

Suggesting a Mathematical Model for the Mechanism of Action of the Selective Wavelength-Switch WSS Based on MEMS Micro-Electromechanical Mirrors System to Improve the Performance of Flexible Optical Networks

Dr. Haitham AIRADWAN*

Dr. Hadeel ESSA**

Asala KHADDOUR***

(Received 26 / 9 / 2021. Accepted 22 / 2 / 2022)

□ ABSTRACT □

The use of the Internet and social networking applications required raising the efficiency of the network and increasing the capacity. The main orientation was the optical networks that form the physical basis of the World Wide Web.

Conventional optical networks suffer from limited bandwidth of the optical spectrum, in addition to increased energy consumption and increased cost of optical equipment. Therefore, these networks were developed to be able to select the bandwidth flexibly; It allowed the spectrum to be divided into a group of frequency slots with a width of 12.5 GHz, and thus we obtained variable bandwidth and fast access very effectively, so these networks are called flexible optical networks.

New research has focused on the development of flexible optical networks, either through the control plane or through the physical layer. In our research, we focused on improving the performance of these networks by developing optical nodes within the physical layer; The physical layer has a dynamic response to the variable bandwidth requirements of the host layer. Our study is based on proposing a mathematical model of the Wavelength Selective Switch (WSS) based on Micro-Electromechanical Mirrors System (MEMS) to get the best yield and the best selectivity by selecting the appropriate photonic elements.

Keywords: Elastic optical networks, Wavelength selective switch (WSS), Micro-Electromechanical Mirrors System (MEMS).

* Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy

**Assistant Professor, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: hadeelaliissa@tishreen.edu.sy

***PhD. Student, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: asala.khaddoor1990@gmail.com

اقترح نموذج رياضي لآلية عمل مبدل انتقائي لطول الموجة WSS المعتمد على نظام المرايا الكهروميكانيكية الميكروية MEMS لتحسين أداء الشبكات الضوئية المرنة

د. هيثم الرضوان*

د. هديل عيسى**

أصالة خضور***

(تاريخ الإيداع 26 / 9 / 2021. قُبِلَ للنشر في 22 / 2 / 2022)

□ ملخص □

تطلب استخدام الانترنت وتطبيقات التواصل الاجتماعي رفع كفاءة الشبكة وزيادة السعة. فكان التوجه الأساسي للشبكات الضوئية التي تشكل الأساس الفيزيائي للشبكة العنكبوتية العالمية. تعاني الشبكات الضوئية التقليدية من محدودية في عرض حزمة الطيف الضوئي، بالإضافة إلى زيادة استهلاك الطاقة وزيادة تكلفة التجهيزات الضوئية. لذلك تم تطوير هذه الشبكات لتكون قادرة على تحديد عرض الحزمة بشكل مرن؛ حيث سمحت بتقسيم الطيف إلى مجموعة حيزات ترددية بعرض 12.5 GHz، وبالتالي حصلنا على عرض حزمة متغير ووصول سريع بفعالية كبيرة، لذلك سميت هذه الشبكات بالشبكات الضوئية المرنة. اتجهت الأبحاث الجديدة إلى الاهتمام بتطوير الشبكات الضوئية المرنة سواءً من خلال مستوى التحكم أو من خلال الطبقة الفيزيائية. ركزنا في بحثنا على تحسين أداء هذه الشبكات من خلال تطوير العقد الضوئية الموجودة ضمن الطبقة الفيزيائية؛ حيث تتمتع الطبقة الفيزيائية باستجابة ديناميكية لمتطلبات عرض الحزمة المتغير من طبقة المضيف. تعتمد دراستنا على اقتراح نموذج رياضي لمبدل انتقائي لطول الموجة Wavelength Selective Switch (WSS) المعتمد على المرايا الكهروميكانيكية الميكروية Micro-Electromechanical Mirrors System (MEMS) للحصول على أفضل مردود وأفضل انتقائية من خلال انتقاء العناصر الضوئية المناسبة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الضوئية المرنة، المبدل الانتقائي لطول الموجة، نظام المرايا الكهروميكانيكية الميكروية.

*أستاذ ، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

البريد الإلكتروني: dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy

** مدرس، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

البريد الإلكتروني: dr.hadeelaliissa@tishreen.edu.sy

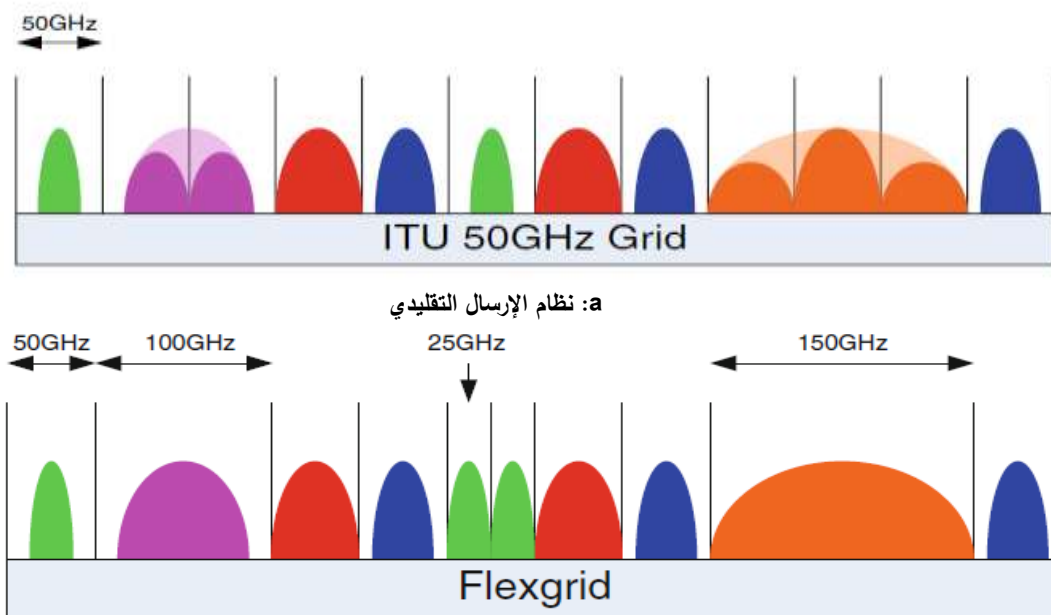
*** طالبة (دكتوراه)، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية.

البريد الإلكتروني: asala.khador1990@gmail.com

مقدمة:

تطورت شبكات الاتصالات بشكل سريع نتيجة النمو الهائل لحركة البيانات بسبب خدمات الوسائط المتعددة وزيادة مصادر هذه البيانات. تستخدم شبكات الإرسال تقنية التجميع بتقسيم الطول الموجي الكثيف Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) لدعم السعة العالية. تتكون هذه التقنية من 40 أو 80 قناة بتباعد ثابت 100GHz أو 50GHz، وتدعم معدلات إرسال تصل حتى 200Gbps، لذلك ستكون هناك حاجة إلى شبكات بصرية لدعم معدلات إرسال تصل حتى 1Tb / s.

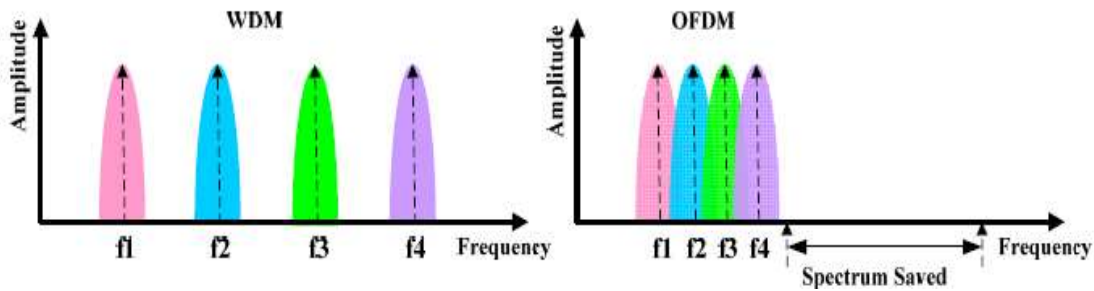
لسوء الحظ فإن تقنية الإرسال الضوئي التقليدية لديها أداء غير كافٍ لتلبي احتياجات الحركة المتزايدة بسبب محدودية عرض الحزمة. لذلك يتم التركيز الآن على تقنيات جديدة للشبكات البصرية عالية السرعة، وقد ظهرت الشبكات البصرية المرنة كأنظمة واحدة للاتصالات البصرية عالية السرعة، والتي حققت زيادة في فعالية الطيف الضوئي المستخدم؛ حيث سمحت الشبكات الضوئية المرنة بتقسيم الطيف إلى مجموعة من الحيزات الترددية (FS) frequency slots بعرض 12.5 GHz، وبالتالي سمحت باستخدام عرض حزمة متغير، ويبين الشكل (1) مقارنة بين نظامي الإرسال التقليدي ونظام إرسال الشبكات المرنة. [1-6]



