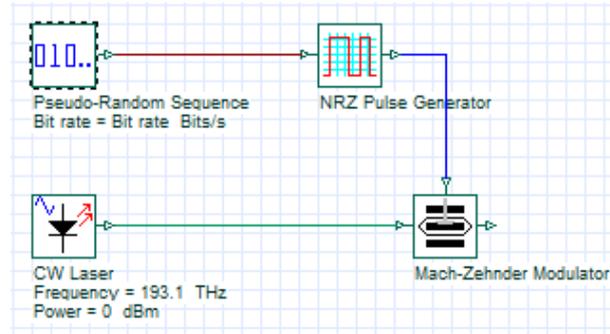
وضعنا في هذه الحالة الليف المعوض بعد انتشار الإشارة ضمن الليف القياسي.

تعويض التشتت في بداية وعند نهاية الليف البصري Symmetrical-Compensating

تم ضمن هذه الطريقة وضع الليف المعوض عند بداية الليف القياسي كذلك بعد انتشار الإشارة في الليف عند نهاية الليف القياسي.

النتائج والمناقشة

استخدمنا ضمن هذا البحث شبكة اتصالات متعددة الأطوال الموجية WDM مكونة من خمس قنوات، لزيادة سعة شبكة الاتصالات البصرية، بجوار طول الموجة (192.4 THz) 1550 nm وبحيث يكون المجال الترددي الفاصل بين القنوات 300 GHz؛ وذلك لتجنب التأثيرات اللاخطية، التي قد تنتج من تقريب المجال الترددي بين القنوات. استخدمنا ضمن المرسل تقنية ترميز Non Return to Zero NRZ بمعدل إرسال 100 Gbps وقمنا بتعديل الليزر باستخدام معدّل Mack-Zender M-Z كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل (3) استخدام معدّل MZ لتعديل إشارة الليزر

استخدمنا ليزر باستطاعة إرسال 0 dBm (1mW) وبحيث لا تؤدي الاستطاعة الكلية المنتشرة بالليف إلى ظهور التأثيرات اللاخطية كما اخترنا عرض الخط الطيفي Line Bandwidth مساوياً لـ 10 MHz وهي القيمة المستخدمة ضمن الليزر وحيدة النمط للاتصالات الألياف البصرية. يقوم المجمع Mux بتنضيد القنوات الخمس وإرسالها معاً ضمن الليف أما مفكك تنضيد الأطوال الموجية WDM DeMux فيقوم بتوزيع كل قناة إلى المستقبل

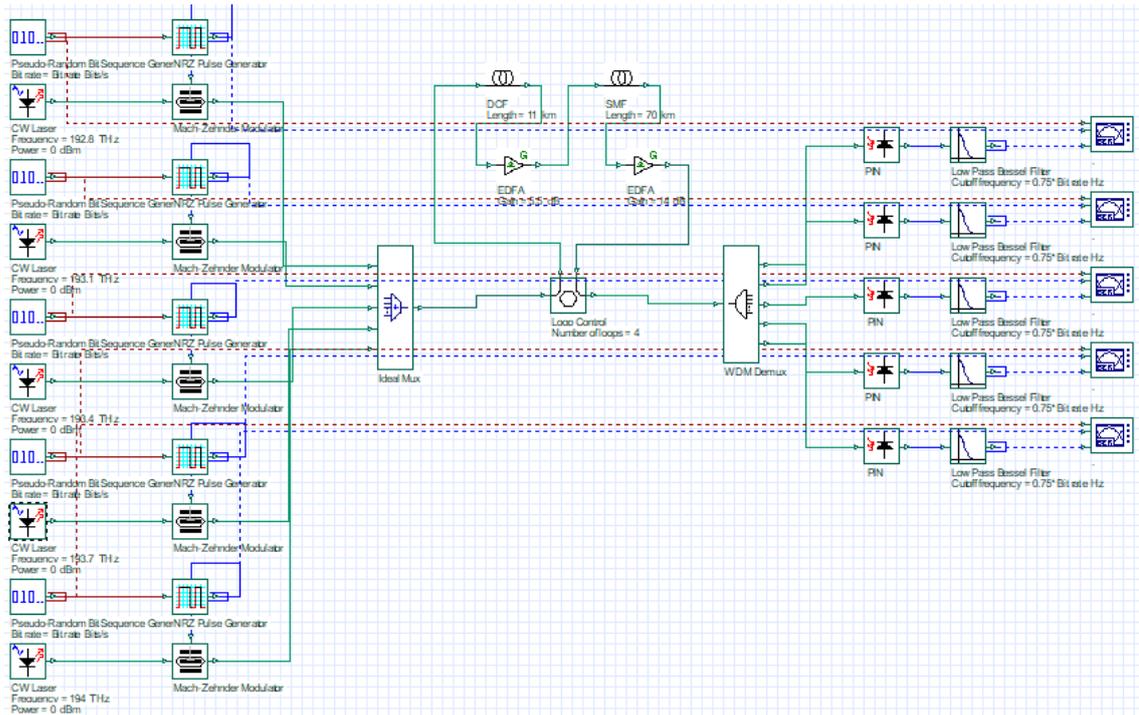
الضوئي Photo Detector الخاص بها حيث استخدمنا مستقبِل نوع PIN باستجابة مساوية لـ $1 A/W$ يمكن استخدام مستقبِل APD لتحقيق نفس الغاية، ثم مررنا الإشارة بعد ذلك على مرشح بيسل Bessel الالكتروني منخفض المجال من الدرجة الرابعة وذلك لتحديد مجال الإشارة الناتجة عن المستقبِل الضوئي. استخدمنا ضمن النظام ليف بصري نوع SSMF بطول 320 Km بحيث قسمناه من أجل المحاكاة إلى 4 حلقات كل حلقة تضم طول مساوي لـ 70 Km من الليف وكذلك استخدمنا ليف معوض للتشتت DCF بطول مساوي 44 Km (11 Km ضمن كل حلقة) وبحيث تتحقق المعادلتين (23)(24). من أجل تعويض التخماد استخدمنا مكبر EDFA يبين الجدول (1) البارامترات المستخدمة والتي لم يتم ذكرها.

