

A DWDM optikai hálózatok fejlődése

Körössi Ádám
RelNet Technológia Kft.
Budapest
akorossi@relnet.hu

Abstract—The first significant recommendation on Dense Wavelength Division Multiplexing, ITU-T G.692, was published in 1998. Since then, several updates and further recommendations have been published to support evolving channel spacing, fiber types, optical interfaces and higher data rates. In this article, we review the evolution of the technology, the changes in the recommendations to adapt to them and, in this context, the response of our partner PacketLight to the challenges posed by these new demands.

Keywords—DWDM, Optical Networking, L-band, flex grid, 800 Gbps transceiver, PacketLight

I. BEVEZETÉS

A sűrű hullámhossz-osztásos multiplexeléssel foglalkozó első jelentős ajánlás, az ITU-T G.692 [1] 1998-ban jelent meg. Azóta számos frissítése és további ajánlások láttak napvilágot a fejlődő csatornatávolság, szál típusok, optikai interfészek és nagyobb adatátviteli sebességek (100, 400, 800 Gbps) támogatására. Cikkünkben a technológia fejlődését, az azokhoz alkalmazkodó ajánlások változását és, ezzel összefüggésben, a PacketLight partnerünknek az új igények szülte kihívásokra adott választát tekintjük át.

II. DWDM OPTIKAI HÁLÓZATOK

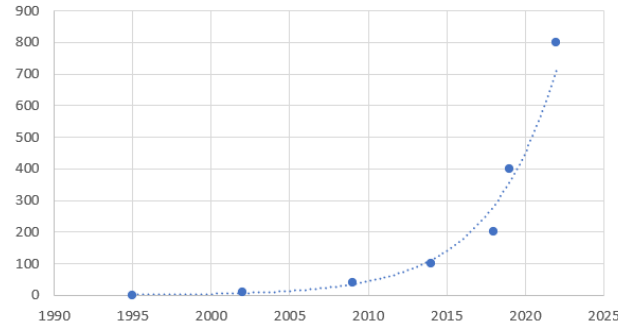
A. Optikai adóvevők (transceiver)

Az optikai transceiverek fejlődését legegyszerűbben az IEEE 802.3 szabvány különböző verzióin keresztül tudjuk megfigyelni. [2] A G.692 ajánlás megjelenésekor, 1998-ban már rendelkezésre álltak az 1 Gbps-os optikai interfészek (GBIC). 2001-ben form-factor váltás szemtanúi lehettünk: a GBIC mellett megjelentek a szintén 1 Gbps-os SFP-k. 2002-től váltak elérhetővé a 10 Gbps-os XFP modulok, melyek méretét 2006-ra sikerült az SFP méretére csökkenteni. Így kerültek a köztudatba az SFP+ modulok, melyek hamarosan a 10 Gbps mellett a 25 Gbps-s átvitelt is támogatták. Ugyanebben az évben négy SFP-csatorna összefogásával született meg a QSFP modul (4×1 Gbps), majd 2009-ben az SFP+ fejlesztésével a QSFP+ (4×10 Gbps).

A nagysebességű optikai adóvevők kora a CFP modulok kifejlesztésével 2010-ben kezdődött. Ezeket a viszonylag nagy méretű modulokat 100 Gbps-os hálózatokhoz fejlesztették ki. A technológia gyors fejlődése lehetővé tette ezen modulok méretcsökkentését, így megjelentek a CFP2 és CFP4 modulok. A PacketLight termékeknek a DWDM rendszerek hullámhossz tartományában működő interfészei tipikusan CFP2 modulok. 2014-ben jelentek meg a QSFP28 modulok, melyek 4 db 25 Gbps-os csatorna összefogásával biztosították a 100 Gbps-os sávszélességet. A 200 Gbps-os QSFP56 interfészek megjelenése 2018-ra tehető, ezek 4 db 50 Mbps-os csatornával dolgoznak.

Az 1. ábrán a különböző sávszélességű modulokat ábrázoltuk a megjelenésük évének függvényében. A trendvonal illesztés alapján elmondható, hogy a fejlődés egyelőre exponenciális.

