

تطوير أداء وحدة الشبكة الضوئية (ONU) باستخدام تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب

الدكتور عفيف عزيز صقور*

(تاريخ الإيداع 4 / 10 / 2015. قُبل للنشر في 20 / 4 / 2016)

□ ملخص □

يقترح البحث إجراء تطوير في بنية و حدة الشبكة الضوئية عبر إدخال مرشح ضوئي صرف قادر على التعامل مع تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM: Wavelength Division Multiplexing) و تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب (PDM: Polarization Division Multiplexing) بنفس الوقت مما يمكننا من إرسال قناة على المركبة الأفقية للشعاع الضوئي وأخرى على المركبة الشاقولية على نفس طول الموجة. تسمح تقنية التجميع الهجين WDM-PDM بإيصال ضعف عدد القنوات إلى المشترك دون أي تغيير في البنية التحتية بين المقسم الضوئي و المشترك.

يبرهن البحث أولاً صحة فكرة استخدام التجميع الهجين WDM-PDM باستخدام برنامج معروف في مجال الشبكات الضوئية OptiSystem7.0 ثم يدرس البحث فعالية استخدام المرشح الضوئي المقترح إدخاله في بنية ال ONU من أجل ثلاث حالات للشبكات الضوئية : WDM-PDM للوصلة الهابطة، (WDM(Downstream)/TDM(Upstream) ، WDM(Downstream)/WDM(Upstream) بحسب توصيات اتحاد الاتصالات الدولي.

الكلمات المفتاحية: وحدة الشبكة الضوئية-- التجميع بتقسيم طول الموجة- التجميع بتقسيم الاستقطاب -مرشح ضوئي صرف-تكنولوجيا التداخل فوق صوتي-ضوئي.

* مدرس - قسم الاتصالات و الإلكترونيات كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية

Development the performance Of Optical Network Units (ONU) by Polarization Division Multiplexing technique

Dr. Afif Aziz Sakkour*

(Received 4 / 10 / 2015. Accepted 20 / 4 / 2016)

□ ABSTRACT □

This research proposes the development of Optical Network Units by introducing an all optical Filter. This optical filter can treat WDM and PDM technology at the same time enabling us to send a channel on the horizontal and vertical of the same wavelength .The hybrid WDM-PDM technology allows to delivery double channels for users without any changing in infrastructure between optical central office and user . Firstly , this article prove the idea of hybrid WDM-PDM technology by OptiSystem7.0 simulator, secondly we study proposed all optical Filter for three cases of optical access: WDM-PDM(Downstream), WDM(Downstream)/(TDM(Upstream) , WDM(Downstream)/WDM(Downstream) recommended by the international communication federation, ICF.

Key Words: Optical Network units (ONU), Polarization Division Multiplexing (PDM), Double Acousto-Optic Interaction (DAOI).

* Assistant Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تكمن الأهمية الأساسية للشبكات الضوئية المعتمدة على تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة في بساطتها و اعتمادها على عناصر ضوئية صرفة (لا تحتاج إلى تبديل كهربائي-ضوئي -كهربائي أو العكس). يبين الشكل (1) مكوناتها الأساسية التي تعتمد على استخدام قارن ($1 \times N$ coupler) لبث λ_i طول موجة حيث $i = 1, \dots, N$ من المقسم الضوئي إلى كل مشترك ، يزود كل مشترك بجهاز يدعى وحدة الشبكة الضوئية (Optical : ONU) Network Unit.

يمكن تصنيف الشبكات الضوئية المعتمدة على تقنية التجميع WDM إلى ثلاث أنواع: [1,2]

1. WDM للوصلة الهابطة فقط (خدمة فيديو تحت الطلب). (شبكات بث-انتخاب).
2. WDM للوصلة الهابطة و تجميع بتقسيم الزمن للوصلة الصاعدة حيث يخصص طول موجة ضوئية واحد للوصلة الصاعدة و يخصص له نافذة مستقلة عن تلك المخصصة للوصلة الهابطة.
3. WDM للوصلة الهابطة والوصلة الصاعدة، في هذا النوع من الشبكات يتم تزويد وحدة الشبكة الضوئية بطول موجة خاص من أجل الوصلة الصاعدة لمنح المشترك سعة عالية. يتم تخصيص المجال (nm) 1530 – 1625 للوصلة الصاعدة و المجال (1360 – 1460 nm) مثلاً للوصلة الهابطة بغية فصل الوصلتين. يتم التخلص في هذه الحالة من مشكلة التزامن المفروضة في حالة استخدام TDM (Time Division Multiplexing) للوصلة الهابطة.

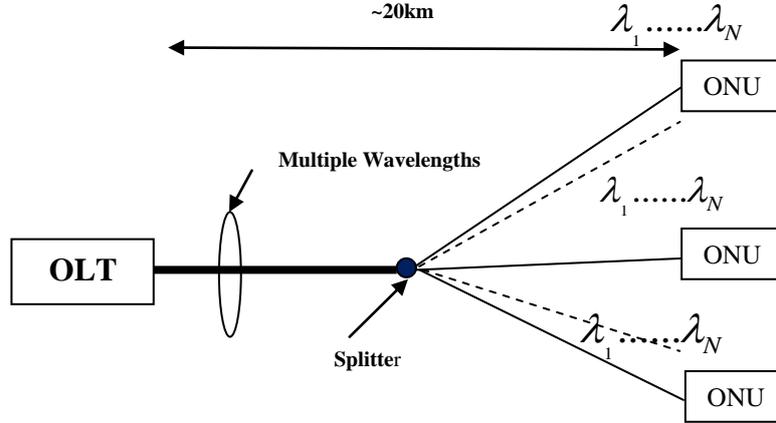
إن السيئة الرئيسية للشبكات الضوئية المعتمدة على تقنية التجميع WDM هو أن الضياعات في القارن تتناسب طردياً مع عدد تفرعات القارن المستخدم N ، تبلغ الضياعات عبر القارن $10 \log(N)$. يبين الجدول (1) قيم الضياعات بحسب أنواع القارنات المتوفرة عملياً:

جدول(1): قيم الضياعات بحسب أنواع القارنات المتوفرة تجارياً .

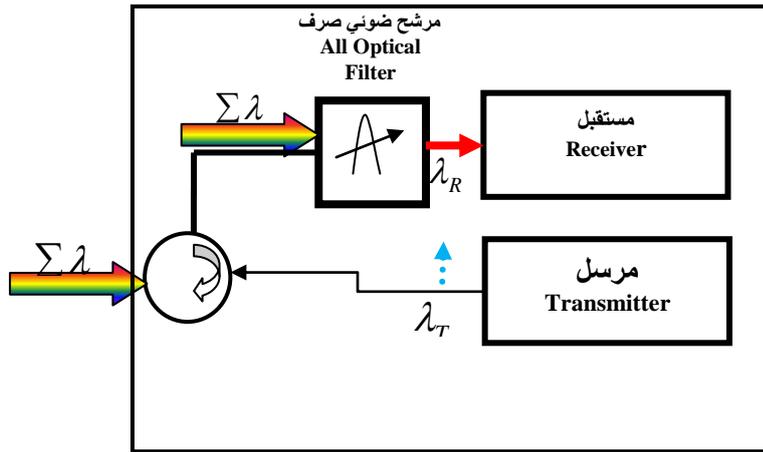
نوع القارن	1×2	1×4	1×8	1×16	1×32	1×64	1×128
عدد المشتركين في الشبكة (N)	2	4	8	16	32	64	128
قيمة الضياع	3 dB	6 dB	9 dB	12 dB	15 dB	18 dB	21 dB

بالإضافة إلى الضياعات عبر القارن ، يجب إضافة الضياعات عبر الليف الضوئي المستخدم كوسط إرسال ، كما أن الضياعات في المرشحات الضوئية تشكل جزءاً أساسياً للوحدة ONU . يتم تحديد عدد المشتركين في الشبكة N بدراسة ميزانية القدرة (Power Budget) لشبكة WDM و بالتالي فإن عدد الوحدات الضوئية (عدد المشتركين) يجب ألا يتجاوز N مشتركاً.

يبين الشكل (2) البنية التقليدية لوحدة الشبكة الضوئية حيث يلعب المرشح الضوئي الذي يشكل عنصر الاستقبال في وحدة الشبكة الضوئية المعتمدة على تقنية WDM دوراً مهماً جداً ، يجب أن يتمتع المرشح الضوئي بمواصفات خاصة تتعلق بالتباعد الطيفي بين حامل ضوئي و آخر مجاور .