الشكل (1): a: نظام الإرسال التقليدي، b: نظام إرسال الشبكات المرنة

سمحت الشبكات الضوئية المرنة بتغيير عرض الحزمة الديناميكي من خلال ضبط عدد من الحوامل الفرعية، وسمحت بتطبيق نماذج تعديل متعددة تبعاً لطول المسار ومعدل البيانات؛ حيث استخدمت تقنية التجميع بتقسيم التردد المتعامد Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)، وهي تقنية تعديل تم اعتمادها على نطاق واسع في العديد من أنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية عريضة الحزمة، وتتميز بقدرتها على نقل تدفق بيانات عالي السرعة باستخدام حوامل فرعية منخفضة السرعة متراكبة طيفياً. لذلك تقدم هذه التقنية مزايا فائقة لكفاءة الطيف العالية، والمناعة ضد التداخل بين الرموز، والتكيف مع ظروف قنوات الخوادم. كما حققت الشبكات المرنة توفير في استهلاك

الطاقة نتيجة إيقاف حوامل الـ OFDM غير المستخدمة، إذاً حققت زيادة في كفاءة الشبكة. ويبين الشكل (2) الفرق بين طيف تقنية OFDM وطيف تقنية WDM. [7-10]



الشكل (2): طيف إشارة OFDM وطيف إشارة WDM

أهمية البحث وأهدافه:

يأتي هذا العمل استجابة لمتطلبات زيادة سعة الشبكات الضوئية المرنة (EON) Elastic Optical Networks انطلاقاً من الطبقة الفيزيائية التي تتكون من مجموعة من العقد الضوئية، والتي تشكل بنيتها أساساً لتحقيق مرونة أكبر وكفاءة أفضل للطاقة مع الحفاظ على الموثوقية. يتناول هذا البحث دراسة وتصميم مبدل WSS المعتمد على مرآة MEMS لانتقاء طول الموجة المرغوب وذلك ضمن الحزمة C وبتباعد (12.5GHz)، والعمل على إيجاد النموذج الرياضي المناسب لاختيار القيم الأفضل لعمل هذا المبدل، والتي تحقق مردود عالي وانتقائية عالية تساعد في زيادة سعة الشبكة.

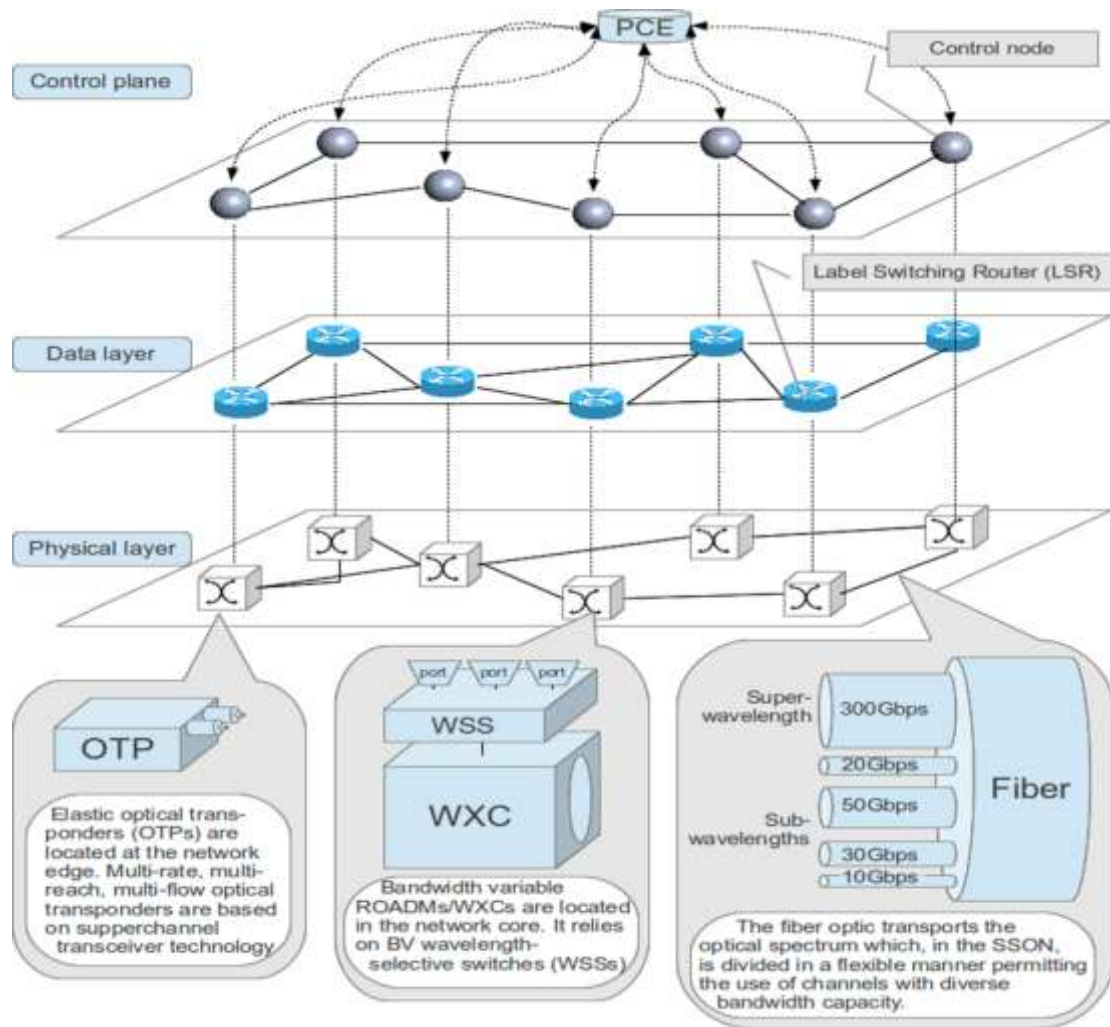
طرائق البحث ومواده:

1 مكونات الشبكة الضوئية المرنة:

يوضح الشكل (3) مكونات الشبكة الضوئية المرنة والتي تتكون من: [11]

1-1 مستوى التحكم control plane:

يؤمن مسار التحكم في الشبكات الضوئية المرنة مسار تلقائي من طرف إلى طرف end to end؛ حيث يولد عنصر حساب المسار (PCE) Path Computation Element آلية حساب مركزي، ويشرف على عملية التحكم بالتوزيع وإرسال الإشارات. هناك عدة متطلبات لتحديد عمل مستوى التحكم علينا التقيد بها، وهي التوجيه وتخصيص الطيف، واختيار صيغة التعديل المناسبة لطول المسار، وقابلية التكيف مع تغير الزمن، وتنفيذ استراتيجيات الاستمرارية مثل تأمين مسارات الحماية أو الاستعادة، وضمان جودة الخدمة والتي تشمل: التوافرية والاستمرارية وجودة الإرسال ومراقبة معدل خطأ البت ونسبة الإشارة إلى الضجيج.



الشكل (3): مكونات الشبكة الضوئية المرنة

2-1 طبقة البيانات Data layer:

تتكون من مجموعة موجهاة تقوم بعملية التبدل فيما بينها، ونقل إشارات التحكم بين مستوى التحكم وأجهزة الطبقة الفيزيائية.

3-1 الطبقة الفيزيائية Physical layer:

تتكون الطبقة الفيزيائية من:

✚ مرسلات ومستقبلات ضوئية مرنة (OTP): Elastic Optical Trasponder

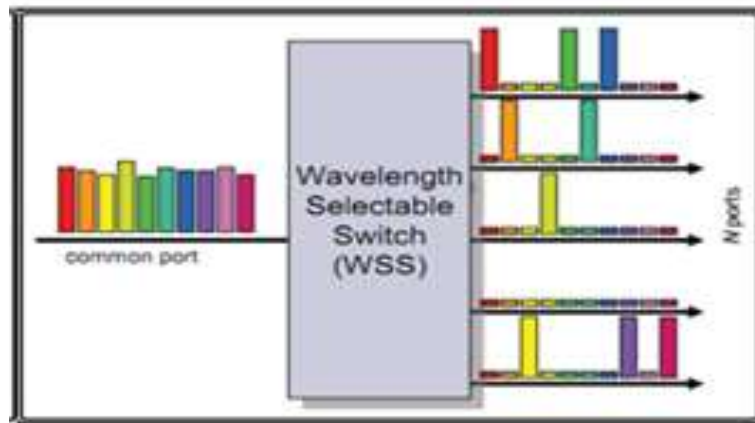
تتوضع على حواف الشبكة، وتعتمد على تقنية إرسال واستقبال القناة الفائقة super channel، وتعرف القناة الفائقة بأنها مجموعة من القنوات الفرعية sub channel التي تصطف مع بعضها البعض لتحقيق كفاءة نقل عالية في الشبكة، كما تعتمد سعتها على عدد القنوات الموجودة وسعة كل منها. [11]

✚ العقد الضوئية المتوضعة في قلب الشبكة:

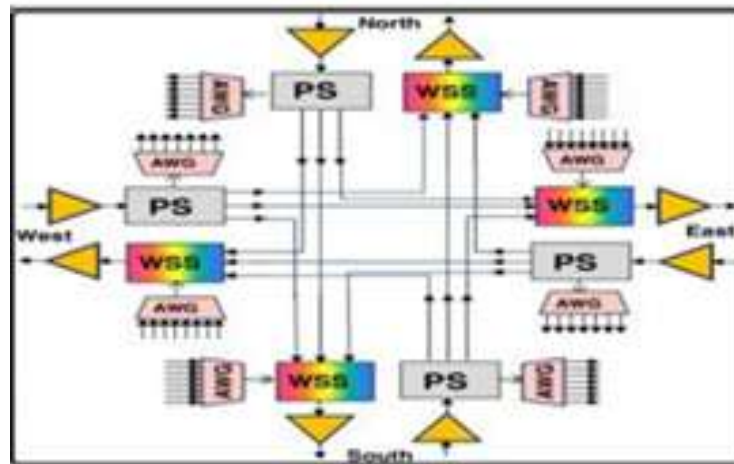
تتألف هذه العقد من:

- مجمع إضافة وحذف ضوئي قابل لإعادة التكوين Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer (ROADM)

هو جهاز حساس لأطوال الأمواج الضوئية المختلفة يقوم بإضافة أو حذف طول الموجة، وتبديل الطيف من الدخل إلى الخرج بين عقد الشبكة لاستغلال كامل عرض الحزمة، ويعتمد في بنيته الأساسية على مبدل انتقائي لطول الموجة Wavelength Selective Switching (WSS)، ويبين الشكل (4) مبدأ عمل تقنية ROADM المعتمدة على مبدلات WSS. [12-13]



(a) مبدأ عمل WSS

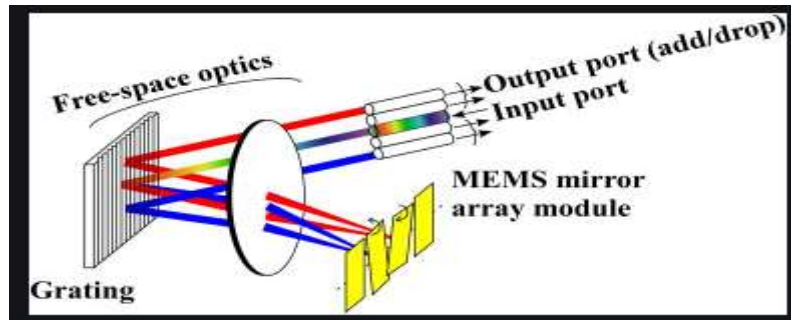


(b) تصميم ROADM

الشكل (4): (a) مبدأ عمل WSS ، (b) تصميم ROADM

■ المبدل الانتقائي لطول الموجة WSS:

إن التكنولوجيا التي تدعم الشبكات المرنة هي تقنية تبديل طول الموجة الانتقائي؛ حيث يحوي مبدل WSS على مصفوفة ضوئية لها دخل واحد وخرج متعدد. يفصل هذا المبدل الضوء الوارد إلى مجموعة من الأطوال الموجية، ويقوم بانتقاء طول الموجة المرغوب عن طريق حرفه عن المسار الضوئي الأصلي، ومن ثم إضافته إلى منفذ آخر من مصفوفة الألياف الضوئية، ويبين الشكل (5) مبدأ عمل مبدل WSS. [14-16]

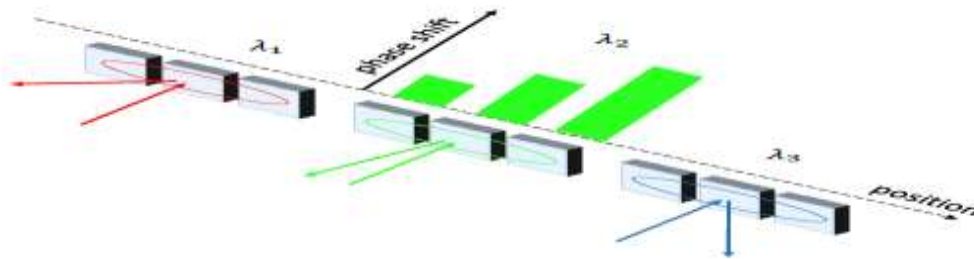


الشكل (5): مبدأ عمل مبدل WSS

❖ أنواع المبدلات المستخدمة في تقنية الـ WSS:

(1) تقنية الكريستال السائل المعتمد على السيليكون (Liquid Crystal on Silicon (LCOS):

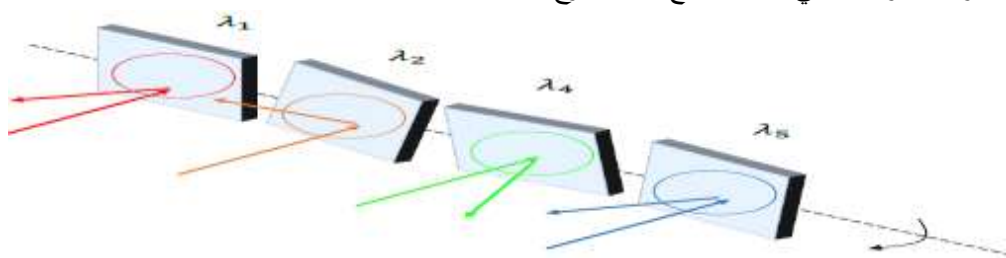
يغير مبدل LCOS اتجاه الشعاع الوارد عن طريق إضافة انزياح طوري إلى الحزمة، مما يؤدي إلى إعادة توجيهها إلى المنفذ المطلوب. ويبين الشكل (6) مبدل LCOS بسيط؛ حيث يتم توسيع كل طول موجة إلى ثلاثة أقسام وبنزاحات طور مختلفة تؤدي إلى زوايا انعكاس مختلفة. [16]



الشكل (6): مبدأ تشغيل مبدلات LCOS

(2) المرايا الكهروميكانيكية الميكروية (MEMS) Micro-Electro Mechanical System:

تعتبر واحدة من أهم تقنيات التبديل الضوئي، وتعطي المبدلات الضوئية المعتمدة على أنظمة الـ MEMS خسارة منخفضة، واستهلاك طاقة منخفض، وتداخل منخفض، وحجم صغير، وسرعة كافية. يعتمد مبدل MEMS على مجموعة من المرايا الميكروية التي تتحرك عند تحفيزها بواسطة إشارة كهربائية، ويوضح الشكل (7) مواضع المرايا المختلفة التي تؤدي إلى اتجاهات تبديل مختلفة. يتم تركيز كل حزمة إلى مرآة ميكروية واحدة تدور بزوايا معينة مما يؤدي إلى تغيير المسار الضوئي حسب موقع منفذ الخرج المطلوب. [16]

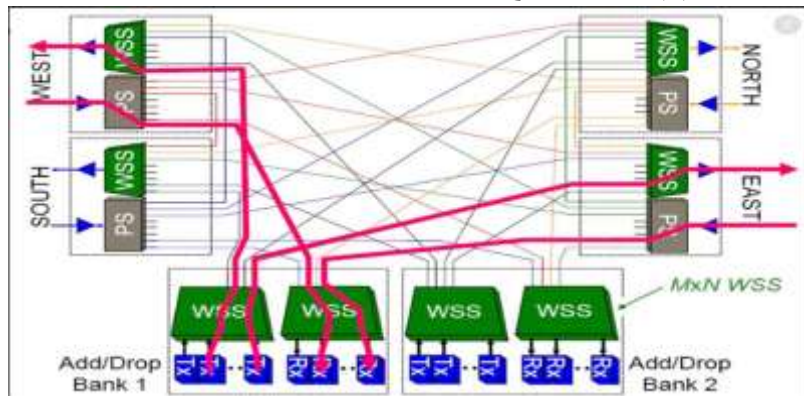


الشكل (7): مبدأ تشغيل مرايا MEMS

▪ وصلة التقاطع الضوئية (Optical Cross Connect (OXC):

تستخدم لتخصيص مسار اتصال متقاطع مع طيف محدد من المرسل وحتى الهدف، وهنا يتم استخدام واجهة إلكترونية لتبديل الدخل إلى منافذ الخرج المطلوبة. والمكونات الرئيسية لـ (OXC) التي تشكل عُقد الشبكات هي المبدلات

الانتقائية للطول الموجي WSS، ومقسمات الطاقة، والقارنات وشبكات الدليل الموجي المصنوعي لتجميع وتفكيك الأطوال الموجية. يبين الشكل (8) وصلة التقاطع الضوئية OXC [17]