Sávszélesség [Gbps]



1. ÁBRA - Az optikai adóvevők sávszélességének növekedési trendje

Az optikai modulok fejlődését a sávszélesség növekedése mellett a méret és fogyasztás csökkenése is jellemzi. Ezek lehetővé teszik a nagy portsűrűségű, kis fogyasztású DWDM eszközök gyártását. [8]

B. Ajánlások, szabványok

Több szervezet igyekszik a DWDM technológia és hozzá kapcsolódó területek számára ajánlásokat és szabványokat kidolgozni, köztük az International Telecommunication Union (ITU), az Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), és a Telecommunications Industry Association (TIA). Cikkünkben a DWDM csatornakiosztásra és a felhasználásuk gazdaságosságára fókuszálunk, így a számos ajánlás közül ilyen szemmel emelünk ki párat.

A bevezetőben említett G.692 ajánlás [1] négy, nyolc és tizenhat csatornás rendszerek interfészparamétereit határozza meg, amelyek 80, 120 és 160 km-es névleges fesztávolságon akár STM-16 bitsebességgel (~2.5 Gbps) működnek. A központi frekvenciák kiválasztásának alapjaként egy 193,1 THz-en horgonyzott frekvenciarácsot adnak meg 50 és 100 GHz-es csatornaközökkel. A 193,1 THz-es hálózati referenciaközökkel részben azért választották, hogy ne részesítsenek előnyben egy adott anyagon alapuló abszolút frekvenciareferenciát (AFR) – mindezt akkor, amikor ez az ajánlás az AFR értékre úgy hivatkozik, hogy a kijelöléséhez szükséges paraméterek még tanulmányozás alatt állnak. [1, 18. o.]. A csatornatávolság meghatározását egy olyan megállapodás előzte meg, hogy annak a 25 GHz egész számú többszörösének kell lennie. Ennél több szempontot figyelembe vettek, mint az EDFA erősítési spektrum és kapacitás. Az alkotók célja az volt, hogy a lehető legjobban kihasználják a technológiát és ne szabjanak korlátozásokat meghatározott alkalmazásokhoz, ugyanakkor figyelembe vegyék a technológiai korlátokat is. E megfontolás alapján a minimális csatornatávolság 125 GHz és 150 GHz volt, de az ajánlásba végül a 100 GHz és az 50 GHz minimális csatornatávolság került azzal, hogy megfelelő rugalmasságot biztosít a G.692 ajánlás alkalmazási követelményeinek teljesítéséhez.

A szabvány a névleges középfrekvenciákat a 192,1 THz és 196,1 THz közötti tartományban részletezi azzal a

megjegyzéssel, hogy a többszörös csatornák rendszerek jövőbeli fejlődése miatt később várhatóan a határértékeken túli frekvenciákat is alkalmazni fognak [1, 16. o.].

A G.694.1 (06/2002) ajánlás [3] már konkrétan a DWDM frekvenciara meghatározásával foglalkozik. A korábban rögzített 25 GHz-es minimális rácsávolságot a felére csökkenti, így a névleges középfrekvenciáinak meghatározásánál 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz vagy ez utóbbi egész számú többszörösének megfelelő rácsávolságot engedélyezve, továbbra is 193,1 THz referenciaközépfrekvenciához rögzítve. Az ajánlás hivatkozik a C és L hullámhossztartományokra [3, 2. o.], ennek megfelelően a táblázatban felsorolt csatorna-középfrekvenciák az 1530 és 1625 nm tartományban vannak.

Az ajánlás 2012-ben kiadott módosítása vezeti be a *flexibilis csatornakiosztás* fogalmát. Ez gyakorlatilag bármely olyan slot használatát lehetővé teszi, melynek névleges, THz-en értendő középfrekvenciáját a

$$\lambda_k = 193,1 + n * 0,00625 \quad (1)$$

összefüggés adja meg, ahol n egész szám. A slot szélessége az ajánlásban korábban rögzített

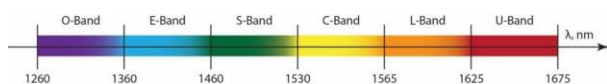
$$12,5 * m, \quad (2)$$

ahol m pozitív egész szám. Ez a módosítás a csatornahasználatban rendkívüli szabadságot ad, ugyanakkor kihívásokat támaszt azon gyártók elé, akik más gyártóval való kompatibilis megoldások kialakítására törekcsenek.