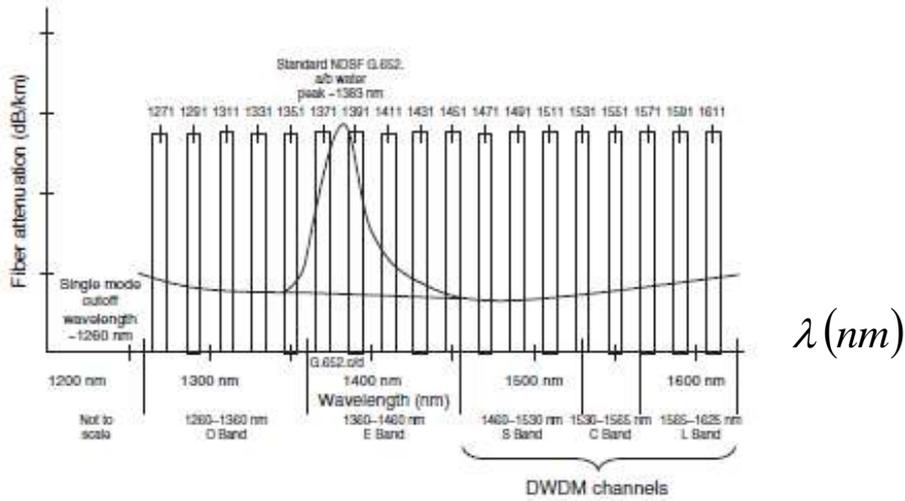


شكل(1): الشبكة الضوئية المعتمدة على تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة.



شكل(2): البنية التقليدية لوحدة الشبكة الضوئية.

تتوجه الأبحاث و الدراسات الحديثة إلى استخدام التجميع الخشن (CWDM : Coarse WDM) في الشبكات الضوئية و قد حدد اتحاد الاتصالات الدولي قيم أطوال الموجة الضوئية و المجالات الضوئية وفق المعيار ITU-T G.694.2 . يبين الشكل(3) أطوال الموجات موزعة على منحنى تخامد الليف الضوئي والتي تشكل بدورها مجالات الاتصالات الضوئية الأساسية المستخدمة بين المقسم الضوئي (OLT: Optical Line Terminal) و وحدة الشبكة الضوئية [1,2].



شكل (3): التجميع الخشن المقترح استخدامه في الشبكات الضوئية وفق المعيار ITU-T G.694.2.

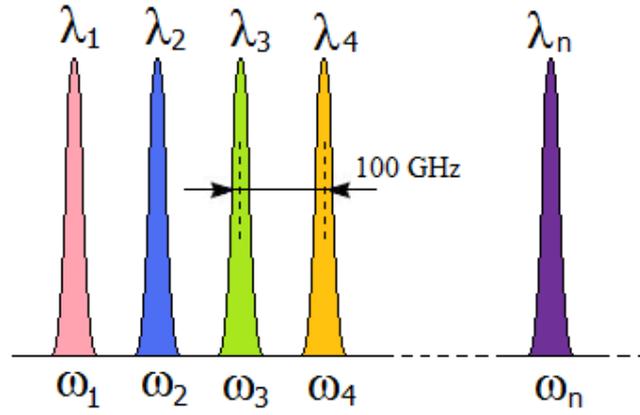
تقنيات التجميع الحالية من أجل الاستخدام الأمثل لعرض نطاق الليف الضوئي: التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM):

يستخدم التجميع بتقسيم طول الموجة WDM بشكل كبير جداً في الاتصالات الضوئية من أجل الاستخدام الأمثل لعرض نطاق الليف الضوئي. تسمح تكنولوجيا التجميع WDM بالوصول إلى سرعات تدفق عالية للمعطيات من مرتبة Terabit/s باستخدام ليف ضوئي واحد [1,2].

تكمن الفكرة الأساسية لتكنولوجيا التجميع WDM بإرسال عدة قنوات رقمية ترسل على أطوال أمواج ضوئية حاملة مختلفة داخل ليف ضوئي وحيد النمط ذو نواة زجاجية مكسوة بزجاج ، و بالتالي يتم تقاسم عرض نطاق الليف الضوئي بين عدة قنوات والتي يمكن لاحقاً إعادة توزيعها بين عدة مستخدمين شكل(3).

يستخدم حالياً في الاتصالات الضوئية المجال الطيفي (1530nm-1570nm) حيث تم تنظيم التباعد الطيفي بين قناة و أخرى مجاورة من قبل اتحاد الاتصالات الدولي فكلما كان التباعد صغيراً كلما أمكن إرسال عدد أكبر من القنوات على نفس الليف الضوئي. و هنا نتكلم عن التجميع الخشن (CWDM : Coarse WDM) عندما يكون التباعد الطيفي يساوي (1.6nm(200 GHz) وعن التجميع المكثف (DWDM: Dense WDM) من أجل تباعد طيفي مقداره (0.8nm(100 GHz) ، هذا يسمح بإرسال 64 قناة بنفس الوقت على ليف ضوئي.

تسمح التكنولوجيا CWDM بتخفيف القيود و الشروط الواجب توفرها في طيف المنابع الليزرية المولدة للحوامل الضوئية مما يؤدي إلى تقليل كلفة نظام الاتصال الضوئي، فعلى سبيل المثال لا يعود هناك حاجة ضرورية للتحكم بحرارة المنابع الليزرية من أجل تجنب انحراف طول الموجة لهذه المنابع، مما يسمح بتقليل كلفة نظام الإرسال. و يكمن العيب الأساسي للتجميع CWDM بإمكانية إرسال 8 قنوات فقط ضمن المجال (1470nm-1610nm) . إضافةً إلى ذلك يجب الأخذ بالحسبان مشكلة المضخمات الضوئية ، التي يجب أن تكون عريضة المجال من أجل تضخيم كل القنوات معاً بشكل متماثل.

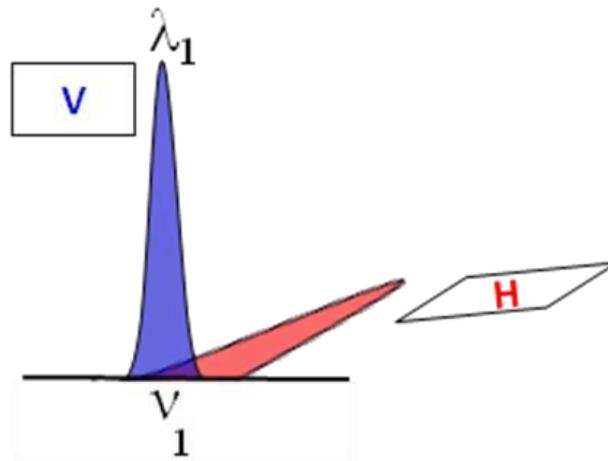


شكل(3): مبدأ التجميع بتقسيم حسب طول الموجة WDM.

التجميع بتقسيم الاستقطاب (PMD) :

يستغل هذا النوع من التجميع الخاصية الشعاعية للأمواج الضوئية الموجهة داخل ليف ضوئي و ذلك بالاستفادة من خاصية استقطاب الشعاع الضوئي. يرسل في هذا النوع من التجميع، من أجل طول موجة ضوئية و حيدة قناة على المركبة الأفقية للشعاع الضوئي و قناة أخرى على المركبة الشاقولية في جهة الإرسال [3].
تفصل المركبتين الأفقية و الشاقولية للشعاع الضوئي في جهة الاستقبال، يبين الشكل (4) مبدأ التجميع

.PMD

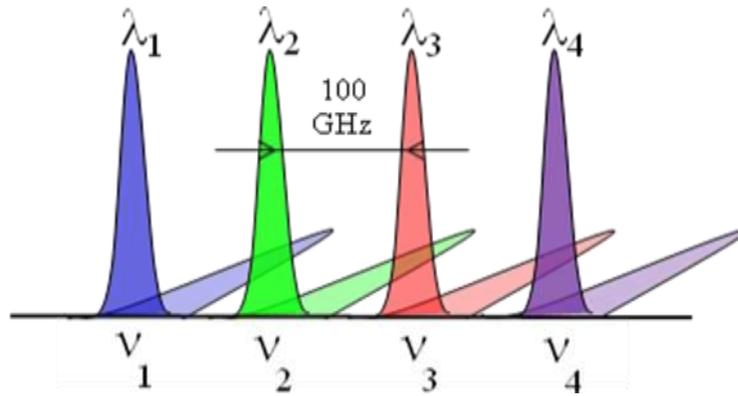


شكل(4): مبدأ التجميع بتقسيم الاستقطاب

التجميع المزدوج يتقسم طول الموجة و تقسيم الاستقطاب (WDM and PMD):

في هذا النوع الجديد من التجميع، يستخدم التجميع PDM لإرسال قناتين (بمعدل إرسال D لكل قناة) على طول موجة ضوئية λ_i باستخدام خاصية استقطاب الموجة الضوئية، ويستخدم بنفس الوقت التجميع WDM من أجل إرسال n قناة على أطوال موجة ضوئية λ_i مختلفة حيث $(i = 1, \dots, n)$ بتباعد طيفي محدد من قبل اتحاد الاتصالات الدولي.

