Comprehensive Journal of Science
Volume (9), Issue (36), (Sept 2025)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد(9) ملحق العدد (36) (سبتمبر 2025)
ردمد: 3014-6266

تحسين وتعزيز كفاءة شبكات النقل الضوئي OTN Network Optical Transport باستخدام تقنية تعدد الارسال بكثافة الطول الموجي Dense wavelength division multiplexing DWDM

فاضل علي غميض

قسم التقنية الالكترونية ,شعبة هندسة الاتصالات ,كلية التقنية الهندسية بزوارة

Fadel Ali Ghmid

Electronic Technology Department, Collage of Engineering Technology, Zwara, Libya

CORRESPONDING OUTHOR : fadelGhmid@cetz.edu.ly

تاريخ الاستلام:2025/8/23 –تاريخ المراجعة: 2025/9/24– تاريخ القبول: 2025/10/4– تاريخ للنشر : 2025 /10/10

ملخص:

مع التطور المتسارع في خدمات الاتصالات والطلب المتزايد على نقل كميات ضخمة من البيانات عبر الشبكات، ظهرت الحاجة لتلعب دورًا ((Optical Transport Network إلى حلول تضمن السرعة والكفاءة والموثوقية. وهنا جاءت شبكات النقل الضوئي محوريًا في تنظيم حركة البيانات وتأمينها. ومع ذلك، ومع الازدياد الهائل في حجم البيانات، برزت الحاجة إلى تحسين أداء شبكات كوسيلة DWDM وزيادة قدرتها الاستيعابية دون الحاجة إلى إنشاء بنية تحتية جديدة.ولهذا الغرض، تم الاعتماد على تقنية OTN ، حيث تتيح هذه التقنية استخدام أطوال موجية متعددة لنقل بيانات ضخمة عبر ليف بصري واحد. وفي هذا OTN لتعزيز كفاءة في تحسين شبكة النقل الضوئي DWDM البحث سيتم دراسة كيفية استخدام تقنية.

الكلمات المفتاحية: شبكة النقل الضوئي OTN، تعدد الارسال بكثافة الطول الموجيDWDM .

1.1 المقدمة:

تعرف بأنها إطار معياري لنقل البيانات عبر شبكات الألياف البصرية ، وقد تم تعريفها من قبل الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU–T) ضمن التوصيات G.709 تعتمد OTN على تغليف البيانات ضمن وحدات نقل ضوئية تسمى OTU (Optical Transport Unit) ، وتوفر وسائل فعالة لنقل أنواع مختلفة من البيانات مثل SDH وEthernet ضمن بنية واحدة. تتكوّن أطر OTN من عدة أقسام تشمل بيانات المستخدم، ومعلومات المراقبة، والتحكم، وتصحيح الأخطاء باستخدام FEC.

تتيح هذه الشبكة عمليات نقل موثوقة، إدارة فعالة للإشارات، ومراقبة الأداء بدقة على طول المسار البصري، مما يجعلها مناسبة لنقل البيانات بسرعات عالية ضمن بيئة تعتمد على الألياف البصريةوتعتبر شبكة النقل الضوئية (OTN) باعتبارها بنية متكاملة صُممت لتنظيم حركة البيانات عبر شبكات الألياف البصرية بطريقة فعالة وموثوقة. حيث توفّر OTN إمكانيات متقدمة في التغليف، التصحيح، الإدارة، مما يجعلها خيارًا استراتيجيًا لشبكات الاتصالات الحديثة ذات الطابع عالي السعة والاعتمادية، ومع تطور متطلبات نقل البيانات، أصبح من الضروري اعتماد أنظمة نقل ضوئي تتيح الاستغلال الأمثل لقدرات الألياف. ومن أبرز هذه الأنظمة وأكثرها ارتباطًا بشبكة OTN هي أنظمة DWDM، التي تتيح نقل إشارات متعددة بأطوال موجية مختلفة على نفس الليف البصري، وهو ما يُعد عاملًا حاسمًا في تعزيز كفاءة وأداء شبكة النقل الضوئية.