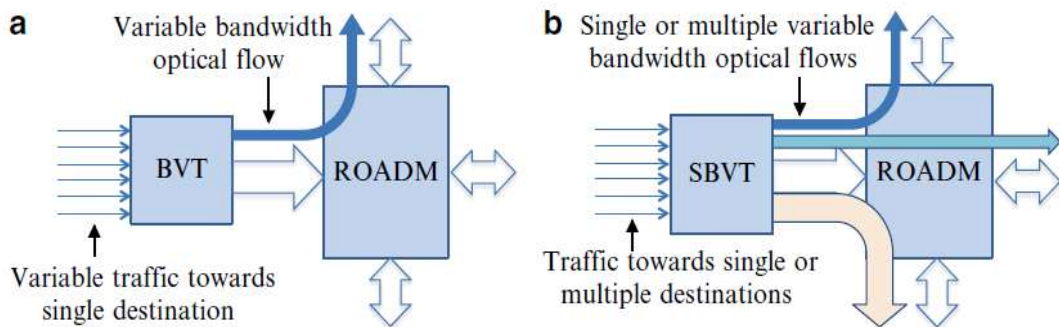
الشكل (8): وصلة التقاطع الضوئية OXC

▪ مرسل ومستقبل متغير عرض الحزمة (BVT) Bandwidth Variable Transponder:

هي عبارة عن مرسلات ومستقبلات متغيرة عرض الحزمة تستخدم لتوليد الموارد الطيفية عن طريق ضبط البارامترات المختلفة، كما تستخدم نماذج تعديل مختلفة وتقوم باختيار صيغة التعديل المناسبة لطول المسار، ونستفيد منها بتجنب الحاجة لوجود أكثر من مرسل ومستقبل لتأدية الطلبات المتغيرة. (أي أن مرسل واحد يمكنه أن يرسل عدة إشارات مختلفة وكذلك مستقبل واحد يمكنه أن يستقبل هذه الإشارات)، كما تعد واجهة أمامية لROADM. [17-22]

▪ مرسل ومستقبل مرن متغير عرض الحزمة (SBVT) Sliceable Bandwidth Variable Transponder:

يقوم بتوليد مجموعة من الحوامل الفرعية بحيث يمكن تجميعها لتشكيل القناة الفائقة أو يمكن فصلها وإدارتها نحو منافذ الخرج المختلفة (مثل المسارات أو الوجهات). ويدعم SBVT معدلات بت مختلفة إما بتغيير عدد الحوامل الفرعية المستخدمة أو بتغيير معدل البت لكل حامل فرعي. يبين الشكل (9) الفرق بين بنية كل من BVT و SBVT [17-22].



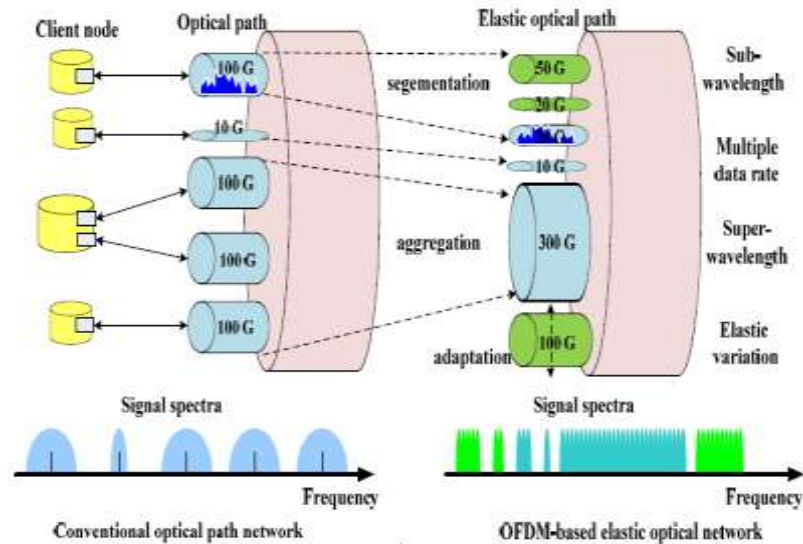
الشكل (9): a: بنية BVT ، b: بنية SBVT

✚ الألياف الضوئية:

تصل الألياف الضوئية بين العقد الموجودة في قلب الشبكة والعقد الموجودة على حافة الشبكة؛ حيث يتم تقسيم سعة الليف المرن إلى مجموعة ساعات متغيرة حسب الطلب، وتتميز الألياف المرنة بالخصائص التالية:

- القناة الفرعية (sub-wavelength): يتم تقسيم سعة القناة الثابتة (Segmentation) إلى مجموعة من الساعات المتغيرة والتي تخدم عدة مستخدمين بدلاً من مستخدم واحد.

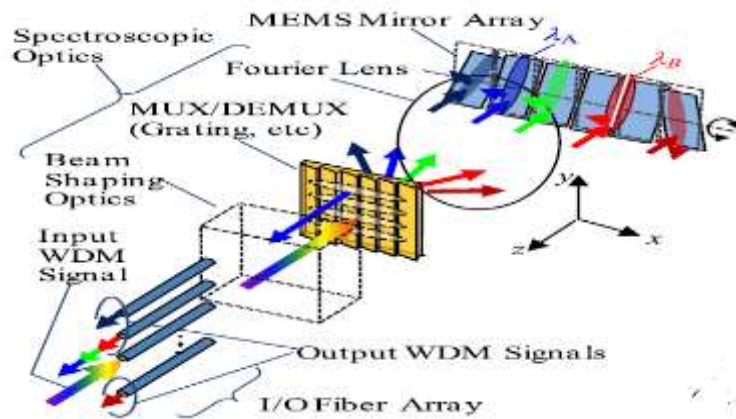
- القناة الفائقة (Super-wavelength): يتم تجميع عدة قنوات (Aggregation) لتخدم مستخدم واحد حسب الطلب. يوضح الشكل (10) تخصيص الطيف ضمن الليف في الشبكات التقليدية والشبكات المرنة التي تعتمد على تقنية OFDM. [22].



الشكل (10): يمثل تخصيص الطيف ضمن الليف في الشبكات التقليدية والشبكات الضوئية المرنة

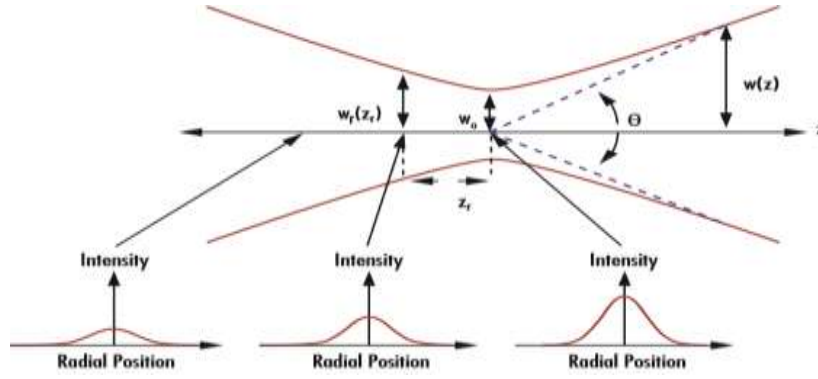
النتائج والمناقشة:

تستخدم تقنية WSS مصفوفة ضوئية بمجموعة مداخل ومخارج، وسنعمل في دراستنا على مصفوفة بدخل وحيد ومجموعة مخارج المبينة في الشكل (11).



الشكل (11): مبدل WSS معتمد على مرايا MEMS

تخرج حزمة غاوس من ليف أحادي النمط (SMF) متوضع في مركز المصفوفة، وهي حزمة كهرومغناطيسية أحادية اللون غالباً تكون حزمة ليزرية تركز في بقعة صغيرة على العناصر الضوئية مثل العدسات والمرايا، ويبين الشكل (12) انتشار حزمة غاوس وتغير منحنى الكثافة على محور الانتشار. [23]



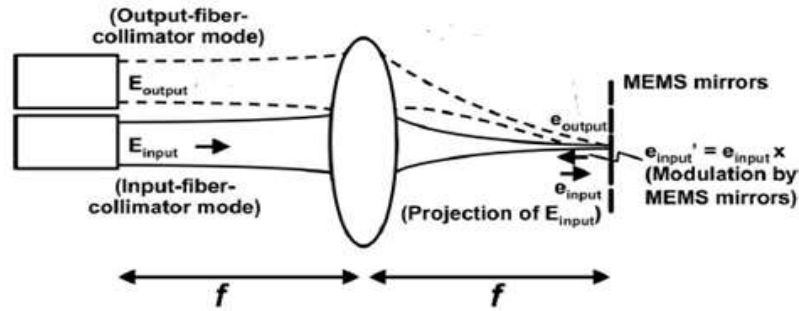
الشكل (12) : حزمة غاوس الليزرية

ويعطى الحقل الناتج عن توزيع حزمة غاوس بالصيغة التالية:

$$E(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{x^2}{(\omega_x/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_y/2)^2} \right) \right] \quad (1)$$

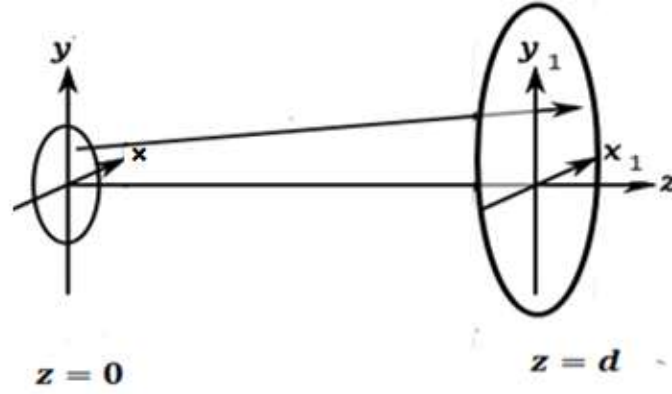
(ω_x, ω_y) : قطرا حزمة غاوس في الاتجاهين (x, y) .