الجدول(1) بارامترات النظام البصري

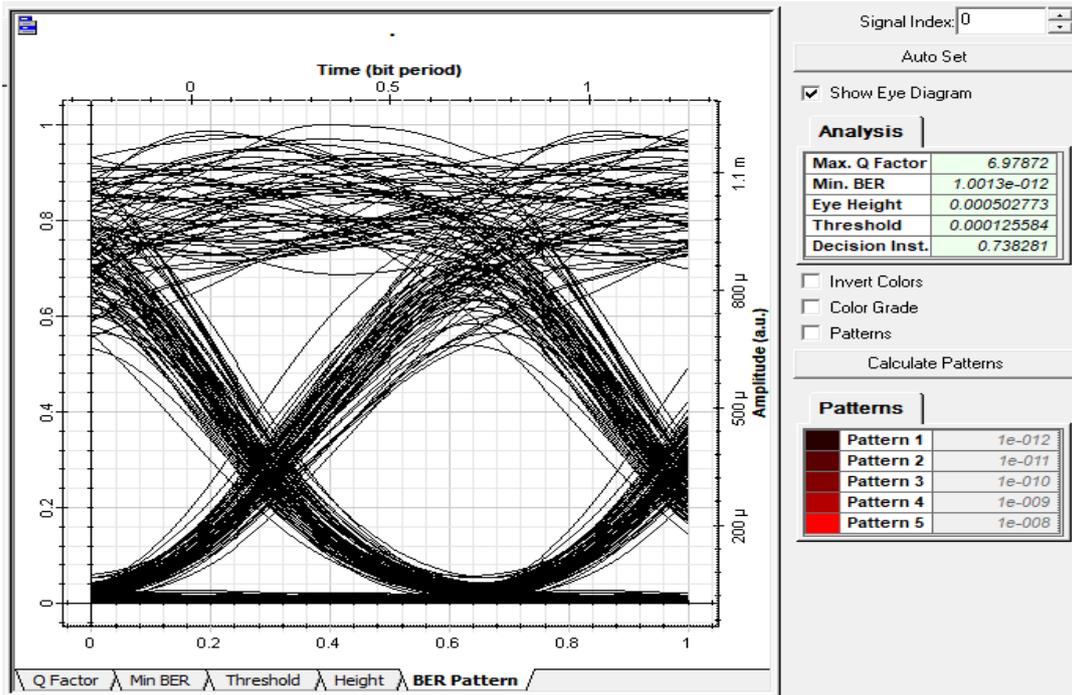
| المحدد | القيمة |
|------------------------------|--------------------------------|
| التردد المركزي للقناة الوسطى | 193.4 THz |
| تشتت الليف SSMF | $D = -17 ps/nm/Km$ |
| تشتت الليف المعوض للتشتت DCF | $D = -106.25 ps/nm/Km$ |
| الضياع ضمن SSMF | 0.2 dB/km |
| الضياع ضمن DCF | 0.5 dB/km |
| ميل منحي تشتت الليف SSMF | $S = 0.075 ps/(nm^2.Km)$ |
| ميل منحي تشتت الليف DCF | $S = -0.47 ps/(nm^2.Km)$ |
| ريح مضخم EDFA | 14 dB for SSM & 5.5 dB for DCF |