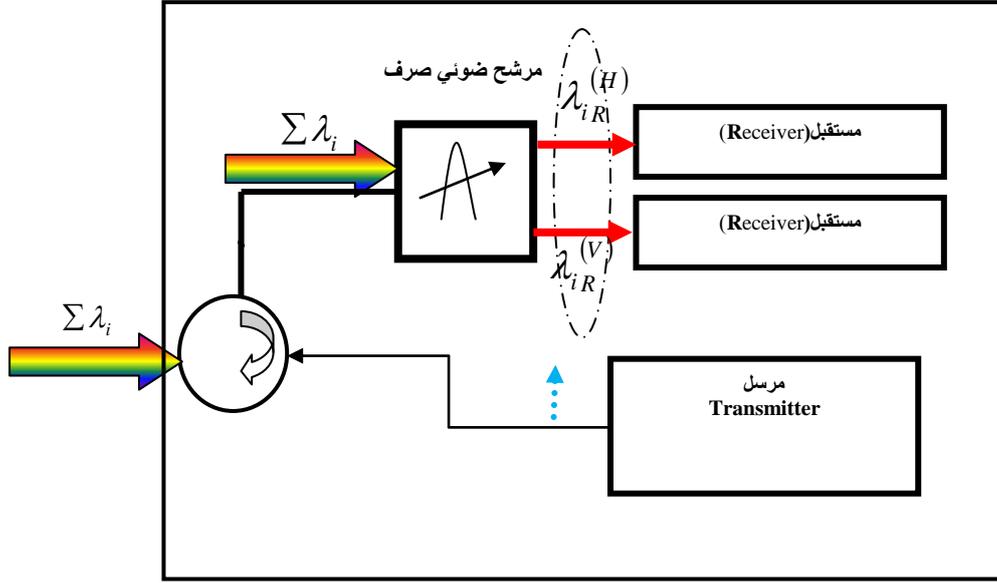
يلاحظ أن استخدام التجميع بتقسيم الاستقطاب هو حل فعال جداً لمضاعفة معدل الإرسال الكلي الذي يساوي $(2 * N * D)$ عند استخدام التجميع المزدوج WDM و PDM انظر شكل (5) [3].



شكل (5): مبدأ التجميع بتقسيم طول الموجة و التجميع بتقسيم الاستقطاب معاً.

أهمية البحث و أهدافه:

تتمثل أهمية هذا البحث في التعديل المقترح إجراءه في بنية وحدة الشبكة الضوئية بحيث تصبح هذه الأخيرة قادرة على معالجة ضعف عدد القنوات دون إحداث أي تغيير في البنية التحتية بين المقسم الضوئي OLT و المشترك المزود بوحدة الشبكة الضوئية ONU عن طريق تطبيق تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب التي تتيح مضاعفة عدد القنوات لكل طول موجة مرسل من المقسم البصري. و يتطلب تطبيق تقنية التجميع PDM و التجميع الهجين WDM-PDM مرشحاً ضوئياً قادراً على التعامل مع تقنية PDM و WDM-PDM. يدرس البحث مرشحاً ضوئياً صرفاً لاستخدامه في وحدة الشبكة الضوئية، يستخدم تقنية التداخل المضاعف بين الأمواج فوق الصوتية و الضوئية و يبرهن كذلك على فعالية استخدامه لتطبيقات WDM-PDM. يبين الشكل (6) البنية المقترحة إجراؤها في بنية و حدة النفاذ البصرية، قارن مع الشكل (2).



الشكل (6): البنية المقترحة لوحدة الشبكة الضوئية، يستطيع المرشح الضوئي الصرف المقترح استخدامه.

انتقاء طول موجة بصرية λ_i من بين N طول موجة و فصل القناة المحملة على المركبة الأفقية $\lambda_{iR}^{(H)}$ عن القناة المحملة عن المركبة الشاقولية $\lambda_{iR}^{(V)}$.

تأتي أهمية البحث كذلك من خلال مواصفات المرشح الضوئي المدروس و التي تتمثل في النقاط التالية:

- عدم الحاجة إلى تحويل ضوئي / كهربائي أو العكس.
- إمكانية الوصول التتابعي (sequential) أو العشوائي (random) لأي طول موجة في تقنية WDM وأنواعها.
- العمل ضمن طيف يغطي النوافذ الضوئية الحالية والمستقبلية.
- عدم الحاجة إلى تبديل أو إعادة ضبط المرشح أمام الليف الضوئي عند تغيير المجال الضوئي المستخدم.

طرائق البحث و مواده:

يمكن تلخيص طريقة البحث و مواده في النقاط التالية:

- دراسة و مراجعة الأبحاث و التطورات في مجال تقنيات التجميع الضوئي و التعرف إلى طريقة حديثة في التجميع الضوئي و هي طريقة التجميع بتقسيم الاستقطاب PDM و طريقة التجميع الهجين WDM-PDM.
- دراسة و مراجعة الأبحاث و التطورات في مجال الترشيح الضوئي بغية إيجاد تقنية الترشيح الضوئي الملائمة لتقنية التجميع PDM و WDM-PDM.
- اقتراح الاستفادة من الدراستين الأولى و الثانية من أجل إحداث تطوير في بنى و وحدات الشبكة الضوئية كي تصبح قادرة على التعامل مع تقنية التجميع PDM و WDM-PDM.

المرشحات الضوئية الصرفة:

يمكن تصنيف المرشحات الضوئية ضمن خمس عائلات هي [4,5]:

▪ مرشحات تداخلية من النوع Fabry-Perot

▪ مرشحات تداخلية من النوع Mac-Zender

▪ مرشحات انعراجية من النوع Bragg

▪ مرشحات التداخل Electro-Optic (مرشحات انعراج).

▪ مرشحات التداخل Acousto-Optic (مرشحات انعراج).

تعمل المرشحات من النوع Electro-Optic و Acousto-Optic ضمن طيف واسع من أطوال الموجة و لا تحتاج في عملها إلى تغيير للمرشح الضوئي أثناء الانتقال من نافذة اتصال ضوئية إلى أخرى، إنما يكفي إجراء تغيير لبعض الوسطاء (parameters) الخارجية لتعديل مجال عمل المرشح الضوئي و انتخاب طول الموجة المرغوب.

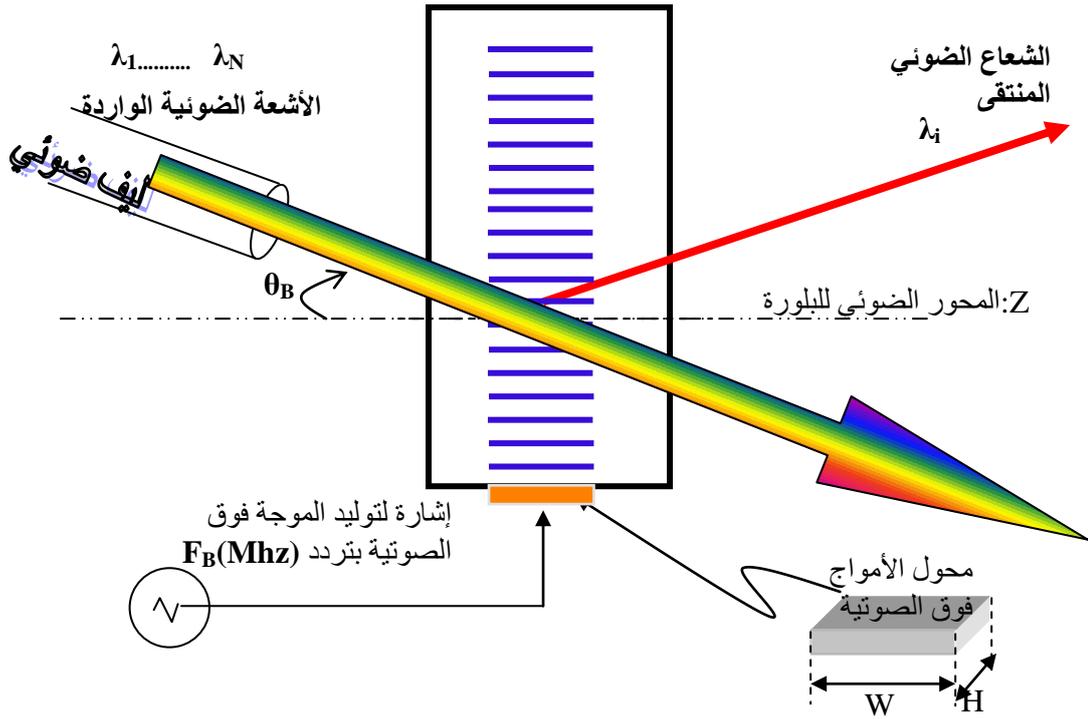
اعتمد هذا البحث على المرشحات الضوئية الصرفة التي تعتمد في عملها على تكنولوجيا التداخل بين الأمواج فوق الصوتية و الأمواج الضوئية Acousto-Optic Interaction ، نظراً لاستخدامها الواسع حالياً نظراً لإمكانية تعديلها لتصبح قادرة على إضافة / حذف طول موجة ضوئية محدد في عقد شبكات الاتصال الضوئية تحقيقاً لهدف المرونة في الشبكة الضوئية.