ويهدف هذا البحث في تحسين كفاءة نقل البيانات عبر الشبكات البصرية وزيادة القدرة علي معالجة وادارة حركة البيانات ويهدف ايضا في زيادة سعة الشبكة باستخدام تقنيةDWDM

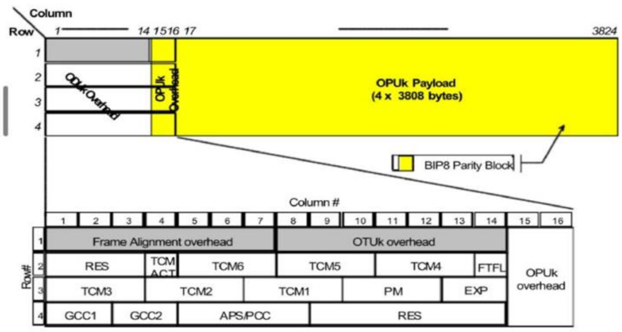
1.2 الدافع: تم اختيار البحث لتحسين شبكة OTN باستخدام تقنية DWDM" نظرًا لحداثة الموضوع وأهميته في تطوير شبكات الاتصالات الحديثة. تعتبر شبكة OTN من الشبكات المتقدمة التي تلعب دورًا محوريًا في تحسين جودة وكفاءة نقل البيانات، كما أن دمجها مع تقنية DWDM يفتح آفاقًا واسعة لزيادة السعة وتقليل الفقد في الأداء. ما يميز هذا المشروع هو طرحه لموضوع غير تقليدي ومواكب للتطورات التقنية العالمية، وقد جاء اختيارنا بناءً على دراسة مستفيضة واطلاع على أحدث المصادر العلمية الموثوقة، مما يجعل المشروع مساهمة فعالة في فهم وتطوير هذا المجال الحيوي.

2- مبدأ عمل شبكة (OTN): تقوم شبكة النقل البصري (OTN) لي مبدأ أساسي يتمثل في نقل البيانات عبر الألياف البصرية بطريقة مرنة وآمنة وعالية الكفاءة، مع الحفاظ على جودة البيانات المنقولة ومراقبة الشبكة بشكل مستمر. وقد صُممت OTN لتكون بمثابة "غلاف رقمي" (Digital Wrapper) يحيط بالبيانات الواردة من بروتوكولات أو تقنيات مختلفة، بهدف توحيد طريقة النقل وتحسين الأداء.

2-1 تغليف البيانات: (Encapsulation)

تغليف البيانات في OTN خطوة أساسية، لأنها تنظّم البيانات الرقمية داخل الحاويات (ODU/OPU) وتجهزها للإرسال عبر الشبكة الضوئية.

في هذه الشكل (1)توضح هيكل الإطار في واجهة OTUK ضمن شبكة النقل البصري OTN:



شكل (1.) توضيح هيكل الإطار في واجهة OTUK ضمن شبكة النقل البصري 2] OTN]

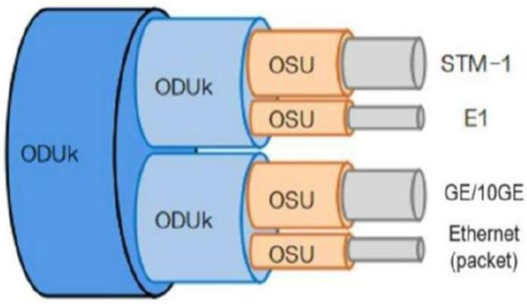
هذا الإطار يتكون من 4 صفوف و3824 عمودًا، ويُعاد تكوينه بشكل دوري لنقل دفعات من البيانات بسرعة عالية جدًا. ويمكن تقسيمه إلى قسمين رئيسيين:

2-2 قسم التحكم والإدارة (Administrative / Overhead)

يشغل الأعمدة من 1 إلى 16 فقط، لكنه يلعب دورًا حيويًا ومهمًا جدًا. يُمكن تشبيهه بعقل الإطار أو غرفة القيادة التي تنظم كل شيء. هذا القسم يحتوي على معلومات خاصة بمراقبة جودة الإرسال، تصحيح الأخطاء، وتتبع موقع البيانات عبر الشبكة وهو ما يسمى ب (Overhead) . وينقسم إلى ثلاث مكونات رئيسية:

-**OPUK Overhead** : OPUk Overhead موجود في طبقة الـ OPU، وفي هذه الطبقة يتم إضافة بيانات إضافية تُعرف بالـ Overhead، والتي تبدأ عادة عند العمود رقم 16 في الإطار. هذه البيانات تهدف إلى تحديد مسار البيانات داخل الشبكة ومراقبتها أثناء النقل. من أهم مكوناتها كود (Bit Interleaved Parity 8–BIP)، والذي يُستخدم للكشف عن الأخطاء التي قد تحدث أثناء النقل، مثل فقدان جزء من البيانات أو تغيّر ترتيبها

. **ODUK Overhead** : يوجد على الجهة الجانبية من الإطار، ويُستخدم لمتابعة رحلة البيانات عبر مسارات الشبكة المختلفة. يحتوي على معلومات مهمة لضمان وصول البيانات بشكل صحيح إلى وجهتها، ومراقبة ما إذا حدثت أي تغييرات او اضطرابات قد تحدث في المسارات أثناء النقل.