يبين الشكل(4) النظام البصري المقترح لحالة تعويض التشتت قبل إرسال الإشارة ضمن الليف البصري Pre-

compensation



الشكل (4) نظام اتصالات بصري WDM يستخدم تعويض Pre- compensation

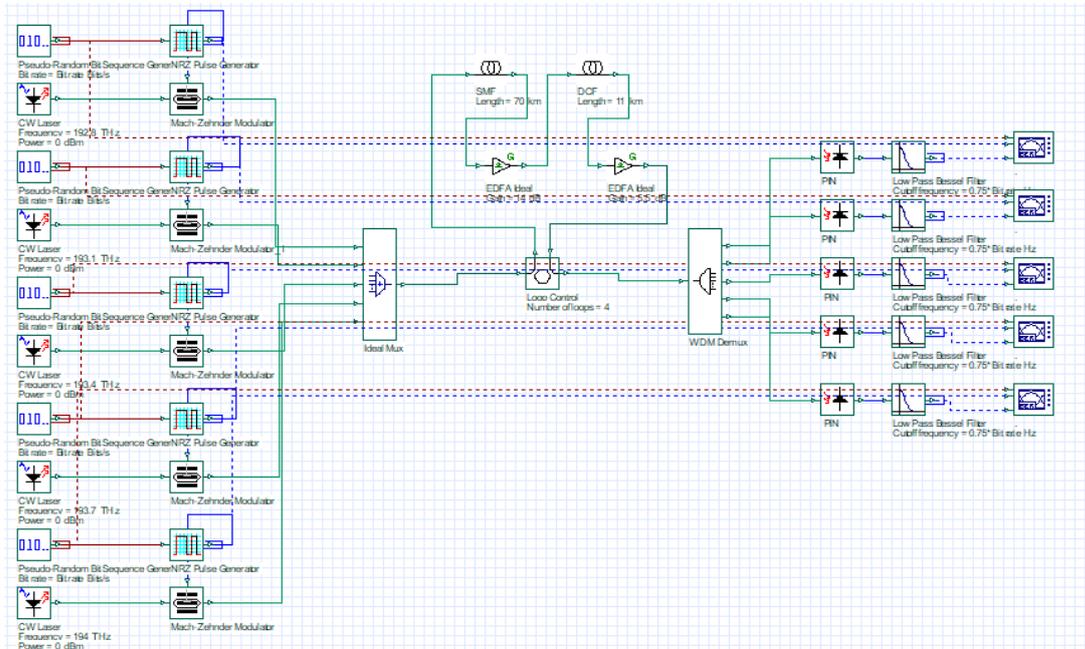


الشكل (5) منحنى العين للقناة الوسطى لنظام Pre- compensation

يبين الجدول (2) نتائج خطأ البت BER لجميع القنوات المستخدمة ضمن النظام.

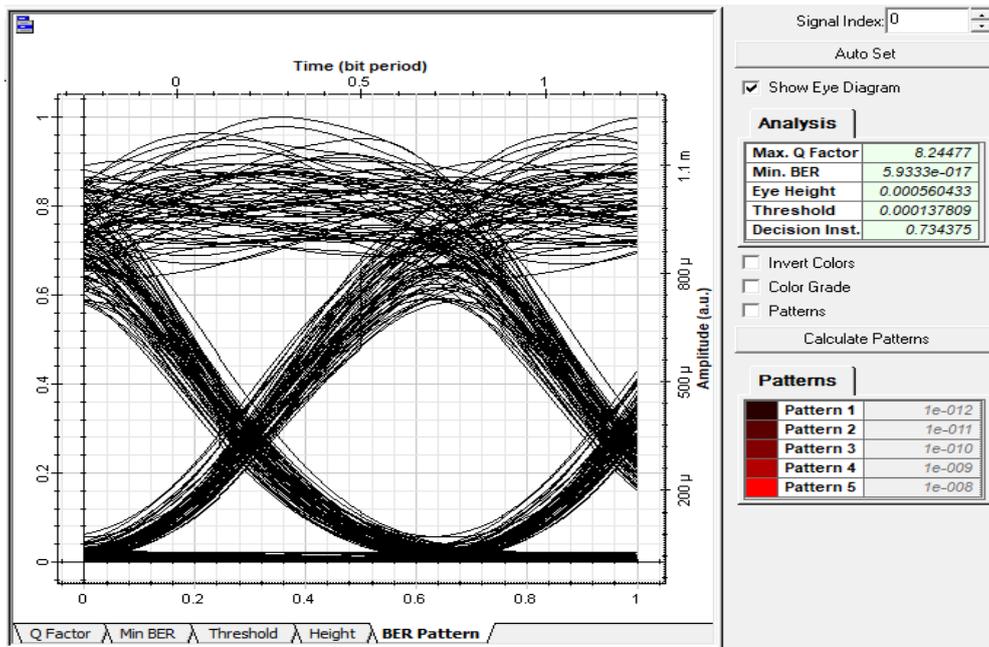
الجدول (2) معدل خطأ البت BER لنظام Pre-compensation