مبدأ عمل مرشحات التداخل فوق صوتي-ضوئي.

تعتمد مرشحات التداخل فوق صوتي - ضوئي على التحكم بإشارة ضوئية عن طريق استخدام إشارة فوق صوتية ، بحيث تقوم هذه الأخيرة بتعديل قرينة انكسار الوسط المستخدم للتداخل (بلورة). نعرف عملية تعديل دليل انكسار وسط التداخل تحت اسم (Photo-Elastic) . تولد الموجة فوق الصوتية داخل البلورة شبكة طوريه بعرض L و بخطوة تساوي طول الموجة فوق الصوتية Λ_a . إن مرور موجة ضوئية بطول موجي λ_0 في الفراغ الحر عبر البلورة (ذو قرينة انكسار n) المستخدم كوسط للتداخل ، يمكن أن تنحرف من قبل الشبكة الطورية المولدة بواسطة الموجة فوق الصوتية عند عدة شروط .

يمكننا باستخدام تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي تنفيذ عدة عناصر ضوئية مثل (ماسحات ضوئية، معدلات خارجية ، مرشحات متوافقة للاتصالات الضوئية.....الخ).

يتم في المرشحات الضوئية الصرفة التي تعتمد تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي في عملها انتخاب طول موجة ضوئية محدد λ_i ($i=1....N$) عن طريق تطبيق إشارة كهربائية بتردد معين على محول الأمواج فوق الصوتية شكل(7) [6,7].



شكل (7): مرشح ضوئي صرف يستخدم تكنولوجيا التداخل بين الأمواج فوق الصوتية و الأمواج الضوئية (مسقط علوي للمرشح).

تعطى كفاءة المرشح (النسبة بين الشدة الضوئية للشعاع الضوئي المنتخب في خرج المرشح إلى شدته الضوئية في دخل المرشح) بالعلاقة التالية:

$$\eta = \frac{I_d}{I_0} = \frac{P}{P_0 \theta} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\theta}, \quad \theta = \frac{P}{P_0} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi} \right)^2 \quad (1)$$

حيث:

I_d : الشدة الضوئية للشعاع الضوئي المنتخب (خرج المرشح) .

I_0 الشدة الضوئية للشعاع الضوئي الوارد (دخل المرشح).

P : استطاعة الموجة فوق الصوتية .

P_0 : استطاعة الموجة فوق الصوتية اللازمة لعكس كامل الشعاع الضوئي الوارد عند التزامن.

$\Delta\phi$ فرق الطور الناتج عن تداخل غير متزامن بين الشعاع الضوئي الوارد وشعاع الموجة فوق الصوتية،

و يمكن حسابه بطرق متعددة هندسية أو رياضية [8,9].

تعتبر عملية التداخل فوق صوتي - ضوئي كعملية تصادم بين فوتون (شعاع ضوئي) وفونون (شعاع موجة فوق صوتية). إن انتخاب طول موجة محدد بواسطة الموجة فوق الصوتية، يتطلب تطبيق مصونية الطاقة و التي يعبر عنها بالعلاقة التالية [9] :

$$\vec{K}_d = \vec{K}_a \pm \vec{K}_i \quad (2)$$

حيث:

$\vec{K}_i, \vec{K}_a, \vec{K}_d$ تمثل على التوالي: أشعة الموجة للشعاع الضوئي المنتخب (خرج المرشح الضوئي) و شعاع الموجة فوق الصوتية و للشعاع الضوئي الوارد (دخل المرشح الضوئي). وتقيد العلاقة (2) في حساب تردد الإشارة اللازم تطبيقها على محول الأمواج فوق الصوتية من أجل انتخاب طول موجة محدد λ_i .

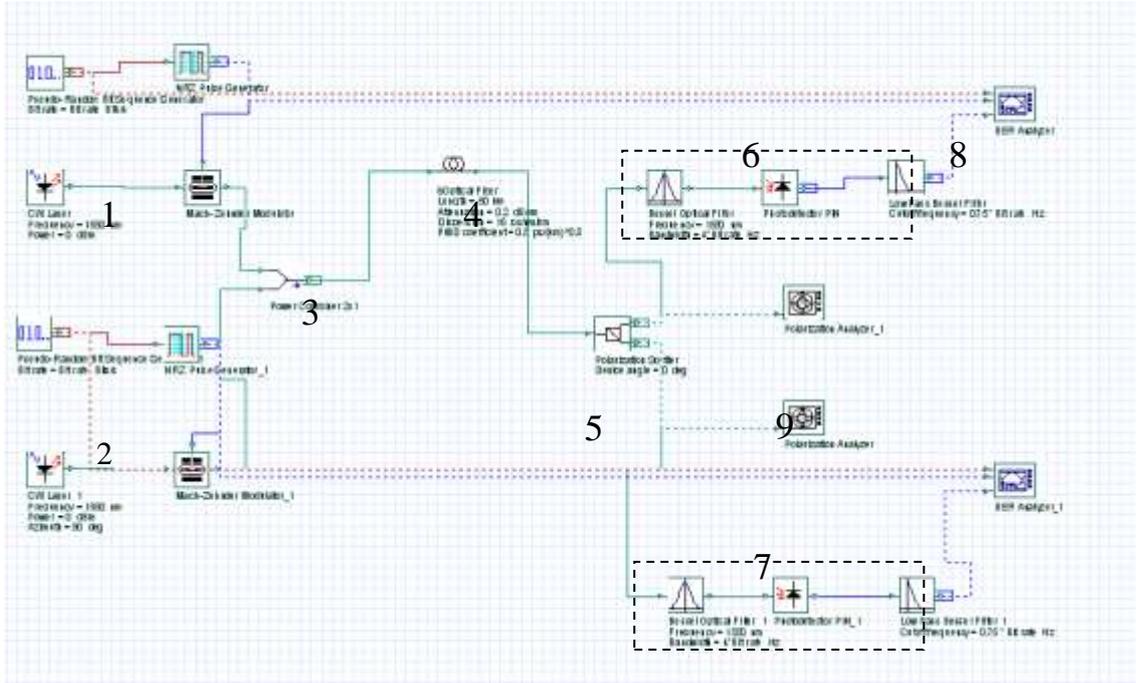
النتائج و المناقشة:

(1) إثبات فكرة البحث باستخدام برنامج المحاكاة OptiSystem 7.0

يمكن للنمط الأساسي (LP_{01}) أن ينتشر في ليف ضوئي أحادي النمط باستقطاب أفقي LP_{01}^x أو شاقولي LP_{01}^y في حين أنه من المحال إرسال معطيات على نفس طول الموجة ضمن نفس الليف حيث تظهر مشكلة حجب طول الموجة، لكن يمكن الاستفادة من خاصية الاستقطاب للنمط الأساسي LP_{01} من أجل تطبيقات التجميع PDM و التي سوف نبرهن على صحتها عبر البرنامج OptiSystem 7.0.