C. Csatornaszámozás

Az ajánlások előrelátóan nem adnak útmutatást a DWDM csatornák egyszerűsített jelölésére; az azonosításra a névleges középfrekvenciát és fix kiosztás esetén a rácsávolságot, flexibilis módban pedig a slot szélességet használják. A mindennapi életben azonban egyszerűbbnek tűnt egy rövidebb jelölés bevezetése, amely lehetőséggel számos fórum, illetve gyártó élt. Az ajánlások a csatornákat a frekvenciákhoz kötik, az azonos frekvenciaszélességű csatornák hullámhosszban kifejezett szélessége különböző, így a számozást is célszerű a frekvenciához kötni.

Az egyik legelterjedtebb jelölés a GHz-ben megadott, 6 számjeggyel ábrázolható névleges középfrekvencia középső két számjegyet használja. Így például a 190100 GHz-es csatorna az egyes, a 193100 GHz-es báziscsatorna a 31-es jelölést kapta. Az 50 GHz-es rácskiosztás esetén tört számokkal jelöljük a közbülső csatornákat; a 193150 GHz-es csatorna a 31,5-ös jelű.



2. ÁBRA - A hullámhossz-tartomány felosztása — Original; Extended; Short wavelengths; Conventional („erbium window”); Long wavelengths; Ultralong wavelength

Mivel az ajánlások eleinte a C sávot (2. ábra) jelölték ki a DWDM számára, így a jelöléssel eleinte nem volt probléma. A C sávba tartozik a 16-tól 59-ig terjedő 44 darab 100 GHz széles, illetve a 16,0-tól 59,0-ig számozott 87 darab 50 GHz széles csatorna – bár az interneten fellelhető leírások számos esetben ettől eltérően nyilatkoznak, sok esetben lazán kezelve a sávok hullámhosszban definiált határait.

A sávhatáron levő csatornák egy része átnyúlik a szomszéd sávba, így 100 GHz rácsávolság esetén a 16. csatorna 11%-a az L sávba, míg az 59. csatorna 7%-a az S sávba lóg át. Ugyanez 50 GHz rácsávolság esetén: a 16. csatorna teljes egészében a C sávban van, a 15,5. csatorna 28%-ban a C sávba nyúlik, így ez az L sávhoz tartozik. Az 59. csatorna teljes egészében a C sávban van. Az 59,5. csatorna 35,6%-a van csak a C sávban, így ez már inkább az S sávhoz tartozik.

A G694.1 ajánlás a későbbi felhasználást előre vetítve az L sávot is felosztja. Ez esetben az előbbi gondolatmenetet nem lehet követni, mivel a 190000 GHz-es csatorna a nullás, a 189900 GHz-es a 99-es, ugyanakkor a 187300 GHz-es nem lehet a 73-as, mivel a 197300 GHz-es csatorna már használja ezt a jelet.

A 100 és 50 GHz-es rácsávolság esetén a számozási problémát megoldja a Nokia módszere, amely a középső négy számjegyet használja azonosításra. A 193100 GHz-es referenciaközépfrekvenciához tartozó csatorna jelölése a 9310, a 193150 GHz-e a 9315, így az L-sáv 184500 GHz-hez tartozó csatorna lehetne a 8450-es.

Egyes gyártók a fentiekől eltérő egyedi számozást kreáltak maguknak, például [4] szerint a 191700 GHz-es a 19-es csatorna. Mivel a gyártók a fix frekvenciára hangolt optikai interfészeket a csatornaszámokkal jelölik, a kompatibilitást érdemes a hozzá tartozó frekvenciával is ellenőrizni.

A j2sw blog meglepő módon megfordítja a csatornák számozását: a hullámhossz értékek növekvő sorrendjében jelöli a csatornákat [5]. A C-sáv utolsó (eddig 59-es), 195900 GHz-es csatornához a 17-es számot rendeli, így haladunk végig a C és L sávokon át, egészen az U sávba tartozó 1625,55 nm hullámhosszú (184425,25 GHz-es) 143-as csatornáig. A 17-es kezdőérték tudományosan nem magyarázható, a csatornaszámok nem vezethetők le sem a névleges középfrekvenciából, sem a hozzá tartozó hullámhossz értékből, de legalább nincsenek negatív csatornaszámok az L sávban.