| تردد القناة | 194 THz | 193.7 THz | 193.4 THz | 193.1 THz | 192.8 THz |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| قيمة BER | 3×10^{-13} | 1×10^{-12} | 1×10^{-12} | 6.6×10^{-13} | 2.2×10^{-14} |



الشكل (6) نظام اتصالات بصري WDM يستخدم تعويض Post-compensation

يبين الشكل (6) نظام الاتصالات البصري الذي يستخدم تعويض التشتت عند نهاية الليف Post-compensation



يبين الشكل (7) منحني العين الخاص بالقناة الوسطى للنظام

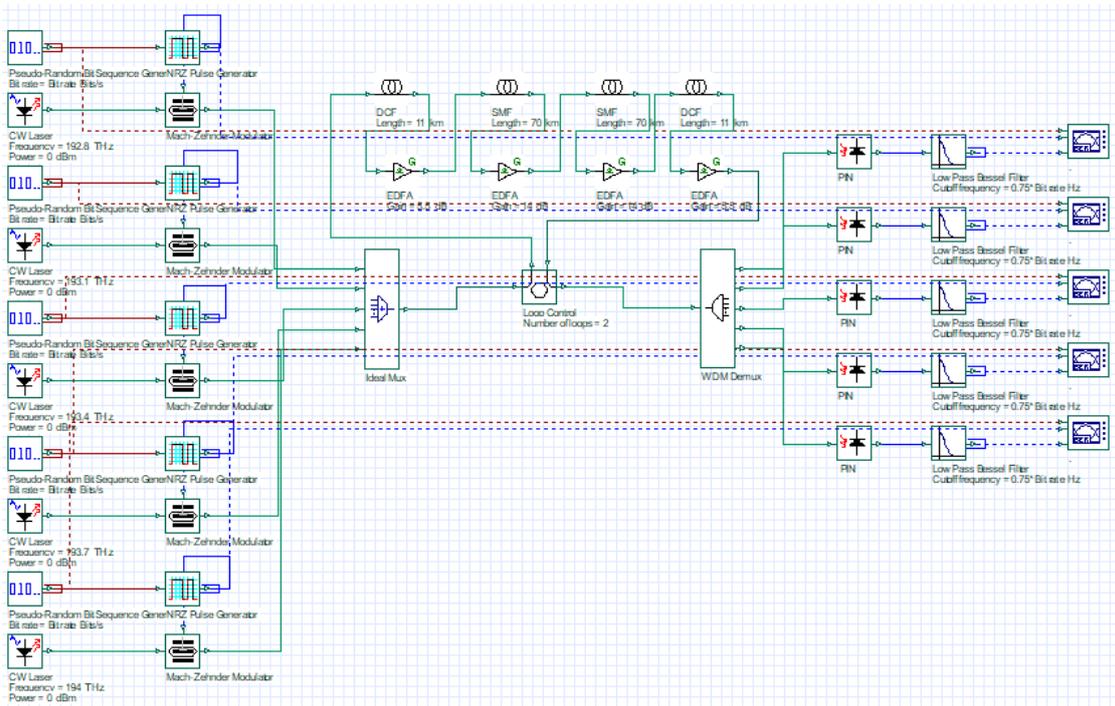
الشكل (7) منحني العين للقتاة الوسطى لنظام Post-compensation

يوضح الجدول (3) نتائج BER التي حصلنا عليها عند تطبيق هذه التقنية وذلك لجميع القنوات ضمن النظام.