تسقط حزمة غاوس على شبكة إرسال (transmission grating)، وتنعكس عنها بزوايا مختلفة لتسقط على عدسة فورييه، حيث يتوضع كل من الشبكة ومصفوفة مرايا MEMS على جانبي عدسة فورييه، وذلك على مسافة مساوية للبعد المحرق للعدسة (f) ، وتعمل عدسة فورييه على تصغير البقعة الضوئية وتركيزها على مرآة MEMS، كما هو مبين في الشكل (13). [24].



الشكل (13): توضيح توزيع حقل حزمة غاوس قبل عدسة فورييه وبعد العدسة على مرايا MEMS

نحسب قيمة الحقل قبل عدسة فورييه مباشرة بالاعتماد على تكامل حيود فرنيل (Fresnel diffraction integral) حيث تمثل (x, y) إحداثيات حقل حزمة غاوس، بينما تمثل (x_1, y_1) إحداثيات صورة حقل حزمة غاوس على الوجه الأول للعدسة وذلك على مسافة انتشار $(z=d)$ كما هو مبين في الشكل (14): [25].



الشكل (14): توضيح إحداثيات حقل حزمة غاوس وإحداثيات صورة حقل حزمة غاوس على العدسة

$$E_{\text{befor lens}}(x_1, y_1) = \iint E(x, y) \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2}{\lambda d} \right) \right] dx dy$$

$$E_{\text{befor lens}}(x_1, y_1) = \iint \exp \left[- \left(\frac{x^2}{(\omega_x/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_y/2)^2} \right) \right] \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2}{\lambda d} \right) \right] dx dy \quad (2)$$

d : المسافة بين مركز انتشار الحزمة والعدسة.

λ : طول الموجة المرسل.

ملاحظة: التكامل الموجود في العلاقة (2) هو تكامل غير محدد، يتم تحديد قيم تكامل تداخل الحقل بعد تركيز حزمة غاوس على مرآة MEMS وذلك عند حساب قيمة طيف الإرسال.

يعطى تابع العدسة بالعلاقة التالية [26][27]:

$$t(x, y) = \exp \left(\frac{j\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2) \right) \quad (3)$$

نحسب قيمة الحقل بعد عدسة فورييه مباشرة:

$$E_{\text{after lens}}(x_1, y_1) = E_{\text{befor lens}}(x_1, y_1) \cdot t(x, y)$$

$$E_{\text{after lens}}(x_1, y_1) = \left[\iint \exp \left[- \left(\frac{x^2}{(\omega_x/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_y/2)^2} \right) \right] \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_1-x)^2 + (y_1-y)^2}{\lambda d} \right) \right] dx dy \right] \cdot \exp \left(\frac{j\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2) \right) \quad (4)$$

تسبب شبكة الإرسال الانزياح في حزمة غاوس على مرآة MEMS يحدده البعد المحرقى لعدسة فورييه وطول الموجة المرسل يعطى بالعلاقة التالية [28]:

$$x_f(\lambda) = \frac{m}{\lambda} f(\lambda - \lambda_{\text{center}}) \quad (5)$$

m : عدد صحيح يعبر عن مجموعة أنماط الحزمة المنعكسة عن الشبكة.

Λ : فترة الشبكة (البعد بين مركزي خطين في الشبكة).

λ_{center} : طول الموجة المركزي.

نحسب قيمة الحقل عند مرآة MEMS المتوضعة في البعد المحرقى لعدسة فورييه بالاعتماد على تكامل حيود فريزل، مع الأخذ بعين الاعتبار الانزياح الذي تسببه شبكة الإرسال لحزمة غاوس على مرآة MEMS:

ملاحظة: كما ذكرنا في العلاقة (2) تحدد قيم حدود تكامل تداخل الحقل عند انعكاسه عن مرآة MEMS.

$$E_{\text{MEMS}}(x_2, y_2) = \iint E_{\text{after lens}, x_f(\lambda)}(x_1, y_1) \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}{\lambda f} \right) \right] dx_1 dy_1$$

$$E_{\text{MEMS}}(x_2, y_2) = \left\{ \iint \left\{ \left[\iint \exp \left[- \left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_x/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_y/2)^2} \right) \right] \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}{\lambda f} \right) \right] dx dy \right] \exp \left(\frac{j\pi}{\lambda f} (x_1^2 + y_1^2) \right) \right\} \exp \left[j\pi \left(\frac{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}{\lambda f} \right) \right] dx_1 dy_1 \right.$$

$$E_{MEMS}(x_2, y_2) = \frac{jk}{2\pi f} \exp(-jk(d+f)) \exp\left(-\frac{jk}{2f}\left(1-\frac{d}{f}\right)(x_1^2 + y_1^2)\right) \iint \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_x/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_y/2)^2}\right)\right] \exp\left(-j2\pi\frac{xx_2+yy_2}{\lambda f}\right) dx dy \quad (6)$$

بما أن شبكة الإرسال متوضعة على مسافة مساوية للبعد المحرقى فإن (d=f)، ونأخذ قيمة $\omega_x = \omega_y = \omega$ وبالتالي يصبح الحقل عند مرآة MEMS: $40\mu m$

$$E_{MEMS}(x_2, y_2) = \frac{jk}{2\pi f} \exp(-jk(2f)) \iint \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega/2)^2}\right)\right] \exp(-j2\pi\frac{xx_2+yy_2}{\lambda f}) dx dy \quad (7)$$

يمثل الجزء $\iint \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega/2)^2}\right)\right] \exp(-j2\pi\frac{xx_2+yy_2}{\lambda f}) dx dy$ من المعادلة (7) صيغة تحويل فورييه للتابع $E_1(x, y)$ (حيث أن تابع تحويل فورييه لحزمة غاوس هو حزمة غاوس): [27]

$$F[E_1(x, y)] \Big|_{k_x=\frac{k(x-x_f(\lambda))}{f}, k_y=\frac{ky}{f}} = \iint \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega/2)^2}\right)\right] \exp(-j2\pi\frac{xx_2+yy_2}{\lambda f}) dx dy$$

$$F[E_1(x, y)] \Big|_{k_x=\frac{k(x-x_f(\lambda))}{f}, k_y=\frac{ky}{f}} = \pi\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{k(x-x_f(\lambda))^2\left(\frac{\omega}{2}\right)^2}{4} + \frac{k_y^2\left(\frac{\omega}{2}\right)^2}{4}\right)\right] \quad (8)$$

نعوض العلاقة (8) في العلاقة (7):

$$E_{MEMS}(x_2, y_2) = \frac{j}{\lambda f} \exp(-jk(2f)) \pi\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{k(x-x_f(\lambda))^2\left(\frac{\omega}{2}\right)^2}{4} + \frac{k_y^2\left(\frac{\omega}{2}\right)^2}{4}\right)\right] \quad (9)$$

تبلغ قيمة نصف قطر الحزمة على مرآة MEMS:

$$\frac{\omega_m}{2} = \frac{\lambda f}{\pi\left(\frac{\omega}{2}\right)^2} \quad (10)$$

نعوض العلاقة (10) في العلاقة (9) لنحصل على قيمة الحقل عند مرآة MEMS:

$$E_{MEMS}(x_2, y_2) = \frac{j}{\lambda f} \exp(-jk(2f)) \pi\left(\frac{\omega}{2}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_m/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_m/2)^2}\right)\right]$$

$$E_{MEMS}(x_2, y_2) = \frac{j\left(\frac{\omega}{2}\right)}{\omega_m} \exp(-jk(2f)) \exp\left[-\left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_m/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_m/2)^2}\right)\right] \quad (11)$$

ويتم اختيار المرايا بزواوية مسح ضوئية $\theta_{optical}$ ترتبط مع عدد منافذ خرج المصفوفة بالعلاقة التالية: [24]

$$N = \frac{f}{D_c} \tan \theta_{optical} \quad (12)$$

D_c : المسافة بين مراكز منافذ المصفوفة.

يتم اختيار عرض مرآة MEMS (U) بحيث تكون أكبر من قطر الحزمة بالإضافة إلى توضع البقعة الضوئية في مركز المرآة وذلك لضمان انعدام الضياع النافذ بين مرآتين متجاورتين، ويتم اختيارها وفق العلاقة التالية [28]:

$$U = \frac{m}{\lambda} f \frac{\Delta v}{c} \lambda_{center}^2 \quad (13)$$

Δv : الدقة الترددية للشبكات المرنة وتساوي قيمتها 12.5GHz.