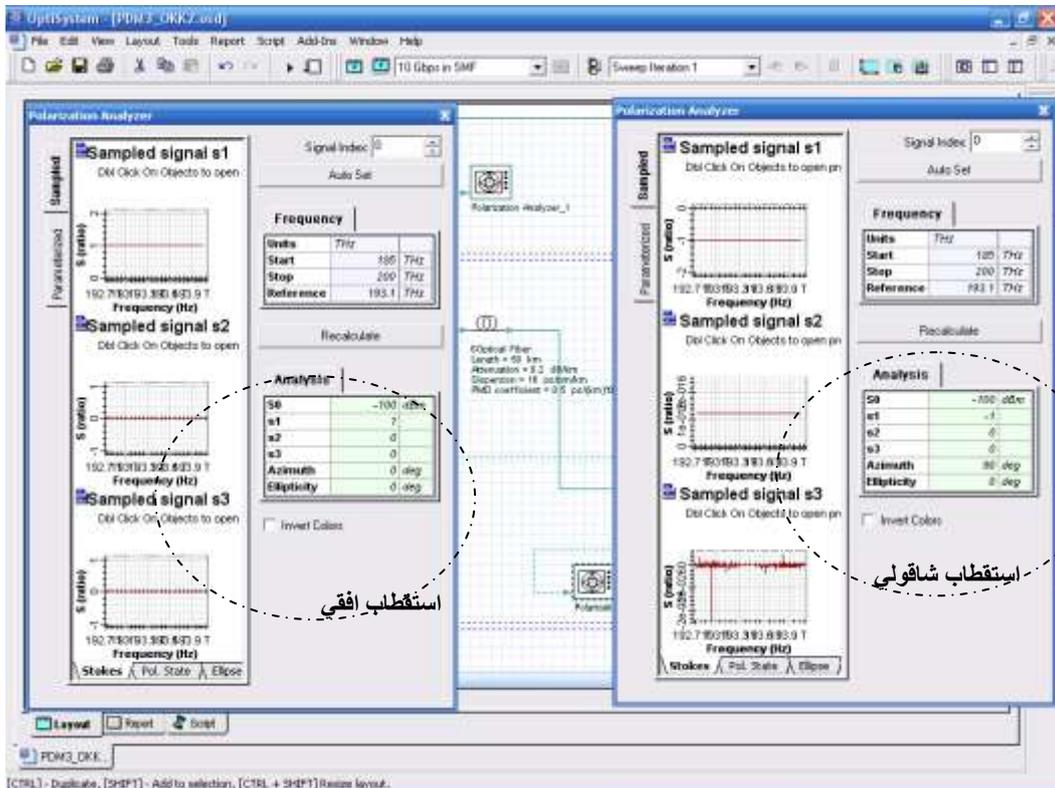
يتألف نموذج المحاكاة شكل (8) من :

- (1) منبع CW Laser ذو طول موجة 1550 nm باستقطاب خطي أفقي (كما هو مبين في نموذج المحاكاة) ، تم تعديله بوساطة معدل خارجي من النوع Mach Zender بمعدل نقل 10 Gbps.
- (2) منبع CW Laser ذو طول موجة 1550 nm باستقطاب خطي شاقولي (كما هو مبين في نموذج المحاكاة) ، تم تعديله بوساطة معدل خارجي من النوع ماك زندر بمعدل نقل 10 Gbps.
- (3) قارن 1×2 لتجميع و قرن القناتين المستقطبتين بشكل متعامد ضمن ليف ضوئي أحادي النمط (SMF: Single Mode Fiber).
- (4) ليف ضوئي أحادي النمط بطول 50 Km بعامل تخميد 0.2 dB/Km و عامل تشتيت استقطاب $0.5 ps / \sqrt{Km}$ و عامل تشتيت لوني $16 ps / nm.Km$. تجدر الإشارة إلى أن مواصفات الليف مبينة على نموذج المحاكاة.
- (5) فاصل استقطاب لعزل القناة المحملة على المركبة الأفقية عن الشاقولية.
- (6) قسم الاستقبال للقناة المرسل على المركبة الأفقية للحامل الليزري يتضمن (مرشح ضوئي -كاشف PIN و مرشح تمرير تردد منخفض).
- (7) قسم الاستقبال للقناة المرسل على المركبة الشاقولية للحامل الليزري يتضمن (مرشح ضوئي - كاشف PIN و مرشح تمرير تردد منخفض).
- (8) أجهزة قياس جودة الإشارة المستقبلية (قياس معدل الخطأ أو عامل الجودة Q).
- (9) أجهزة تحليل الاستقطاب للتأكد من حالة الاستقطاب بعد فصل القناتين.



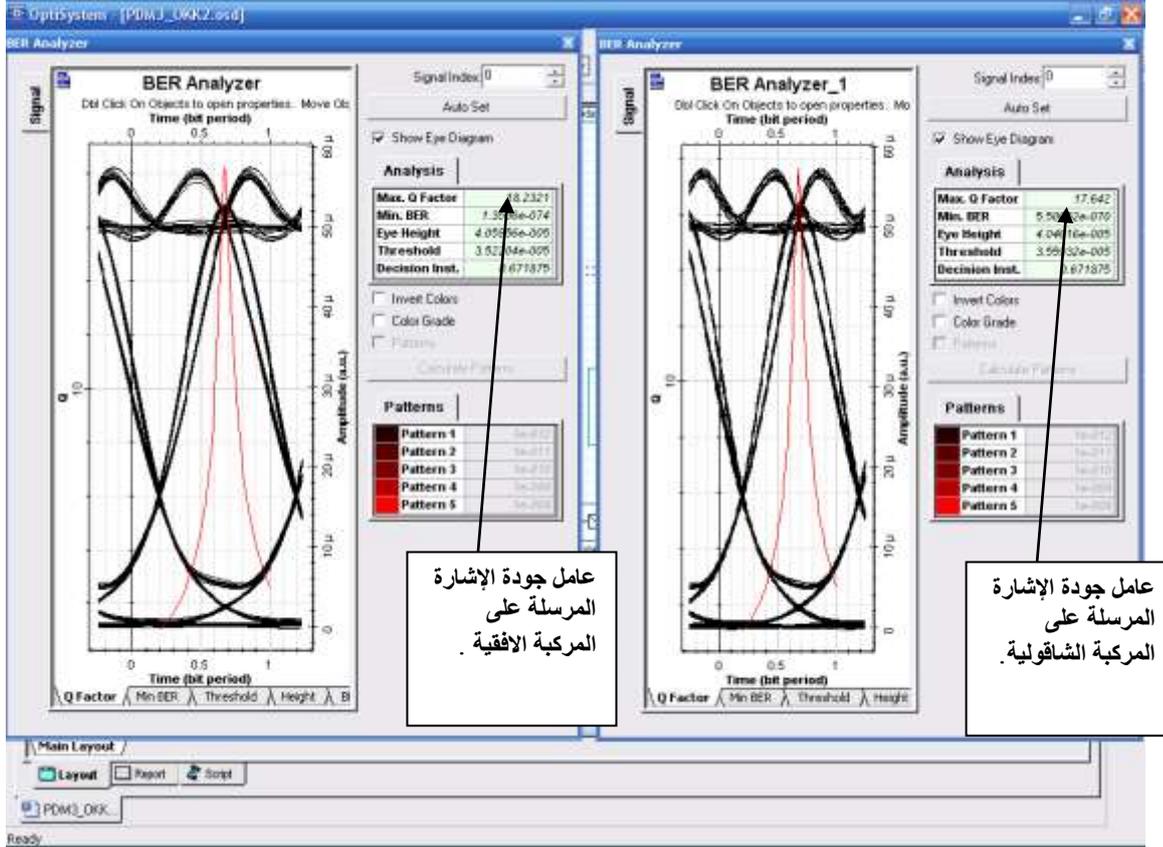
شكل(8): نموذج محاكاة للتجميع بتقسيم الاستقطاب .

يبين الشكل (9): معاملات ستوكس من أجل تحديد حالة الاستقطاب لكل قناة في خرج الليف وتشير النتائج بدقة إلى انتشار القناتين المستقطبتين بشكل متعامد على نفس طول الموجة للحامل الضوئي ضمن الليف SMF.



شكل(9): نتائج المحاكاة -بارامترات ستوكس تبين بوضوح الحصول في خرج الليف على قناة باستقطاب أفقي (يسار الشكل) و أخرى باستقطاب شاقولي (يمين الشكل).

يوضح الشكل (10) المخطط العيني للقناة المستقبلية المحملة على المركبة الأفقية و الشاقولية وتشير النتائج بوضوح إلى جودة الإشارة المستقبلية للقناتين حيث أن قيمة عامل الجودة $Q=17.6$ للإشارة المرسله على المركبة الأفقية و $Q=18.2$ للإشارة المرسله على المركبة الشاقولية.



شكل(10): عامل جودة استقبال القناة المحملة على الشعاع الضوئي المستقطب أفقياً (يسار الشكل) و المستقطب شاقولياً (يمين الشكل).

(2) حساب وسطاء المرشح الضوئي المقترح من أجل تطبيقات WDM-PDM.

يقوم جهاز الإرسال، كما هو مبيّن في نموذج المحاكاة بتحميل قناتين على نفس طول الموجة الضوئية باستخدام معدل ضوئي خارجي ثم يقوم بتجميع القناتين و قرنها عبر ليف ضوئي أحادي النمط و يكون معدل النقل عند تطبيق تقنية التجميع PDM يساوي $2 \times D$ حيث D معدل نقل القناة الواحدة . في حال استخدام تقنية التجميع WDM مع التجميع PDM يصبح معدل النقل الكلي $2 \times D \times n$ حيث n عدد الحوامل الضوئية (المنابع الضوئية) المستخدمة. هذا بدوره يشير إلى فعالية تقنية التجميع الهجين WDM-PDM التي تتيح مضاعفة معدل النقل و عدد القنوات التي تصل إلى كل مشترك دون الحاجة إلى أي تغيير في البنية التحتية بين المقسم الضوئي و المشترك. يجب بالتالي و خلاصة لما ورد أعلاه البحث عن مرشحات ضوئية قادرة على ترشيح طول موجة محدد λ_i و بنفس الوقت فصل القناتين المحملتين على المركبة الأفقية و الشاقولية للشعاع الضوئي ذي طول الموجة λ_i . يبرهن البحث على أن المرشح المدروس قادر على تحقيق المطلوب.