شكل (2) توضيح النقل الضوئي باستخدام تقنية (ODU) [1]

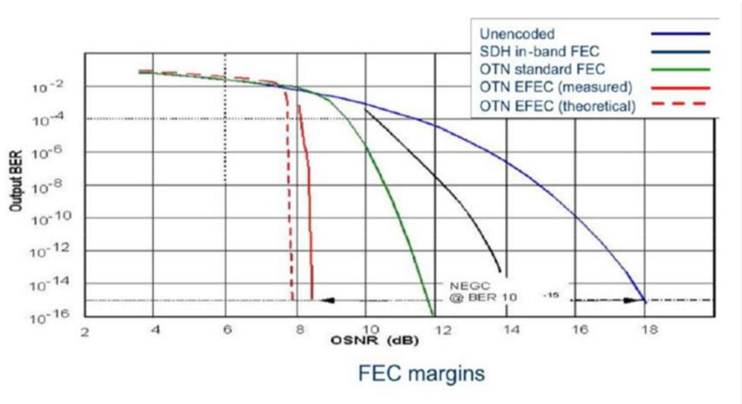
تعمل الطبقة الخارجية (ODU)كما في الشكل (2) كي تشير إلى الحاوية الضوئية التي تستخدم في نقل البيانات على شبكة النقل الضوئي وتتعامل مع بيانات من أنواع مختلفة وتجمعها في قنوات ODUلنقلها. آلي الوحدات الداخلية (OSU – Optical Service Unit)كيتم تقسيم الحاوية ODU إلى وحدات أصغر تُسمى OSUوكل OSU تتعامل مع نوع محدد من البيانات أو الخدمة.حيت يتم نقل عدة أنواع من الخدمات عبر الشبكة، منها E1 و STM-1 التي تستخدم في شبكات الاتصالات التقليدية مثل شبكات الهاتف (TDM)، وGE و10 (Gigabit Ethernet GE و10 Gigabit Ethernet) لنقل البيانات الحديثة، بالإضافة إلى خدمات Ethernet على شكل حزم (Packet Switching) لنقل البيانات الرقمية. تسمح الشبكة أيضًا بنقل أنواع مختلفة من البيانات مثل الصوت والفيديو والبيانات بكفاءة باستخدام حاوية واحدة (ODU)، كما توفر مرونة عالية وإمكانية إدارة أفضل للموارد داخل الشبكة

• **OTUK Overhead**

الـ OTUk Overhead موجود في طبقة الـ OTU، وهي البيانات الإضافية التي تُضاف للإشارة الرقمية بعد تغليفها من الـ ODU، وتبدأ عادة عند بداية الإطار. وظيفة هذا الـ Overhead هي مراقبة النقل من أول نقطة إلى آخر نقطة في الشبكة، وضمان وصول البيانات بأمان.

3-2تصحيح الأخطاء (Forward Error Correction – FEC)

بعد تغليف البيانات، يتم إدراج رموز خاصة لتصحيح الأخطاء داخل الإطار. وتُعرف هذه التقنية باسم FEC، وهي تقنية تسمح للكشف عن الأخطاء التي قد تحدث أثناء النقل عبر الألياف البصرية، بل وتصحيحها دون الحاجة إلى إعادة الإرسال. هذا يعزز من موثوقية الشبكة، ويزيد من المسافة التي يمكن تغطيتها دون تدهور في الإشارة. هذه الصورة توضح (شكل 3.) أداء تقنيات تصحيح الأخطاء الأمامية (FEC – Forward Error Correction) في شبكات النقل الضوئي (OTN) بالنسبة لمستويات OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) وتأثيرها على نسبة الخطأ في الإشارة BER (Bit Error Rate)



شكل (3.) توضيح أداء تقنيات تصحيح الأخطاء الامامية [2 ((FEC]

1. المحاور:

- المحور الأفقي: OSNR (dB)، وهو يعبر عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء.
- المحور العمودي: BER (Bit Error Rate ، وهي نسبة الأخطاء في البيانات المستلمة.