الجدول (3) معدل خطأ البت BER لنظام Post-compensation

| تردد القناة | 194 THz | 193.7 THz | 193.4 THz | 193.1 THz | 192.8 THz |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| قيمة BER | 5.9×10^{-17} | 2.1×10^{-17} | 5.9×10^{-17} | 6.2×10^{-14} | 1.3×10^{-14} |

انتقلنا بعد ذلك لدراسة حالة وجود المعوض عند طرفي الليف Symmetric ووضعنا النظام المقترح لها كما هو مبين بالشكل (8).



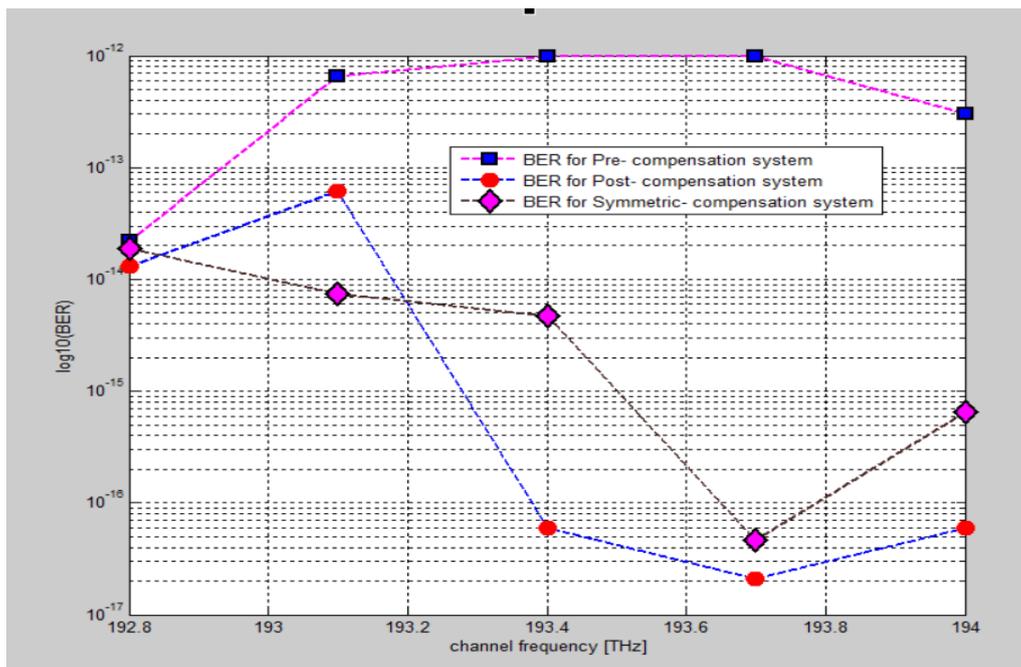
الشكل (8) نظام اتصالات بصري WDM يستخدم تعويض Symmetric-compensation

قمنا بعد ذلك بتنظيم الجدول الخاص بنتائج BER التي حصلنا عليها من جميع قنوات النظام ووضعناها ضمن الجدول (4).

الجدول (4) معدل خطأ البت BER لنظام Symmetric-compensation

| تردد القناة | 194 THz | 193.7 THz | 193.4 THz | 193.1 THz | 192.8 THz |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| قيمة BER | 6.5×10^{-16} | 4.6×10^{-17} | 4.7×10^{-15} | 7.4×10^{-15} | 1.9×10^{-14} |

من أجل توضيح المقارنة بشكل أكبر قمنا برسم النتائج الموضحة بالجدول (2,3,4) وفق المنحني البياني الموضح بالشكل (9).



الشكل (9) علاقة معدل خطأ البت مع تردد القناة المستخدم

يبين الشكل (9) العلاقة بين خطأ البت وتردد القنوات الخمس المستخدمة وذلك لجميع الأنظمة المدروسة أخذنا لوغاريتم الخطأ لتقليل الفرق بين معدلات الخطأ حيث يصل الفرق في بعض الأحيان إلى آلاف الأضعاف. يتضح لنا من خلال هذه المنحنيات أن تقنية وضع المعوض عند نهاية الليف، وكذلك حالة المعوض المتناظر أفضل من تقنية وضع المعوض قبل الليف.