اعتمدنا على برمجة الماتلاب في هذا البحث للتمثيل رياضياً لطيف مبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS (لا يوجد أي صناديق جاهزة لتمثيل مثل هذه المبدلات، لذلك قمنا بتصميم المعادلات الرياضية التي تمثل آلية انتشار حزمة غاوس ضمن المبدل وبرمجتها لإظهار النتائج).

تم تصميم نظام WSS بالاعتماد على البارامترات والمعادلات التي ذكرناها سابقاً، وتم حساب طيف الإرسال لهذا المبدل، وخسارة الدخل.

بدايةً تم تحليل انتشار الحزمة لحساب طيف الإرسال، وبعدها تم حساب المردود وانتقائية الحزمة، وذلك ضمن الحزمة C، وعند طول موجة مركزي ($\lambda_{center} = 1547.5nm$) ويعرض حزمة (1547nm-1548nm) 125GHz، وقيمة ($\frac{m}{\lambda} = 2.5\mu m^{-1}$) للشبكة. وفي النهاية تم حساب كفاءة الاقتران التي تحدد البعد المناسب بين المنافذ لتحقيق أقل خسارة عزل ممكنة.

تم حساب طيف الإرسال للمبدل WSS ($S_{x,y}(\lambda)$) بالاعتماد على تكامل الحقل عند مرآة MEMS:

$$S_{x,y}(\lambda) = \frac{\left| \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-U/2}^{U/2} (E_{MEMS}(x_2, y_2))^2 dx \right|^2}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} |E(x,y)|^2 dx \right]^2} \quad (14)$$

L: طول مرآة MEMS.

نحسب قيمة التكامل:

$$\begin{aligned} I &= a \times a = \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} |E(x,y)|^2 dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} \left| \exp \left[- \left(\frac{2x^2}{(\omega/2)^2} + \frac{2y^2}{(\omega/2)^2} \right) \right] \right|^2 dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-8 \left(\frac{x^2+y^2}{\omega^2} \right) \right] dx \end{aligned} \quad (15)$$

نقوم بحل هذا التكامل عن طريق تحويل الإحداثيات الديكارية (x, y) إلى الإحداثيات القطبية (r, θ):

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$$

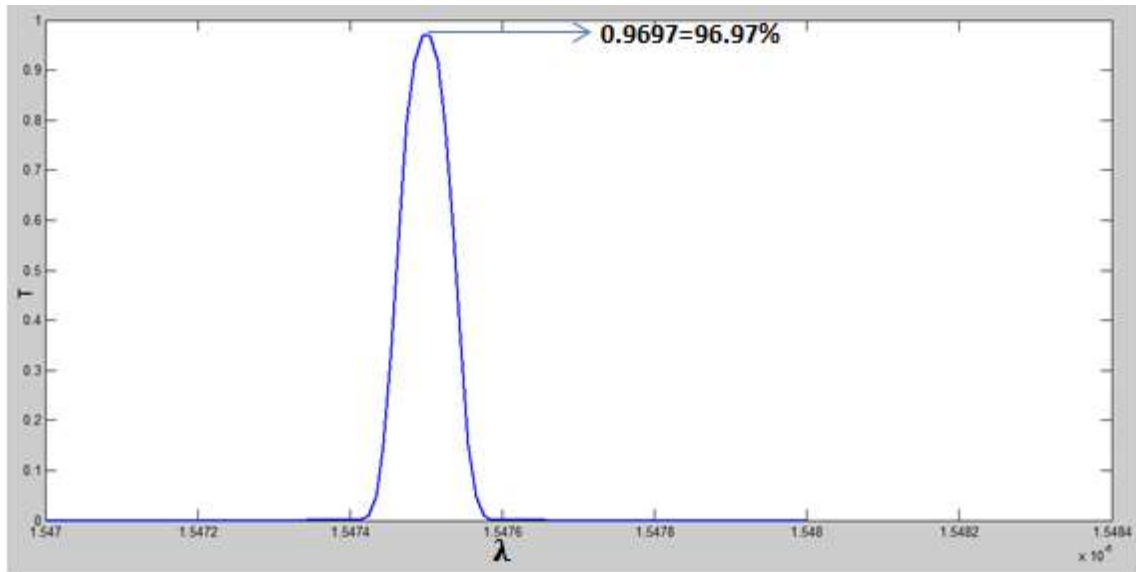
نعوض في العلاقة (15):

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} dr r \exp \left[- \left(\frac{r^2}{\frac{\omega^2}{8}} \right) \right] \\ &= 2\pi \int_0^\infty dr \cdot \frac{d}{dr} \left[- \frac{\omega^2}{16} \exp \left[- \left(\frac{r^2}{\frac{\omega^2}{8}} \right) \right] \right] \\ &= 2\pi \left[- \frac{\omega^2}{8} \exp \left[- \left(\frac{r^2}{\frac{\omega^2}{8}} \right) \right] \right]_0^\infty = \pi \frac{\omega^2}{8} \end{aligned} \quad (16)$$

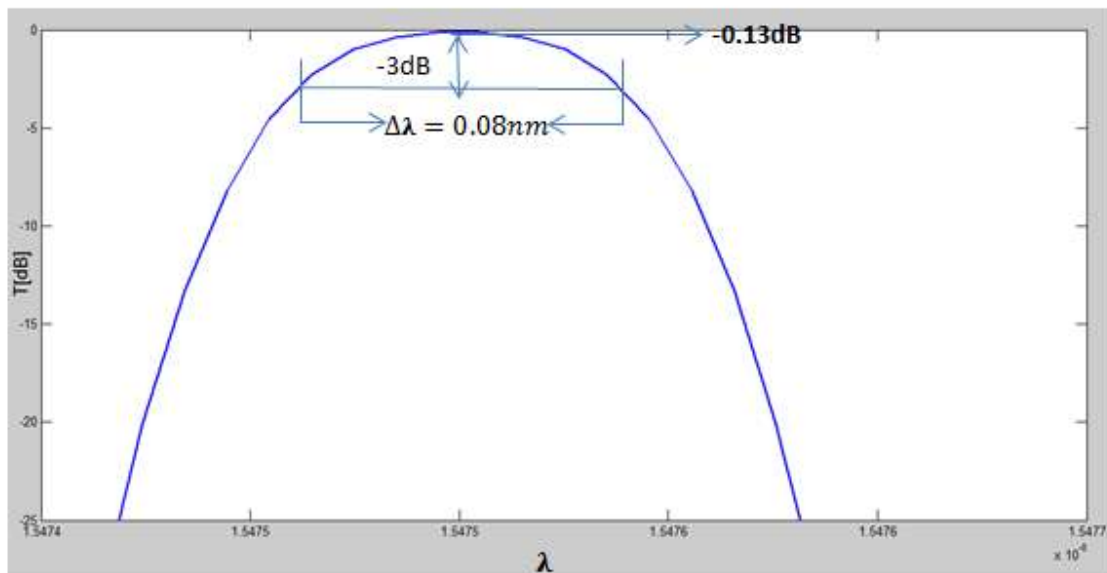
بالرجوع إلى المعادلة (14) والتعويض فيها:

$$\begin{aligned} S_{x,y}(\lambda) &= \frac{\left| \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-U/2}^{U/2} (E_{MEMS}(x_2, y_2))^2 dx \right|^2}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} |E(x,y)|^2 dx \right]^2} \\ &= \frac{\left| \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-U/2}^{U/2} \left(\frac{j(\omega)}{\omega_m} \exp(-jk(2f)) \exp \left[- \left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_m/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_m/2)^2} \right) \right] \right) dx dy \right|^2}{\left[\pi \frac{\omega^2}{8} \right]^2} \\ &= \left(\frac{8}{\pi \omega_m^2} \right)^2 \left| \int_{-L/2}^{L/2} dy \int_{-U/2}^{U/2} \left(j \exp(-jk(2f)) \exp \left[- \left(\frac{(x-x_f(\lambda))^2}{(\omega_m/2)^2} + \frac{y^2}{(\omega_m/2)^2} \right) \right] \right) dx \right|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

يبين الشكل (15) منحنى الإرسال لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS بدلالة طول الموجة؛ حيث يحسب المردود عند النقطة المقابلة لطول الموجة المركزي، وهي نقطة الذروة من منحنى الإرسال:



الشكل (15): منحنى الإرسال (T) لمبدل WSS المعتمد على مرآة MEMS بدلالة طول الموجة (λ)