2. الخطوط الممثلة لأنواع تصحيح الأخطاء:

• Unencoded (الخط الأزرق): الإشارة بدون تصحيح أخطاء. نسبة الخطأ تزداد بسرعة مع انخفاض OSNR.

• SDH in-band FEC (الخط الأسود): تصحيح الأخطاء المستخدم في أنظمة SDH. يوفر تحسنًا بسيطًا مقارنة بالإشارة غير المشفرة.

OTN standard FEC (الخط الأخضر): تصحيح الأخطاء القياسي في شبكات OTN. يحقق BER أقل عند نفس OSNR.

• OTN EFEC (Measured/Red تقنيات تصحيح أخطاء محسنة (Enhanced FEC) كما تم قياسها. توفر أداء أفضل عند مستويات منخفضة من OSNR.

• OTN EFEC (Theoretical/Dashed Red الأداء النظري لتقنية EFEC. يشبه الأداء المقاس.

النقاط الرئيسية :

• كلما زادت جودة تصحيح الأخطاء مثل (EFEC) ، يمكن للشبكة التعامل مع مستويات أقل من OSNR مع الحفاظ على جودة عالية للإشارة.

• 15-^10 NEGC @ BER يشير إلى نقطة الأداء حيث تصل نسبة الخطأ إلى مستوى منخفض جدًا (10^-15) ، مما يعني نقل بيانات عالي الدقة.

الفائدة العملية:

• تقنيات تصحيح الأخطاء تُستخدم لتحسين كفاءة وجودة نقل البيانات في الشبكات الضوئية.

• EFEC يوفر هامش أداء أعلى، ما يسمح بنقل البيانات لمسافات أطول أو عبر قنوات ذات جودة أقل.

3. الدمج الهرمي للإشارات (Multiplexing)

من أبرز مميزات OTN قدرتها على دمج عدة إشارات صغيرة (ODUs) داخل إشارة واحدة أكبر. يتم ذلك وفق بنية هرمية تسمح باستخدام أكثر فعالية لسعة الألياف البصرية، كما تتيح نقل كميات ضخمة من البيانات بشكل متزامن ومرتب، دون تداخل أو فقدان.

4. الإدارة والمراقبة (Management and Monitoring)

تحتوي شبكات OTN على قنوات خاصة مخصصة للتحكم والمراقبة، مما يتيح مراقبة حالة الإشارات، واكتشاف الأعطال، والتحكم في مسار البيانات. هذه الخصائص تجعل من OTN شبكة ذكية يمكن إدارتها بسهولة وضمان استمرارية الخدمة دون انقطاع.

2.2 مميزات تقنية OTN:

1. تقسيم الموارد بكفاءة (Efficient Resource Utilization) • OTN تُتيح تخصيص عرض النطاق الترددي حسب الحاجة، مما يقلل من الهدر ويضمن استخدامًا مثاليًا للموارد المتاحة.

2. دعم المسافات الطويلة (Long-Haul Transmission) : تدعم تقنية OTN نقل البيانات على مسافات طويلة دون التأثير على جودة الإشارة، بفضل استخدام مكبرات الإشارة الضوئية وتقنيات تصحيح الأخطاء.

3. إمكانية التوسع (Scalability) : يمكن لشبكات OTN استيعاب النمو المستقبلي بسهولة بفضل بنيتها القابلة للتكيف مع متطلبات البيانات المتزايدة.

4. دعم التطبيقات الزمنية الحرجة (Real-Time Applications Support): OTN تضمن نقل البيانات بزمن تأخير منخفض، مما يجعلها مثالية للتطبيقات الزمنية الحرجة مثل الاتصالات الصوتية والفيديو الحي.

5. دعم خدمات الجيل الخامس (G Support5): تُعتبر OTN البنية التحتية المثالية لدعم شبكات الجيل الخامس، حيث تتيح نقل البيانات بكفاءة تلبي متطلبات السرعات العالية والتأخير المنخفض.