الاستنتاجات والتوصيات

قدمنا خلال هذا البحث حلاً جديداً لتحسين أداء النظم البصرية التي تستخدم تقنية DCF؛ وذلك من خلال المقارنة بين عدة أنظمة تقوم بوضع المعوض في أماكن مختلفة من النظام؛ ويمكن أن نجمل الاستنتاجات التي توصلنا إليها بما يلي:

- تُعدُّ تقنية تعويض التشبث باستخدام الليف البصري المعوض للتشبتت إحدى التقنيات الناجعة ضمن النظم البصرية المستخدمة للاتصالات طويلة المسافة.
- يعتمد أداء النظام البصري المستخدم لتقنية DCF على مكان وضع المعوض ضمن النظام.
- تُعدُّ تقنية وضع الليف المعوض قبل إرسال الإشارة ضمن الليف الأسوأ من حيث الأداء.
- إن وضع المعوض عند نهاية الليف، وكذلك حالة التناظر (عند بداية الليف ونهايته) متقاربان من حيث تحقيق الأداء نفسه للنظام البصري (مع أفضلية لحالة Post)، ويُعدَّان الخياران المناسبان لتصميم النظام البصري.

بعد عرض الاستنتاجات التي توصلنا إليها خلال بحثنا يمكن أن نوصي بعدد من القضايا من أجل التطوير والبناء على ماسبق:

- يمكن ضمن النظم الحديثة السماح بمعدل خطأ للبتات يصل حتى 10^{-3} بسبب وجود تقنيات التصحيح الأمامي وهذا الأمر يسمح بالتقريب أكثر بين القنوات المتجاورة؛ وبالتالي زيادة سعة النظام.
- يمكن استخدام النظام المقترح لإرسال الإشارات إلى مسافات أطول، ويجب عندها مراعاة التشتت المتبقي، وكذلك استخدام مضخمات لتعويض الضياع الناتج عن المسافة المقطوعة.
- ركزنا خلال دراستنا على نوع التعديل NRZ المستخدم على مجال واسع؛ لكن يمكن اقتراح أنواع تعديل أخرى.
- يمكن استخدام تقنيات تعويض أخرى، ومقارنتها مع هذه التقنية، واختيار الأفضل للتصميم.

المراجع

- [1] RAMASWAMI, R; SIVARAJAN, K, N; SASAKI, G, H. 2010, *Optical Network*. 3^{ed}, Morgan Kaufmann, Amsterdam, Boston, London, Sydney, Tokyo, 928.
- [2] BANERJEE, P, P. 2004, *Nonlinear Optics Theory, Numerical Modeling and Application*. Marcel Dekker Inc, New York, Basel, 330.
- [3] KAUR, R; SINGH, H. 2016, *Analysis of 16 s System with Hybrid /10 Gb× Amplifier and FBG at Different Raman Pump Power and Length*. Conference on Advanced in Engineering Technology, (ICAET)
- [4] KASHYAP, R. 1999, *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, Sandiego, London, Boston, 478.
- [5] KAUR, M; SABINA. 2017, *Performance Comparison of Pre-, Post and s DWDM system. /40 Gb× Symmetrical Dispersion Compensation Using DCF for 64* IGECE, Vol 4, Issus 7
- [6] NIELSEN, L, G; TARGENSEN, L, V; EDVOLD, B. 2005, *Dispersion Compensation Fiber*. Journal of Lightwave Technology, Vol23 No 11, pp 3566-3579
- [7] A, GHATAK; K, THYAGARAJAN. 1997, *Introduction To Fiber Optics*, Cambridge University Press, 576.
- [8] CISCO SYSTEMS. 2001, *Introduction To DWDM Technology*, Cisco Systems Inc, USA, 66.
- [9] G, KEISER. 1991, *Optical Fiber Communications*. 2^{ed}, McGraw-Hill, New York, St Louis, Hamburg, London, New Delhi , 244.
- [10] PANADA, K, K; MISHRA, P; SHUKLA, A; NAYAK, S. 2017, *Simulation and Performance Analysis of Dispersion compensation Using DCF in Pre, Post and Symmetrical arrangement for 40 Gbps DWDM Network*, IRJET, Vol 4, issue 11, pp 225-229.

- [11] AGRAWAL, P, G. 2002, *Fiber-Optic Communication Systems*. 3ed, Wiley & Sons Inc, New York, 567.
- [12] AGRAWAL, P, G. 2007, *Nonlinear Fiber Optic*. 4ed, Academic Press, New York, London, Tokyo, Sydney, 534.
- [13] J, CHESNOY.2002, *Undersea Fiber Communication Systems*, Academic Press, Amsterdam, Boston, London, New York, Oxford, Paris, 581.