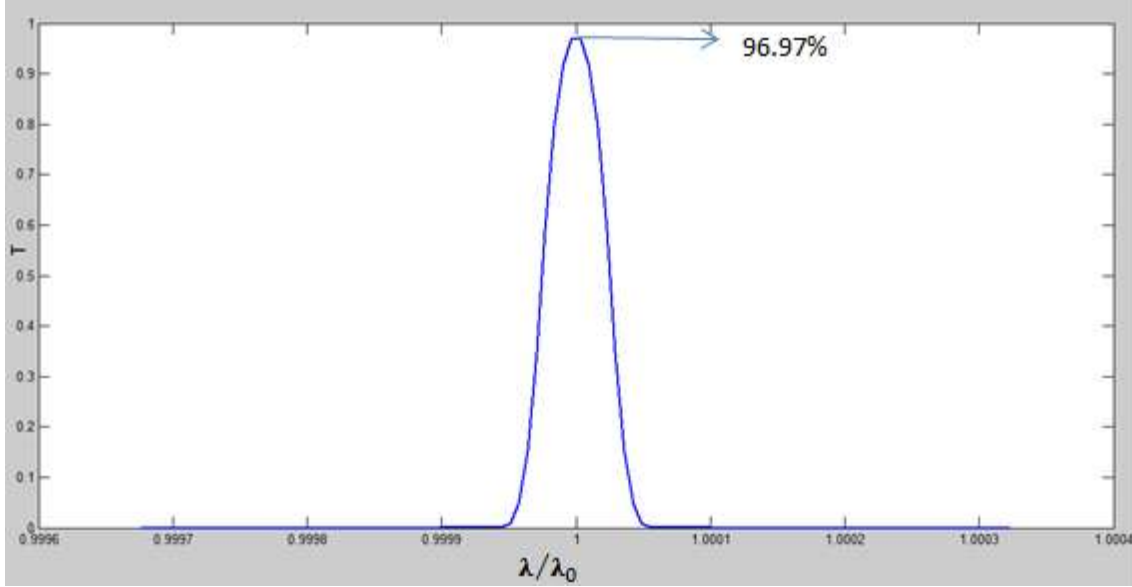
الشكل (16): منحنى الإرسال بالديسبل (T(dB)) لمبدل WSS المعتمد على مرآة MEMS بدلالة طول الموجة (λ)

تم الحصول في هذا التصميم على مردود تصل قيمته إلى (97%) كما هو مبين في الشكل (15)، وهي قيمة ممتازة لأداء المبدل، ونلاحظ من الشكل (16) الذي يوضح منحنى الإرسال مقدراً بالديسبل للمبدل بدلالة طول الموجة أن قيمة خسارة المبدل ضمن الحزمة هي (0.13dB) وتعتبر هذه القيمة صغيرة.

نحسب انتقائية الحزمة وتساوي عرض الحزمة عند مستوى نصف الاستطاعة (-3dB) كما هو موضح في الشكل (16):

$$\Delta\lambda = 0.08\text{nm}$$

نلاحظ أن قيمة انتقائية المبدل عالية جداً مما يسمح بزيادة عدد قنوات الشبكة، وبالتالي يزيد من سعتها ضمن نفس المجال المسموح من الطيف، وبالتالي تكتسب الشبكة مرونة طيف عالية مع مردود كبير وتداخل صغير.



الشكل (17): منحنى الإرسال لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS القياسي

يمثل المنحني المبين بالشكل (17) معامل الإرسال لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS القياسي بدلالة (λ/λ_0) ، من الواضح أن ذروة المنحني التي توافق مردود قيمته (97%) وخسارة قيمتها (0.13dB) تقابل قيمة الواحد $(\lambda/\lambda_0 = 1)$ ، أي ينطبق طول الموجة المرسله المقابل لهذه الذروة مع طول الموجة المركزي المعتمد في هذا التصميم. سندرس الآن بارامتر هام لتصميم WSS وهو كفاءة الاقتران لكل منفذ من منافذ الخرج، والذي يحدد خسارة العزل لهذه المنافذ، وتتعلق قيمته بأبعاد مصفوفة الألياف وبقية نصف قطر حزمة غاوس. سنقوم بحساب المسافة بين منفذين متتاليين من المصفوفة بدلالة نصف قطر حزمة غاوس لنحصل على خسارة عزل مناسبة لعمل المبدل.

لتنفيذ هذا العمل تم تحليل انتشار الحزمة في اتجاه توضع مصفوفة الألياف. تخرج الحزمة من منفذ الدخل الذي يتوضع في مركز المصفوفة (port0)، وتكون قيمة توزع الحقل عند مرآة MEMS كما وردت في المرجع [29]:

$$E_{in}(x) = \left(\frac{2}{\pi\omega_{xm}^2}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_{xm}^2}\right] = \left(\frac{2\pi\omega_x^2}{\lambda^2 f^2}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{\omega_x^2 x^2}{(\lambda f/\pi)^2}\right] \quad (18)$$

ملاحظة: يمكن الوصول إلى العلاقة السابقة بتتبع مسار الإشارة ضمن المبدل المدروس، وحساب الحقل الناتج بعد مرور الإشارة من كل مكون منه بالاعتماد على صيغة حيود فريزل.

تتعرض الحزمة عن مرآة MEMS بفرق طور ناتج عن دوران المرآة باتجاه منفذ الخرج δ ونعتبره منفذ قياسي لحساب خسارة العزل:

$$\tan[\theta] = \frac{\delta}{f} \quad (19)$$

تكون قيمة الحقل المقابلة عند كل منفذ خرج δ :

$$E_{out\delta}(x) = E_{in}(x)\exp[-i\varphi(x, \delta)] \quad (20)$$

$$\varphi(x, \delta) = \frac{2\pi}{\lambda} \tan[\theta] x = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta}{f} x \quad (21)$$

تتعرض الحزمة عن مرآة MEMS بفرق طور باتجاه مصفوفة الألياف على بعد δ من مركز المصفوفة:

$$\exp[-i\varphi(x, \delta)] = \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta}{f} x\right] \quad (22)$$

تصبح قيمة الحقل المقابلة عند الموقع δ :

$$E_{out\delta}(x) = E_{in}(x)\exp[-i\varphi(x, \delta)]$$

$$E_{out\delta}(x) = E_{in}(x)\exp\left[-i\frac{2\pi\delta}{\lambda}x\right] \quad (23)$$

نحصل على قيمة تداخل مساوية لقيمة الواحد عندما $(\delta = \delta')$ ، نحسب كفاءة الاقتران عندما $(\delta \neq \delta')$:

$$\eta = \int E_{out\delta}(x) E_{out\delta'}(x)^* dx$$

$$\eta = \int \left(\frac{2}{\pi\omega_{xm}^2}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_{xm}^2}\right] \exp\left[-i\frac{2\pi\delta}{\lambda}x\right] \left(\frac{2}{\pi\omega_{xm}^2}\right)^{\frac{1}{4}} \exp\left[-\frac{x^2}{\omega_{xm}^2}\right] \exp\left[i\frac{2\pi\delta'}{\lambda}x\right] dx$$

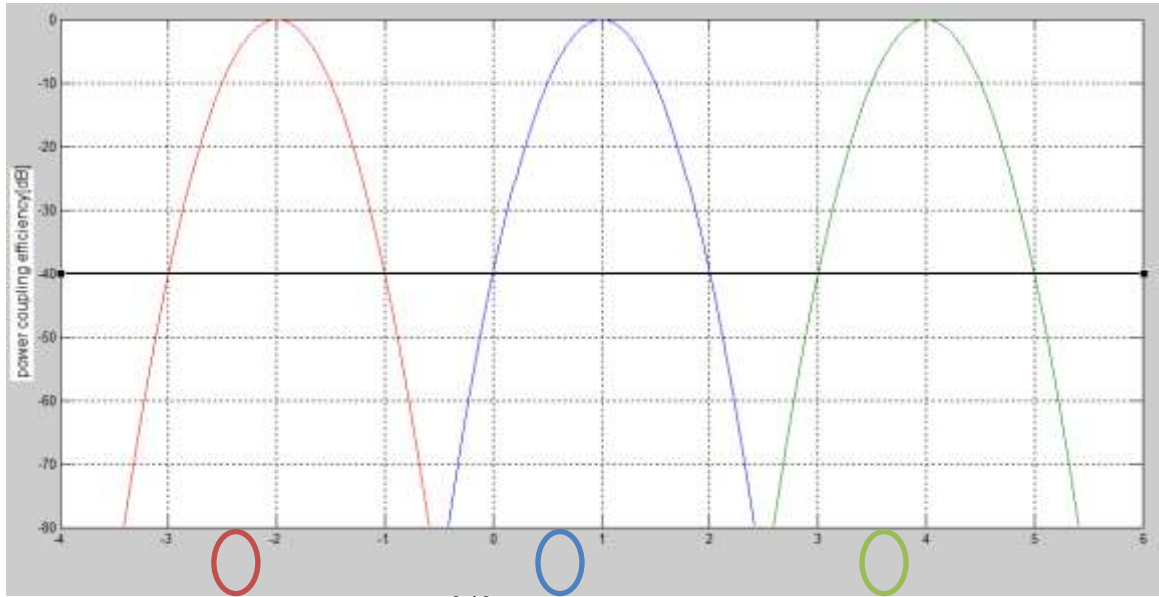
$$\eta = \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\delta-\delta')^2}{\omega_x^2}\right) \quad (24)$$