■ معطيات البحث.

اعتمد البحث في دراسته على المعطيات التالية:

- (1) البلورة المستخدمة كوسط تداخل هو ثاني اوكسيد التيلوريوم TeO_2 الذي يمكن معرفة مواصفاته الضوئية و خصائص انتشار الموجة فوق الصوتية فيه بالعودة للمرجع [8].
- (2) محول أمواج فوق صوتية Y-163 قادر على توليد موجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب تنتشر بزاوية $\alpha = 10^\circ$ بالنسبة لمحور البلورة OX و هذا يعطي بدوره سرعة انتشار للموجة فوق الصوتية $v_a = 705 \text{ m/s}$.

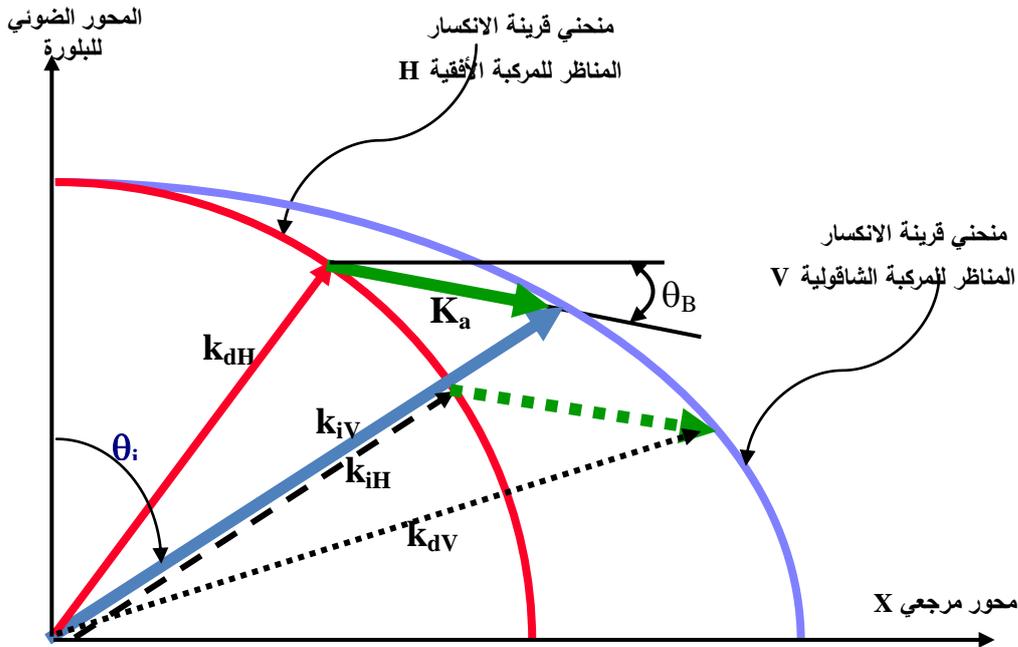
■ مبدأ فصل المركبتين الأفقية و الشاقولية معاً باستخدام

التداخل المضاعف فوق صوتي-ضوئي .

يصل الشعاع الضوئي ذو طول الموجة λ_i حيث $i = 1 \rightarrow n$ إلى المرشح المقترح إدخاله في البنية التصميمية لوحدة الشبكة الضوئية ONU باستقطاب أفقي (\vec{K}_{iH}) للقناة الأولى و باستقطاب شاقولي (\vec{K}_{iV}) للقناة الثانية. يمكن فصل القناة الأولى عن الثانية باستخدام التداخل الثنائي بين الأمواج فوق الصوتية و الضوئية حيث يمكن توليد موجة فوق صوتية بسرعة محددة تنتشر داخل بلورة ثنائية الانكسار و استناداً إلى الأسس النظرية لتقنية التداخل فوق صوتي-ضوئي، يمكن للقناة المستقطبة أفقياً أن تتداخل مع شعاع الموجة فوق الصوتية و في الوقت نفسه يمكن للقناة المستقطبة شاقولياً أن تتداخل مع نفس الموجة فوق الصوتية و يمكن أن نطلق على تحقيق التداخلين معاً بالتداخل الثنائي فوق صوتي-ضوئي.

لحساب تردد التداخل نستعين بالمخطط الشعاعي في الشكل (11) الذي يصف التداخل الثنائي و يوضح عملية

فصل المركبتين الأفقية و الشاقولية للشعاع للضوئي الوارد.



شكل(11): التمثيل الشعاعي للعلاقة (4).

بالاستعانة بالشكل (11) نجد:

$$\vec{K}_{dH} = \vec{K}_{iV} - \vec{K}_a \quad (3)$$

$$\vec{K}_{dV} = \vec{K}_{iH} + \vec{K}_a \quad (4)$$

حيث $(\vec{K}_{iV}, \vec{K}_{iH})$ المركبتين الأفقية و الشاقولية للشعاع الضوئي الوارد (استقطاب خطي).
 $(\vec{K}_{dV}, \vec{K}_{dH})$ المركبتين الأفقية و الشاقولية للشعاع الضوئي المنتخب (استقطاب خطي).

بتربيع طرفي العلاقتين (4) و (5) و التخلص من الأشعة نجد:

$$\begin{cases} F_H = \frac{V_a}{\lambda_o} f_1(n_{ie}, \theta_B) \\ F_V = \frac{V_a}{\lambda_o} f_2(n_{de}, \theta_B) \end{cases} \quad (5)$$

مع:

$$\begin{cases} f_1(n_{ie}, \theta_B) = \left[n_{ie} \sin(\theta_i - \theta_B) - \sqrt{n_o^2 - n_{ie}^2 \cos^2(\theta_i - \theta_B)} \right] \\ f_2(n_{de}, \theta_B) = \left[n_{de} \sin(\theta_i - \theta_B) - \sqrt{n_o^2 - n_{de}^2 \cos^2(\theta_i - \theta_B)} \right] \end{cases} \quad (6)$$

حيث:

F_H : تردد الإشارة اللازم تطبيقها على محول الأمواج فوق الصوتية من أجل انتخاب طول موجة λ_i من بين n طول موجة و فصل المركبة الأفقية للشعاع الضوئي الوارد في دخل المرشح عن المركبة الشاقولية.

F_V : تردد الإشارة اللازم تطبيقها على محول الأمواج فوق الصوتية من أجل انتخاب طول موجة λ_i من بين n طول موجة و فصل المركبة الشاقولية للشعاع الضوئي الوارد في دخل المرشح عن المركبة الأفقية.

يتم حساب أدلة الانكسار $n_{ie}(\theta_i)$ ، $n_{de}(\theta_{de})$ بالاعتماد على المنحني المناظر للمركبة الشاقولية شكل(11).

■ الحساب العددي للتردد F_H ، F_V .

ببرمجة العلاقتين في المعادلة (5) و الأخذ بالحسبان العلاقات (6) يمكننا إيجاد قيمة التردد F_H و F_V

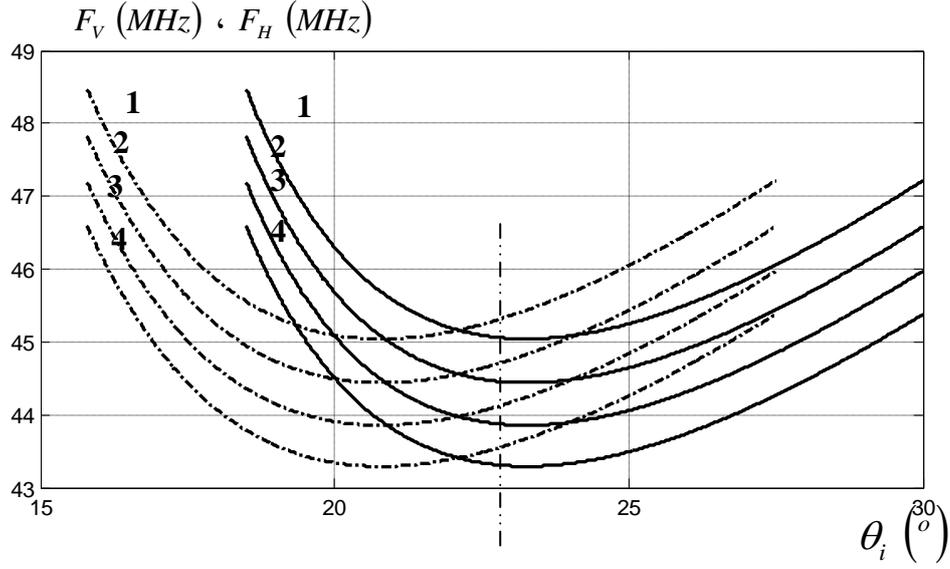
ضمن نوافذ الاتصالات الأساسية .