A flexibilis csatornakiosztás és a 25 GHz-es, illetve a 12,5 GHz-es csatornaszélesség alkalmazása további bonyodalmat jelent a csatornaszámok kijelölésénél. A próbálkozás értelmetlennek tűnik. Ilyen esetben célszerű megmaradni a névleges középfrekvenciára való hivatkozásnál.

D. A fejlesztések szükségessége

A fejlesztéseket az alábbi tényezők katalizálják [8]:

- A sáv szélesség kimerülése: A széles körben alkalmazott fix csatornarács használata és az alacsonyabb sáv szélességű szolgáltatások egy csatornára való transzpondálásával az optikai szálakat gazdaságtalanul használjuk ki. Régebbi transzponder kártyák sok esetben csak 10 Gbps forgalmat visznek át egy 50 GHz széles DWDM csatornán. Egy adott sötétszálon egyre nagyobb kapacitásra lenne szükség, hatékonyan, alacsony költségekkel.
- Merev hálózatok: A jelenlegi hálózatok fix rácskiosztást használnak, azaz merevek, képtelenek alkalmazkodni a dinamikus kapacitásmintákhoz. Rugalmas és skálázható megoldásra, a frekvenciák eddigiektől eltérő felhasználására van szükség.

- Biztonsági fenyegetések: Az optikai szál lehallgatására akkor van lehetőség, ha a nyomvonal kevésbé védett területen halad, tipikusan elosztó csomópontok közelében, illesztési kötésekénél, ahol a kábelek sérülékenyek. Amint az elkövető egy szálát szabadabbá tesz, magát a szálát finoman meg tudja hajlítani, amíg az el nem éri azt a pontot, ahol a fény egy része kikerül a magból és a burkolatból. Ez azonban nem fogja befolyásolni az aktív kapcsolat minőségét. Egy optikai detektort is tartalmazó lecsapoló céleszköz lehetővé teszi a precíz hajlítást arra a pontra, ahol a fény, és ezáltal az adatok is, kinyerhetők. Az optikai kábelek megcsapolását nehéz felismerni, elegendő a fény 1%-át eltéríteni ahhoz, hogy hozzáférjünk az adattartalomhoz, így a művelet nem okoz észrevehető fennakadást a hálózati forgalomban [6]. Az adatlehallgatás és az adatbiztonság megsértésének növekvő kockázata miatt egyre nagyobb az igény a titkosításra a Layer 1 szinten.

E. A transzportkapacitás növelésének kihívásai

Elsősorban az applikációk generálják az egyre nagyobb sávszélesség iránti igényt. Ezek közül napjainkban a mesterséges intelligencia emelkedik ki. Az AI nagy mennyiségű adatáramlást kíván az adatközpontok között, jelenleg ez az alkalmazás a fejlődés hajtóereje.

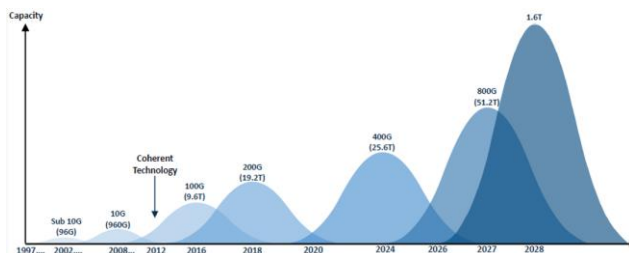
A fejlesztés viszont akkor optimális, ha minél kevesebb elemhez kell hozzányúlni, az alap infrastruktúrát képező optikai kábeleket, és az újrakonfigurálható optikai add/drop multiplexereket (ROADM) pedig nem kell változtatni.

Az adatközpontok energiafelhasználása jelentős, valamint az újabb berendezések számára mindig szükség van rack helyre, így elvárás, hogy a migrációt követően a rendezőszekrényben kevesebb helyet foglaljunk el és a berendezések egy bitre jutó energiafelhasználása is kevesebb legyen, mint a migrációt megelőzően.