6. إدارة الشبكة: توفر إمكانيات متقدمة لإدارة الإشارات مثل المراقبة، الفحص، والعزل لتحديد الأعطال

2.3.عيوب تقنية: OTN

استهلاك الطاقة:• الأجهزة المستخدمة في شبكات OTN، مثل المحولات الضوئية، تستهلك طاقة كبيرة مقارنة ببعض التقنيات الأخرى. ومن عيوب OTN ايضا التعقيد في التجميع والتأطير، حيث يتطلب المرور بعدة طبقات مثل ODU k وOTU k وFEC، مما يعقّد التركيب

انطلاقًا من ذلك، سيتم تناول أنظمة DWDM كعنصر اساسي مكمل لبنية OTN، من حيث مبدأ عملها، بنيتها، وآلية تكاملها مع الشبكة، لفهم كيف تسهم في رفع كفاءة الشبكات البصرية وتحقيق نقل بيانات واسع النطاق عبر بنية موحدة

3. DWDM Dense wavelength division multiplexing (تعدد الإرسال بكثافة الطول الموجي).

هذه التقنية تستخدم في شبكات الاتصالات لنقل حزم كبيرة من البيانات عبر الألياف البصرية عن طريق استخدام عدة أطوال موجية مختلفة. حلت هذه التقنية العديد من المشاكل في مجال الاتصالات البصرية والشبكات من بين هذه المشاكل مشكلة السعة، مكنت DWDM من زيادة كبيرة في سعة الألياف البصرية وذلك عن طريق استخدام أطوال موجية متعددة على نفس الليف البصري دون الحاجة إلى تركيب ألياف جديدة.

3.1 بعض الأسباب المهمة لاستخدام تقنية DWDM:

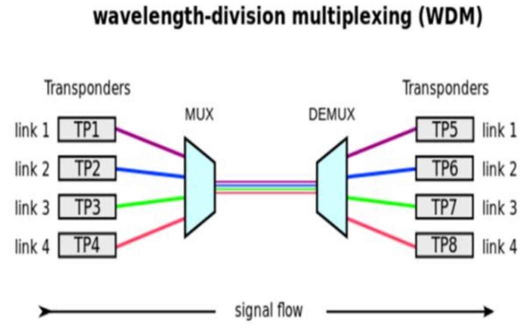
. توسيع النطاق الترددي: قدمت DWDM القدرة على توسيع النطاق الترددي للشبكات بشكل كبير مما مكن من تلبية الطلب المتزايد على خدمات البيانات.

. تكامل الشبكات القديمة مع الجديدة: سمحت هذه التقنية بدمج الشبكات القديمة مع التقنيات الحديثة دون الحاجة إلى تغيير البنية التحتية بالكامل.

. درجة الوثوقية العالية: زادت من درجة الأمان من خلال قدرتها على استخدام مضخماتِ EDFA.

3.2 تقنية: wavelength division multiplexing WDM

هي اختصار لكلمة وهي تقنية تستخدم في شبكات الألياف البصرية لزيادة سعة النقل باستخدام أطوال موجية مختلفة وهذه التقنية تستخدم نطاقات ترددية مختلفة والتي تشمل نطاق C–band (طوله الموجي 1530 – 1565 نانومتر). وفي هذه التقنية يكون التباعد بين القنوات واسع، لذلك عادة ما يكون عدد القنوات من بين 2 إلى 8 قناة وتستخدم في الشبكات قصيرة المدى .فيما يلي شكل توضيحي كما في الشكل (4) لفكرة تقنية WDM :



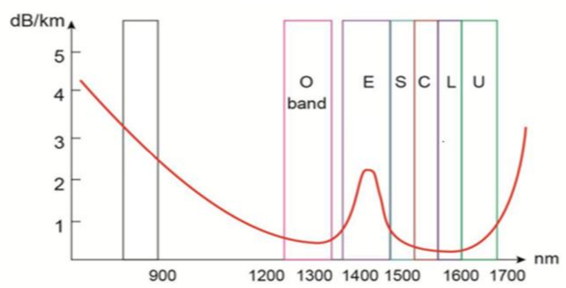
شكل (4) توضيح عمل تقنية [WDM]

وتنقسم هذه التقنية إلى قسمين :

1. تقنية CWDM : هي اختصار لكلمة coarse wavelength division multiplexing وتعني تعدد الموجات بتقسيم الخشن وتستخدم نطاقا ترددیا بين 1271 نانو متر الى 1611نانو متر ويكون عادة عدد القنوات 16 قناة وتستخدم للأرسال على مسافات اقل من 100 كيلومتر بشكل عام CWDM هي اصدار محسّن وأكثر اقتصادية من تقنية WDM الاصلية، مع زيادة في عدد القنوات والنطاق الطيفي المستخدم.]3[