يبين الشكل (8) منحني التردد F_H و F_V كتابع لزاوية ورود الشعاع الضوئي الوارد من الليف الضوئي على المرشح الضوئي المدروس ضمن مجال الاتصالات الضوئية (Conventional) C من أجل أربع أطوال موجة بتباعد طيفي 20 nm بحسب توصيات الاتحاد الدولي للاتصالات عام 2003 .

نلاحظ من الشكل (12) أن منحنيات التردد F_H و F_V تتقاطع جميعها عند زاوية ثابتة $\theta_i = 22^\circ$ و

هذا مهم لأنه يسمح بانتقاء طول الموجة المرغوب ضمن مجال ضوئي معين و فصل القناة الأفقية عن الشاقولية دون الحاجة إلى إعادة ضبط المرشح الضوئي. كما يشير المنحني المنقط في الشكل (8) إلى F_H بينما المستمر

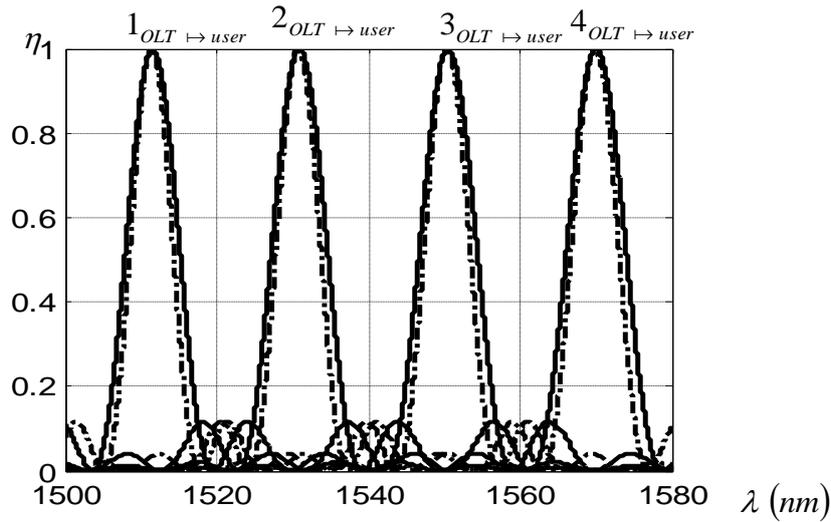
إلى F_V .

شكل(12): منحنى التردد F_V و F_H كتابع لزاوية مرور الشعاع الضوئي

$$\text{ضمن النافذة الضوئية الموسعة C-Band } [\lambda_1 = 1511, \lambda_2 = 1531, \lambda_3 = 1551, \lambda_4 = 171] \text{ nm}$$

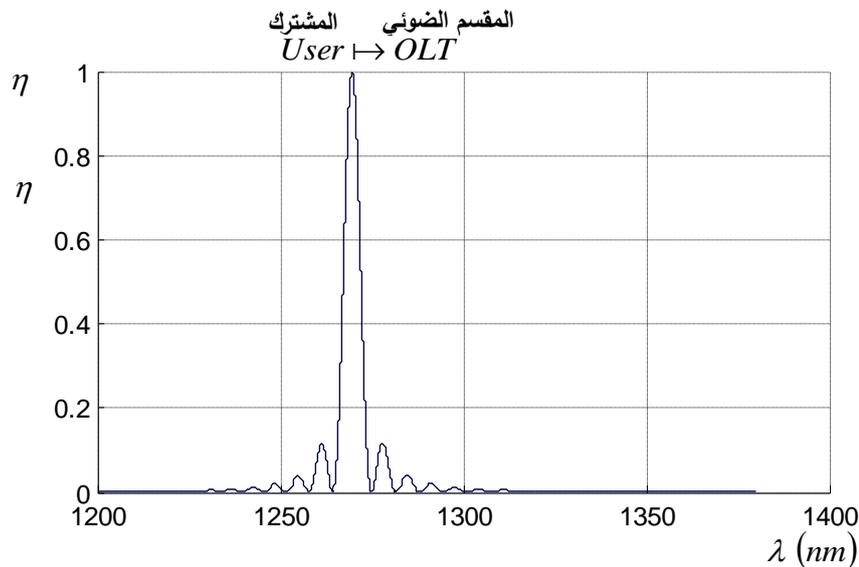
$$[f_{a1} = 45.1, f_{a2} = 44.5, f_{a3} = 43.9, f_{a4} = 43.4] \text{ MHz}$$

يبين الشكل (13) منحنيات الكفاءة للمرشح الضوئي المدروس من أجل تطبيقات WDM-PDM للوصلة الهابطة (النوع الأول لشبكات النفاذ البصرية) من أجل أربع قنوات متجاورة بتباعد طيفي 20 nm. تلعب الوريقات الجانبية لمردود القناة دوراً رئيساً في التداخل مع القنوات المتجاورة وتبلغ قيم الوريقات الجانبية المبينة في الشكل (13) -10 dB للورقة الأولى و -14 dB للورقة الثانية و -20dB للورقة الثالثة. تجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحسين الانتقائية الطيفية للمرشح المدروس بحيث يلائم تطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة الأقل تباعداً بين قناة و أخرى مجاورة [10] أي تطبيقات التجميع الكثيف DWDM حيث التباعد الطيفي يساوي 0.8 nm أو التجميع عالي الكثافة UDWDM وفيه يكون التباعد الطيفي 0.2 nm.



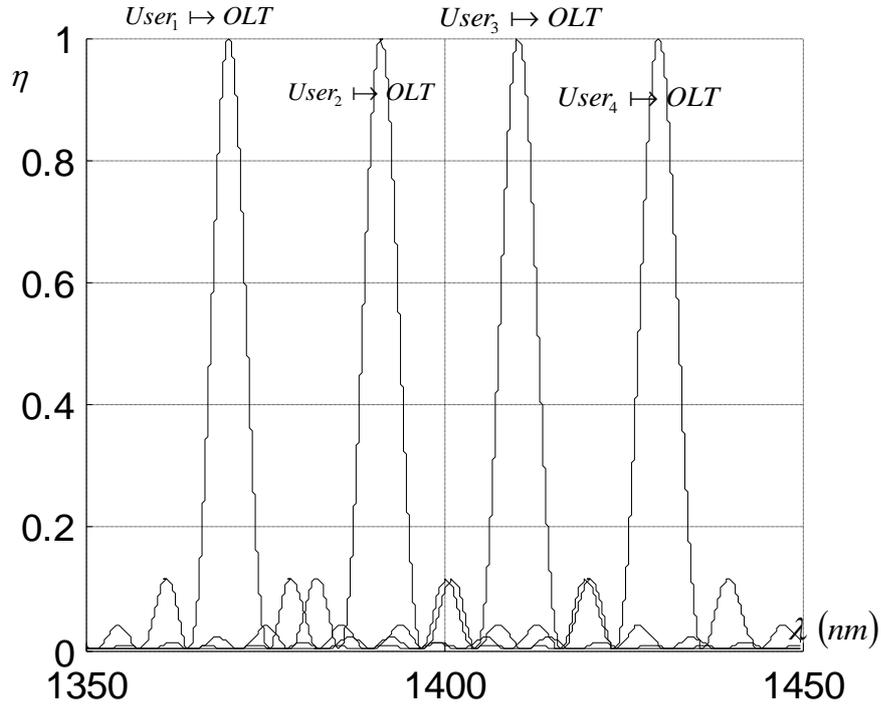
شكل(13): منحنى المردود من أجل أربع قنوات متجاورة ضمن النافذة C-Band من أجل تطبيقات شبكات النفاذ البصرية للوصلة الهابطة (شبكات Broadcast).

في النوع الثاني من الشبكات الضوئية أي شبكات WDM للوصلة الهابطة و TDM للوصلة الصاعدة (يتاح في هذه الحالة لجميع المشتركين في الشبكة الضوئية الإرسال على طول موجة ضوئية واحدة يقع ضمن مجال مختلف عن مجال الوصلة الهابطة). يتوضع المرشح المدروس في هذه الحالة في المقسم الضوئي و يجب أن يكون قادرا على انتقاء طول الموجة المتاح للمشارك إرسالها من أجل الوصلة الصاعدة . يبين الشكل (14) إمكانية المرشح على انتقاء طول موجة $\lambda = 1270 \text{ nm}$ (يقع ضمن المجال (O-Bands (1260–1360) عند تطبيق إشارة على مبدل الأمواج فوق الصوتية ترددها $f_a = 54.3 \text{ MHz}$.