A gyártók további kihívása az egy bitre jutó költségeik versenytársakénál alacsonyabb szinten tartása. Mindemellett szolgáltatásaikkal is a konkurenciánál gyorsabban kell reagálniuk a piaci igényekre [8].

F. A szálkapacitás fejlődése

A szálkapacitás fejlődése a spektrális hatékonysághoz vezet. 2002-ben még jellemzően 1 Gbps-os szolgáltatásokat transzpondáltak egy optikai szálra, így annak teljes kapacitása kevesebb volt, mint 100 Gbps. A 400 Gbps-os optikai interfészek használatával ez az érték 25,2 Tbps-ra növekedett. A fejlődést a 3. ábra szemlélteti. A 800 Gbps-os interfészek és a C-sáv mellett az L-sávban működő interfészek kifejlesztésével a teljes szálkapacitás 2027-re várhatóan 51,2 Tbps-ra fog növekedni [8].



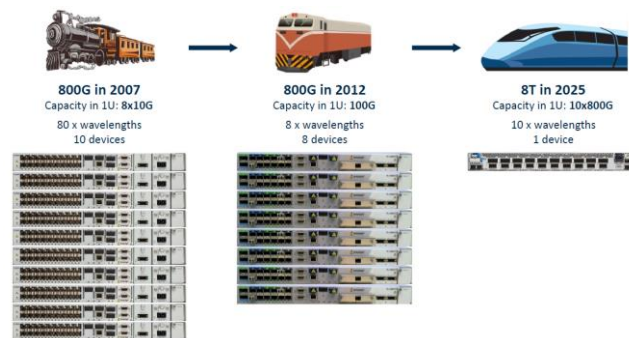
3. ÁBRA - A szál/hullámhossz kapacitás idővonala. A görbékén az egy csatornára transzpondált szolgáltatás tipikus sávszélességét, alatta szögletes zárójelben a sötétszál teljes kapacitását láthatjuk.

Az elmúlt évtizedben a koherens optika túllépett a kezdeti hosszútávú alkalmazásokon. Hivatalosan 2010-ben kezdték alkalmazni a szolgáltatók hálózataiban, mára szilárdan beépült a metróhálózatokba [7].

A szálkapacitás kihasználása a PacketLight termékek fejlődésén is nyomon követhető [8]. (Ld. 4. ábra.)

2007-ben 800 Gbps átvitelét 10 db eszközzel (10U) tudták megoldani, melyek 80 csatornára transzpondáltak egyenként 10 Gbps-os szolgáltatásokat, amivel szinte a sötétszál akkor elérhető teljes kapacitását kihasználták. Ugyanehhez 2012-ben 100 Gbps-os modulokkal 8 hullámhosszra és 8 eszközre (8U) volt szükség. A 800 Gbps-os optikák megjelenésével csupán egy rack unit (1U) magas eszköz 10 × 800 Gbps átvitelét meg tudja oldani. A fejlődés nemcsak helymegtakarítást jelent a rendezőszekrényben, hanem jóval kevesebb lézerre, optikára van szükség, ami hatékonyabb energiafelhasználást eredményez, valamint kevesebb hullámhosszt kell menedzselni, ami az üzemeltetést egyszerűsíti.

G. Rugalmas rácsávolság (Flex grid)



4. ÁBRA - A szálkapacitás fejlődése

A DWDM csatornák átvitelére eredetileg a C sávot jelölték ki, melyet fix, jellemzően 50, illetve 100 GHz széles csatornákra osztottak, melyen az egyes gyártók 80, 88 vagy 96 db 50 GHz széles, illetve 48 db 100 GHz széles csatorna átvitelére alkalmas berendezéseket terveztek. (A C pontban tárgyaltuk, hogy ezen csatornák némelyike átlóg a szomszédos sávokba.)