2. تقنية DWDM :كما ذكرنا سابقا أنها تقنية تعمل على نقل حزم كبيرة من البيانات عبر الألياف البصرية عن طريق تقسيم أطوال موجية مختلفة فدعنا نتحدث بشكل أوفى عن طريقة تقسيم هذه الأطوال الموجية: يجب معرفة إن المدى الموجي المستخدم في تقنية DWDM يكون عند (1530 – 1565 نانومتر) C–band وأحيانا (1570 – 1610نانومتر) L–band وتكون القنوات مرتبة بشكل وثيق جدا ولا يحدث تداخل بينها.

وفي الشكل (5) التالي يبين الفقد في الاطوال الموجية المختلفة



شكل (5) توضيح الاطوال الموجية لمختلفة]3[

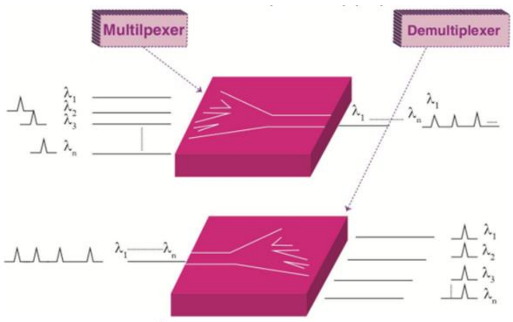
ويكون التباعد بين القنوات بفاصل (0.4 نانومتر) أو (0.8 نانومتر) او اقل بمعنى إذا استخدم الطول الموجي (1530) يمكن إن تكون الأطوال الموجية الأخرى (1530.4) و (1530.8) وهكذا يتم تقسيم الأطوال الموجية ،قد تصل السعة الطيفية الناتجة عن هذا التقسيم الى (196 قناة) ، وعندما نتحدث عن السرعة فإننا نجد أن كل قناة منها يمكنها نقل البيانات بسرعات قد تصل إلى (40 جيجا بت/ثانية)، (100 جيجا بت/ثانية) (400جيجا بت/ثانية) لابل وتجرى الاختبارات حاليا على تحميل (1 تيرا بيت / ثانية

) على طول موجي واحد ، ويمكن باستخدام تقنية DWDM الارسال لمسافات تتجاوز 1000 كيلومتر دون الحاجة لمكرر(بالطبع هذا مرتبط باستطاعة المرسل الضوئي ونوع الليف المستخدم). اما من حيث السعة فمثلا إذا كانت كل قناة قادرة على نقل 100 جيجا هرتز/ الثانية فان السعة العرضية الكلية للكابل الواحد تساوي 8 تيرا هرتز /الثانية. وفي الشكل التالي فكرة تقنيةDWDM :

3.3 تعريف بعض العناصر الأساسية لشبكة DWDM:

1. جهاز وحدة النقل الضوئية (OTU) Optical Transport Unit: يقوم بتحويل الإشارات الرقمية من جهاز التجميع الى إشارات ضوئية وهي مناسبة للنقل عبر شبكة DWDM وتقوم بعكس الطريقة في الاستقبال.

2. مجمع/فاصل الإشارات (Mux/Dmux Demultiplexer/Multiplexer):مجمع الإشارات هو جهاز يقوم بجمع الإشارات الضوئية متعددة الأطوال الموجية ودمجها في إشارة واحدة لإرسالها عبر الليف وفاصل الإشارات جهاز يقوم بفصل الإشارة المدمجة إلى إشارات ضوئية منفصلة بأطوال موجية مختلفة عند وصولها إلى الوجهة.



شكل (7) رسم توضيحي لفاصل و مجمع الاشارة[3]

3. الألياف البصرية Optical fiber: وهي الوسيط الذي ينقل الإشارات الضوئية المدمجة عبر مسافات طويلة والليف البصري المستخدم في هذه التقنية هو أحادي النمط single mode عادة ما يكون قطر النواة (8–10) مايكرومتر عادة ما يتم استخدام من واحد الى أربعة الياف ضوئية أحادية النمط في الكابل الواحد، عدد الالياف يعمد على متطلبات السعة، علما بأن أربعة الياف ضوئية في الكابل الواحد هو الخيار الأكثر شيوعا في تقنية DWDM.