وبالتالي تكون كفاءة الاقتران بالنسبة لمنفذ الخرج المطلوب:

$$T = |\eta|^2 = \exp\left(-\frac{(\delta-\delta')^2}{\omega_x^2}\right) \quad (25)$$

لتحقيق مستوى تداخل أقل من 40dB يجب أن يكون البعد بين منفذين متجاورين $(|\delta - \delta'| = \delta_0 \geq 3.035\omega_x)$ ، ويبين

الشكل (18) كفاءة الاقتران عندما توجه المرآة الحزمة باتجاه كل من (port-2,port1,port4)



الشكل (18): كفاءة الاقتران لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS عندما توجه المرآة الحزمة باتجاه كل من (port-2,port1,port4)

نلاحظ أن قيمة كفاءة الاقتران تكون مثالية ومساوية للواحد عندما تتجه الحزمة إلى مركز المنفذ أي أن خسارة الاقتران مساوية (0dB) ، كما أن الكفاءة تقل والخسارة تزداد عند الابتعاد عن مركز المنفذ، ويبين الشكل أن مستوى التداخل المقبول أقل من 40dB لهذا التصميم وهي القيمة التي تناسب البعد بين مركزيين متتاليين قيمته $(|\delta - \delta'| = \delta_0 \geq 3.035\omega_x)$.

الاستنتاجات والتوصيات:

وضعت هذه الدراسة النموذج الرياضي لمرور حزمة غاوس ضمن العناصر الضوئية المكونة لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS وأهمية استخدام كل من عدسة فورييه وشبكة الإرسال وتأثيرهما على حزمة غاوس بالإضافة إلى اختيار البارامترات المناسبة للعناصر الضوئية المستخدمة للحصول على انتقائية عالية ومردود عالي ضمن المجال

1547-1548nm) من الحزمة C، وعند طول موجة مركزي ($\lambda_{center} = 1547.5\text{nm}$). بالإضافة إلى تحقيق خسارة عزل منخفضة وزيادة كفاءة الاقتران بمنافذ الخرج.

المبدل WSS ذو تطبيقات واسعة في الشبكات الضوئية المرنة، لذلك فإن دراسة هذا المبدل والاستخدام الأمثل لعناصره وبارامتراته موضوع اهتمام كبير للأبحاث المستقبلية. حيث نقترح تمرير الإشارة الضوئية مرتين من خلال العناصر الضوئية المكونة لمبدل WSS (تمرير مزدوج)، وذلك بهدف الحصول على ميزات مضاعفة تقدمها هذه العناصر الضوئية حيث أن مرور الإشارة مرتين من خلال عدسة فورييه سيقدّم ميزات انتقائية عالية جداً، وسيسهم في زيادة سعة الشبكة، وبالتالي تحسين أداء تقنية WSS المعتمدة على تقنية MEMS، وبما أن عقدة ROADM تعتمد بشكل رئيسي على مبدلات WSS، بالتالي سيتحسن عمل ROADM كنتيجة لذلك.

References:

- [1] Yangyo Qu, Meng Lian, Honogbiao Li, Zihao Wang, Yinan Zhu, Qize Guo, Jian Yong, Dailiang Wang "Flexible Optical Network Enabled Proactive Cross-Layer Restructuring for 5G/B5G Backhaul Network with Machine Learning Engine" IEEE, Optical Fiber Communication, OSA Technical Digest, 13 May 2020.
- [2] Krzysztof Walkowiak, Mirosław Klinkowski, Adam Włodarczyk and Andrzej Kasprzak "Predeployment of Transponders for Dynamic Lightpath Provisioning in Translucent Spectrally-Spatially Flexible Optical Networks" Appl. Sci. 2020.
- [3] Shufang He, Yang Qiu and Jing Xu "Invalid-Resource-Aware Spectrum Assignment for Advanced-Reservation Traffic in Elastic Optical Network" Sensors, pp.1-13, 2020
- [4] Takashi Miyamura, Akira Misawa "Improving efficiency of network resources in elastic optical transport network by using in-network cache functions" Optical Switching and Networking, vol.42, 2021.
- [5] G.Sava, K. Manouskis, G.Ellinas. "Confidentiality meets protection in elastic optical networks" Optical Switching and Networking, vol. 42, 2021.
- [6] Nattapan Kitswan, Kaito Akaki, Praphon Pavararan Koon, Avishex Nay "Spectrum allocation scheme considering spectrum slicing in elastic optical networks" IEEE/OSA Journal of Optical Network, vol. 13, pp. 169–181, July 2021.
- [7] C. W. Chow et al. "Demonstration of High Spectral Efficient OFDM-QAM Long Reach Passive Optical Network", in Proc. European Conference on Optical Communications (ECOC), 2008.
- [8] T. N. Duong et al. "10Gbit/s transmission over 2.5GHz bandwidth by direct modulation of commercial VCSEL and multi-mode FP lasers using Adaptively Modulated Optical OFDM modulation for Passive Optical Network" in Proc. European Conference on Optical Communications (ECOC), 2008.
- [9] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Spectrally/Bitrate Flexible Optical Network Planning," Proc, ECOC, 2010.
- [10] Guoying Zhang, Marc De Leenheer, Annalisa Morea and Biswanath Mukherjee "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking" November 2011.
- [11] Joana Socrates Dantas et al. "Challenges and Requirements of a Control Plane for Elastic Optical Networks" Preprint submitted to Networks Communication, May 13, 2014.
- [12] S. Poole, S. Frisken, M. Roelens and C. Cameron "Bandwidth-flexible ROADMs as network elements" in OTuE1, OSA/OFC/NFOEC, 2011.
- [13] Victor Lopez and Luis Velasco "Elastic Optical Networks" Springer International Publishing Switzerland, 2016.

- [14] R. Ryf et al. "Scalable wavelength-selective crossconnect switch based on MEMS and planar waveguides," 27th European Conference on Optical Communication, ECOC '01, Volume 6, PP. 76 – 77, 30 Sept-4 Oct. 2001.
- [15] Shifu Yuan et al. "Fully Integrated NxN MEMS Wavelength Selective Switch with 100% Colorless Add-Drop Ports" OFC/NFOEC, 2008.
- [16] Eldada L. " Application Note Wavelength Selective Switching in Optical Communications" 27 September 2016.
- [17] M. Koga et al., 8×16 delivery and coupling type optical switches for a 320 Giga-bit/s throughput optical path cross-connect system, in OFC '96 , ThN3, San Jose, February 25-March 1, pp. 259–261, 1996.
- [18] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking " IEEE Communications Magazine.vol. 50,no. 5, pp 56–65, 2012.
- [19] B. de la Cruz Miranda, Ó. González de Dios, V. López, J.P. Fernández-Palacios "OpEx savings by reduction of stock of spare parts with sliceable bandwidth variable transponders" in Proceedings of Optical Fiber Conference (OFC), San Francisco, 2014.
- [20] M. Svaluto, J.M. Fabrega, L. Nadal, F.J. Vilchez, V. Lopez, J.P. Fernandez-Palacios "Cost-effective data plane solutions based on OFDM technology for flexi-grid metro networks using sliceable bandwidth variable transponders" in Proceedings of Optical Networking Design and Modeling (ONDM), Stockholm, May 2014.
- [21] N. Sambo et al. 'Programmable transponder, code and differentiated filter configuration in elastic optical networks" J. Lightwave Technol.vol 32,pp 2079–2086, 2014.
- [22] Bijoy Chand Chatterjee, Nityananda Sarma, and Eiji Oki "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial" IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 3, Third Quarter 2015.
- [23] "Propagation of Gaussian beams" www.laser-journal.de the last visit on 9 August 2020.
- [24] Jui-che Tsai et al. "Open-Loop Operation of MEMS-Based 1× N Wavelength Selective Switch With Long-Term Stability and Repeatability" IEEE Photonics Technology Letters, vol. 16, no. 4, april 2004.
- [25] Damien P. Kelly "Numerical calculation of the Fresnel transform" J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 31, no. 4 , April 2014
- [26] Fanjie Li, Yu Bai and Zhenming Zhao " Optical transfer function without using fourier transformation " Optic, vol. 176, pp 410-418, 2019.
- [27] D. Van Thourhout, R. Baets, E. Stijns, H. Ottevaere, Coursenotes Microphotonics, chapter 4: Fourier optics, Universiteit Gent, Vrije universitot Brussel, 2011.
- [28] Keisuke Sorimotor, Hitoshi Kawashima, Masahiko Mori, Toshifumi Hasama, Hiroshi Iskikawa, Hiroyuki Tsuda and Hisato Uetsuka " MEMS mirror with slot structure suitable for flexible-grid WSS" IEICE Electronics Express, vol. 10, no. 3, pp 1–11-2013.
- [29] David Sinefeld and Dan M. Marom" Insertion Loss and Crosstalk Analysis of a Fiber Switch Based on a Pixelized Phase Modulator" Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 1, January , 2011