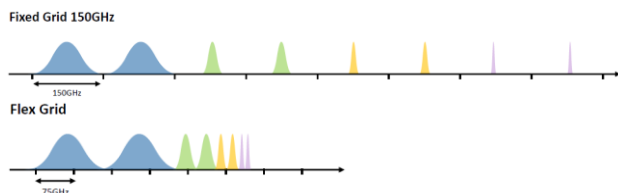
A flexibilis csatornakiosztás azt jelenti, hogy egy optikán belül az igényeknek megfelelően különböző szélességű csatornákat definiálhatunk. Mint korábban említettük, ezt az ajánlás 2012-óta lehetővé teszi. Ez az a titok, ami lehetőséget teremt a 100, 400 és 800 Gbps-os szolgáltatások hatékony átvitelére, az optika maximális kihasználására.

A rugalmas csatornaszélesség implementálásához azonban a meglévő infrastruktúrát frissíteni kell, az alábbiak szerint [8]:

- A passzív mux/demux eszközöknek és a ROADM-oknak támogatniuk kell a változó szélességű spektrumszeleteket.
- A hálózatmenedzsment rendszert át kell tervezni.
- Flex grid képes hangolható koherens DWDM optikai modulokra van szükség.
- Meg kell oldani a védelmi útvonalak (protection paths) kiépítését változó szélességű spektrumszeleteket használó környezetben.

Egy 100, vagy 200 Gbps-os szolgáltatás kényelmesen elfér egy 50 GHz széles csatornában, míg 400 Gbps átviteléhez már egy 100 GHz széles csatornát kell lefoglalnunk, ugyanakkor a jelenleg használt technológia ennek csak a háromnegyedét, 75 GHz-et használ. Egy 800 Gbps szolgáltatás átviteléhez tehát 150 GHz széles csatorna szükséges. Ez utóbbi két rácsávolságot az ajánlás támogatja, ugyanakkor az ipari megvalósításuk eddig nem volt jellemző.

Az 5. ábrán láthatjuk, hogy fix rácsávolság alkalmazása esetén a különböző sebességű szolgáltatások egyidejű használata jelentős pazarlást okoz a sötétszál kihasználásában, míg változó rácsávolság használatával ezek a szolgáltatások összehúzódnak egymás mellé [8].



5. ÁBRA - Spektrum felhasználás rögzített és rugalmas rácsávolság esetén

Amennyiben a hálózat fel van készítve a flex grid támogatására, akkor később, az 1,6 Tbps-os optikák megjelenésekor nem kell majd átalakítani azt: az 1,6 Tbps-es szolgáltatások megférnek a 400 és 800 Gbps-osak mellett.

H. Az L sáv felszabadítása

Az egy optikán átvihető sáv szélesség növelésének másik módja a frekvenciasávok felszabadítása. A DWDM technológia jelenleg jellemzően csak a C-sávot használja, mivel az optikai teljesítőképessége itt a legjobb. A kábel csillapítása ebben a tartományban a legkisebb, így kevesebb erősítőt kell használni, kisebb az OSNR [8].

Az ajánlás a C sávban 48 db 100 GHz széles csatornát definiál. 75 GHz-es fix rácsávolság használata esetén 64 csatornánk lenne, melyeken 64 db 400 Gbps-os szolgáltatást tudunk átvinni, így a C-sáv teljes kapacitása 64×400 Gbps, azaz 25,6 Tbps. (Ld. 6. ábra.) A 800 Gbps-os optikai interfészek megjelenése a sötétszál kapacitását nem javít, mivel a 800 Gbps átviteléhez dupla széles, 150 GHz-es csatornára van szükség, vagyis a C-sáv elérte a kapacitáskorlátját. A 400 Gbps-os optikákat váltó 800 Gbps-os modulok már nem növelik a sötétszál kapacitását, csupán csökkentik a szükséges csatornák, és ezzel együtt a transzeiverek számát, így kompaktabb eszközöket lehet tervezni.

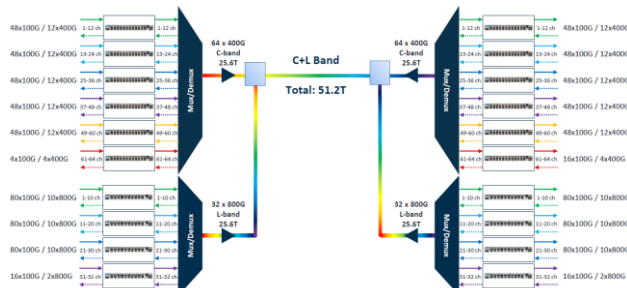
Az L-sáv további optikai spektrumot szabadít fel az optikai szálban a nagyobb kihasználtság érdekében, megduplázva az optikai szál kapacitását.