4. مضخمات بصرية Optical amplifiers: تعمل المضخمات على تعزيز الإشارة أي تزيد من قدرتها على السفر لمسافات أطول واحدة من أشهر المضخمات هي مضخم الألياف المشوبة بالاربيوم EDFA الذي يعزز الإشارة الضوئية دون الحاجة لتحويلها إلى إشارة كهربائية. [4]

5. قناة الاشراف الضوئية ((OSC Optical Service Channel:

يعمل OSC كقناة مستقلة لإرسال بيانات الإدارة والتحكم وعادة ما تكون بطول موجي (عادة 1510 نانومتر) مختلف عن القنوات البيانية الرئيسية. [3]

3.4 مميزات تقنية DWDM:

1. زيادة سعة نقل البيانات: يمكن نقل عدة إشارات مستقلة في وقت واحد.

2. نقل البيانات لمسافات طويلة: بفضل مضخمات الإشارة يمكن نقل البيانات عبر مسافات طويلة دون فقد كبير في الجودة.

3. سهولة التوسع: يمكن إضافة المزيد من قنوات البيانات بسهولة لزيادة سعة الشبكة.

4. نقل خدمات متعددة: يمكن نقل بيانات، صوت، فيديو عبر نفس الألياف دون تداخل.

5. موثوقية عالية: يوفر نقل بيانات مستقر وموثوق للتطبيقات التي تتطلب أداءً عالياً.

3.5 عيوب تقنية: DWDM

1.تعقيد الإدارة والصيانة مما يجعلها تتطلب فريق متخصص للصيانة والإدارة.

2. التأثرات البيئية: يمكن ان يتأثر اداء هده التقنية بالظروف البيئية مثل درجة الحرارة العالية او الرطوبة مما يؤدي الى الحاجة لاستخدام تقنيات مثل العزل الحراري . [3]

3.6مستقبل تقنية DWDM

بشكل عام فإن مستقبل تقنية DWDM يبدو مشرقا حيث ستواصل هذه التقنية لعب دور حيوي في تلبية الطلب المتزايد على السعة في السنوات القادمة وبناء على المعلومات المتوفرة عن تصور تقنية DWDM يمكننا التنبؤ بالمستقبل المرتقب لهذه التقنية.

1. استمرار النمو والتطور: مع الزيادة المتسارعة في الطلب على سعة ستستمر تقنية DWDM في التطور لتلبية هذه الاحتياجات، ستشهد التقنية تحسينات مستمرة في عدد القنوات الممكن دمجها في الألياف البصرية الواحدة.

2. دعم تطبيقات جديدة: ستواصل DWDM دعم الخدمات المتطورة كشبكات G5 وستتمكن هذه التقنية من ظهور تطبيقات جديدة تتطلب سعات كبيرة.

3. انخفاض التكاليف: تحسين التصنيع وزيادة الإنتاج ستؤدي إلى انخفاض تكلفة أجهزة DWDM بشكل مستمر وسيسمح هذا الانخفاض في التكاليف بالانتشار الواسع للتقنية في شبكات الاتصالات.

4 الاستنتاج:

بعد الاطلاع على الدراسات السابقة ، تبيّن لنا أن دمج شبكة OTN مع تقنية DWDM لا يمثل مجرد تحسين في كفاءة نقل البيانات ، بل يشكّل خطوة استراتيجية نحو بناء شبكات اتصالات ذكية ومرنة قادرة على مواكبة متطلبات الأجيال الحديثة من الأنظمة. هذا

التكامل أتاح لنا نقلًا ضوئيًا عالي السرعة وموثوقية كبيرة مع إدارة متطورة للطيف الضوئي ، مما يعكس توجهًا مستقبليًا نحو شبكات أكثر كفاءة واستدامة. ومن وجهة نظرنا ، فإن هذا الدمج يمثّل نواة التطور القادم في عالم البنى التحتية للاتصالات، حيث يجتمع الأداء، والذكاء، والاستدامة في منظومة واحدة .

المراجع

.1Edge OTN Technical White Paper

Issue V1.0 Date 2021-02-10

HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD

.2Optical Transport Network (OTN) Tutorial

.3Digital Transport Technology, Mohammad Emad Alolabey, Syrian Arab Republic, 2020

.4INTRODUCTION TO DWDM TECHNOLOGY BY CISCO SYSTEM