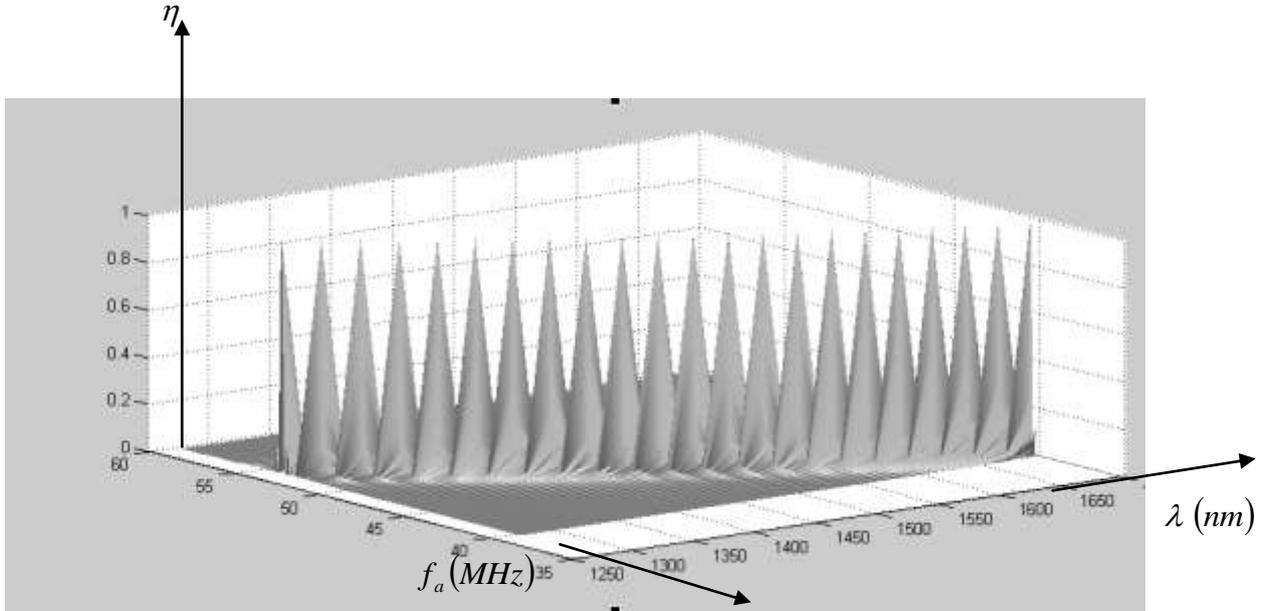
شكل(14): منحنى المردود للوصلة الهابطة ، يسمح في هذه الحالة لكل مشترك الإرسال على نفس طول الموجة و على المرشح الضوئي الذي يجب أن يتوضع في المقسم انتقاء طول الموجة المرسل.

ندرس أخيرا النوع الثالث من الشبكات الضوئية WDM-PDM للوصلة الهابطة و WDM للوصلة الصاعدة، يستخدم في هذا النوع النافذة C-Bands للوصلة الهابطة حيث أثبتنا فعالية استخدام المرشح المقترح من أجل ذلك و تخصص النافذة E-Bands و التي تشغل المجال 1360-1460 nm للوصلة الصاعدة ، يسمح في هذا النوع من شبكات النفاذ لكل مشترك الإرسال على طول موجة خاص به. ينبغي الآن على المرشح الضوئي المدروس (الذي يتوضع في المقسم الضوئي) أن يكون قابلاً أيضاً و دون أي تعديل للعمل ضمن نافذة المشترك ليتاح له العمل ضمن معدلات إرسال مماثلة للوصلة الهابطة. يبين الشكل (15) نتائج المحاكاة للوصلة الصاعدة لأربع مشتركين (يتحدد عددهم بعدد تفرعات القارن المستخدم) التي تثبت إمكانية استخدام المرشح الضوئي المدروس ضمن النافذة E-Bands و التي تشغل المجال الطيفي 1360-1460 nm.



شكل(15): منحني المردود للوصلة الصاعدة (لأربع مشتركين) ضمن النافذة E-Bands، يسمح في هذه الحالة لكل مشترك أن يرسل على طول موجة خاص به ضمن نافذة مستقلة عن نافذة الوصلة الهابطة .

يبين الشكل (16) كفاءة التداخل بتابعية تردد الموجة فوق الصوتية و طول الموجة الضوئية والذي يظهر بوضوح فعالية استخدام المرشح المدروس ضمن طيف من أطوال الموجة يغطي جميع المجالات الضوئية المستخدمة سواء من أجل الوصلة الهابطة أم الصاعدة.



شكل(16): منحنى مجسم لمردود التداخل

الاستنتاجات و التوصيات

- (1) اقترح البحث بنية مطورة لوحدة الشبكة الضوئية بحيث تصبح قادرة على معالجة قناتين معاً بدلاً من قناة واحدة (عبر تطبيق تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب). يسمح هذا الاقتراح بدوره بمضاعفة عدد القنوات الواصلة لكل مشترك في المقسم الضوئي دون إجراء أي تغيير في البنية التحتية بين المقسم الضوئي و المشترك.
 - (2) أثبت البحث فكرة تطوير بنية وحدة الشبكة الضوئية باستخدام برنامج مشهور للشبكات الضوئية OptiSystem7.0 .
 - (3) درس البحث و حدد مواصفات مرشح فوق صوتي-ضوئي صرف مناسب لتقنية التجميع المستخدمة ضمن مجالات الاتصالات الضوئية وفقاً لتوصيات اتحاد الاتصالات الدولي.
 - (4) أثبت البحث من خلال نتائج المحاكاة كما هو مبين بوضوح في الأشكال 12،13،14،،15،16 إمكانية استخدام المرشح الضوئي المقترح من أجل جميع حالات الشبكات الضوئية الواردة في مقدمة البحث و يعتبر ذلك مهماً.
 - (5) تم الحصول على عزل جيد بين القنوات المتجاورة مقداره 20 dB - وهي تحقق القيمة المطلوبة في المواصفات العامة لمرشح ضوئي في الدراسات النظرية و البحثية.
- يوصى بتنفيذ الدراسة مخبرياً و هو هدفنا التالي عبر الاتصال مع مخابر بحثية يتوفر فيها متطلبات البحث كما يمكن أن يوصى بدراسة المرشح الضوئي المقترح من أجل تباعد طيفي ملائم لتطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف DWDM و عالي الكثافة UDWDM .

المراجع

1. DOMANIC, L.; ROBERT, M.; DAVID .M.; BENN,T. ; POLINA , B. ; SEB,S. *Digital Coherent Receivers for Long-Reach Optical Access Networks*. Journal Of Light wave Technology. Vol. 31, N^o. 4,2013,609-620.
2. ACHYUT, K.D.; NILOY, K.D.; MASAHIKO, F. *WDM Technologies: Optical Networks*. 1st.ed ,Academic press Inc, USA,2004,315.
3. HAN.Y;LI.G. *Coherent Optical Communication using Multiple Input Output*. Optics Express. Vol. 13, N^o. 19,2005,7527-7534.
4. SADOT, S.; BOIMOVICH, E. *Tunable Optical Filters for Dense WDM Networks*, IEEE Communications Magazine. Vol. 36, N^o. 12,1998,50-55.
5. Chang,I.C. *Advanced Tunable Optical filter for fiber optic communication network*. Rapport technique final, 2000.
6. Chang,I.C. *Progress of acousto-optic tunable filter*. Proceedings, IEEE Ultrasonics Symposium. Vol. 2, N^o. 1,1996,819-825.
7. SAKKOUR, A.; KASTELIK, C. J. *Double Acousto – Optic Interaction in Paratellurite*. , Journal Of Optics A: Pure and Applied Optics. Vol. 2, N^o. 4,2002,315-319.
8. PARYGIN,V.N ; VERSHOUBSKIY.V.A ; RESVOV,Y.G. *Collinear and quasi-collinear diffraction of bounded beams in crystals: acousto-optic interaction for the example of paratellurite*. J. Opt. Pure Appl. Opt. Vol. 3, N^o. 4,2001,32-39.
9. صفور،عفيف. عباس،نغم. نمذجة و محاكاة مرشح ضوئي مولف فوق صوتي لتطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية. مجلة جامعة تشرين للدراسات و البحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية المجلد (37) العدد(2) 2015.
10. ISSA,H; SAKKOUR,A. *Double pass in acousto-optic tunable filter for telecommunication network*. Optical Engineering. Vol. 7, N^o. 5,2014,80-103.