6. ÁBRA - A C és L sávok kapacitása

Az L-sáv bevonása során azonban számos kihívással kell szembenézni [8]:

- A jelenlegi rendszert fel kell készíteni az L-sáv használatára (ROADM, EDFA, multiplexer, optikai transzeiverek)
- Le kell győzni a C és L sávok együttes használatából adódó optikai korlátokat
- Ki kell fejleszteni az L sávot támogató 800 Gbps-os optikai modulokat.



7. ÁBRA - L band ecosystem

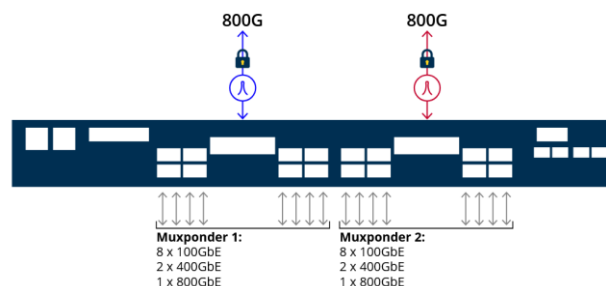
A C és L sáv együttes használatát erősen leegyszerűsítve a 7. ábra szemlélteti.

Látható, hogy a jelenlegi, C sávban működő rendszer C/L splitterek használatával bővíthető az L sáv számára kifejlesztett eszközökkel.

III. PACKETLIGHT NETWORKS

A 2000-ben alapított PacketLight Networks DWDM és OTN berendezéseket fejleszt és gyárt adat-, tároló-, hang- és videósolgáltatások különböző célú és távolságú száloptikai hálózatokon keresztül történő szállítására.

A. 800 Gbps-os transzeiver használatára tervezett PacketLight eszközök



8. ÁBRA - PL-8000M Muxponder

Az MSA megfelelésséggel rendelkező optikai adóvevők felhasználásával nagy portsűrűségű és alacsony fogyasztású DWDM eszközöket fejlesztenek. Egyik legújabb termékük a PL-8000M (8. ábra) 2×800 Gbps-os muxponder, amely sáv szélességtől függően maximum nyolc-nyolc szolgáltatást multiplexál és transzpondál két 800 Gbps-os DWDM csatornára. [9]



9. ÁBRA - PacketLight 10 x 800 Gbps-os transzponder

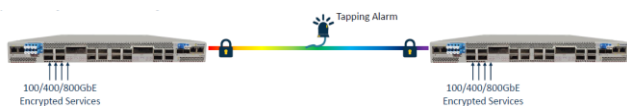
Cikkünk megírásának idején kereskedelmi forgalomban még nem kapható új termékük a 9. ábrán látható 10×800 Gbps-os transzponder [8].

A 7. ábrán láthatjuk, hogy ilyen 8 Tbps-os eszközök line kimeneteinek multiplexálásával hogyan tudjuk maximálisan kihasználni a sötétszál kapacitását.

B. Layer 1 titkosítás

A II.D pontban írtunk a Layer 1 titkosítás szükségességéről.

A PacketLight megoldása az üvegszálon továbbított teljes forgalom titkosítását, vagy csak a kijelölt szolgáltatások titkosítását végzi transzparens módon, alacsony késleltetéssel, a teljes sáv szélesség fenntartása mellett. Érzékeli a kapcsolat teljesítményének romlását, így jelezni tudja az esetleges lehallgatást. (Ld. 10. ábra.) [8]



10. ÁBRA - PacketLight 1

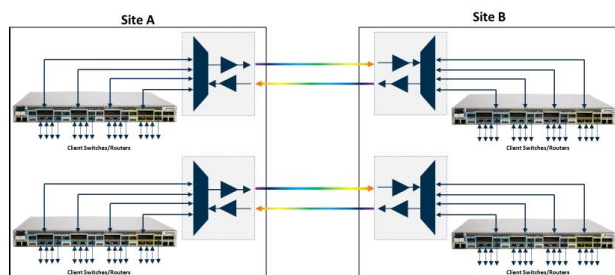
Az L1 titkosítás a legtöbb PacketLight eszköz beépített képessége, amit megfelelő licenc birtokában lehet aktiválni. Műszaki adatok:

- GCM-AES-256
- Diffie-Hellman kulcscsere
- SHA-384 hitelesítés
- Kvantumkulcs elosztás (QKD) támogatása (Ezt a témát egy korábbi cikkünkben ismertettük). [10]

C. Redundancia

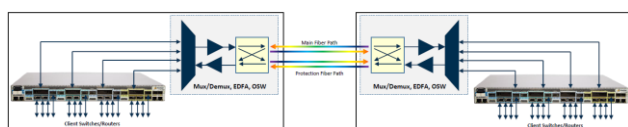
A PacketLight eszközökkel többféle redundancia megoldás biztosítható [8]:

- Teljes hardverredundancia (11. ábra): Az adatokat két külön nyomvonalon haladó sötétszálon visszük át, melyeket saját hardverelemek terminálnak. Az így kialakított rendszer egyszeres hibák ellen védett.



11. ÁBRA – Teljes hardverredundancia

- Optikai adatút védelem (12. ábra): Meghibásodás jóval nagyobb valószínűséggel fordul elő az optikai szálon, mint a DWDM hardvereszközökben. Az optikai adatút védelem erre ad megoldást: optikai switch (OSW) közbeiktatásával megkettőzi és két, különböző nyomvonalon haladó optikai szálra juttatja a jelet (ún. *working* és *protecting path*). Az optikai szál



12. ÁBRA – Optikai adatút védelem (Fiber path protection)

meghibásodását észleli a DWDM eszköz, és 50 ms alatt átkapcsol a tartalék útvonalra. Ez a megoldás lényegesen költséghatékonyabb, mint a teljes hardverredundancia, és sok felhasználási esetben elegendő megbízhatósági szintet nyújt.

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

Az optikai adóvevők exponenciális fejlődésének eredményeképpen már 400 és 800 Gbps-os modulokkal is tervezni tudunk. Az ilyen sebességű szolgáltatások hatékony átviteléhez a különböző gyártók és termékek kompatibilitásának biztosítása érdekében az ajánlások módosítására is szükség volt – definiálták a flexibilis spektrumhasználatot, valamint felszabadították az L frekvenciasávot a DWDM használatra. Az adatok optikai hálózaton való megbízható továbbítás érdekében Layer 1 titkosításra, valamint megfelelő redundancia kialakítására is szükség van.

RÖVIDÍTÉSEK

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing
GBIC – Gigabit Interface Converter
SFP – Small Form-factor Pluggable
XFP – 10 Gigabit Small Form-factor Pluggable
QSFP – Quad Small Form-factor Pluggable
CFP – C Form-factor Pluggable
AFR – Absolute Frequency Reference
EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier
ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio
MSA – Multi-Source Agreement
QKD – Quantum Key Distribution
OSW – Optical switch

HIVATKOZÁSOK

- [1] ITU-T Recommendation G.692 Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers, 10/1998 (Letöltés időpontja: 2024-12-23.)
- [2] IEEE 802.3, https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.3 (Letöltés időpontja: 2025-02-08)
- [3] ITU-T Recommendation G.694.1 Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 06/2002 (Letöltés időpontja: 2024-12-23)
- [4] DWDM Channel Table: Understanding C-band and L-band <https://www.gezhiphotonics.com/dwdm-channel-table-understanding-c-band-and-l-band-n142-1.html> (Letöltés időpontja: 2025-02-08)
- [5] DWDM C-Band and L-Band channels <https://blog.j2sw.com/equipment-2/dwdm-c-band-and-l-band-channels/> (Letöltés időpontja: 2025-02-08)
- [6] Fiber Tapping and Data Security: Unraveling the Potential Threats and Detection Methods Douglas Clague, December 6, 2023, <https://blog.viavisolutions.com/2023/12/06/fiber-tapping-and-data-security-unraveling-the-potential-threats-and-detection-methods/> (Letöltés időpontja: 2025-03-03)
- [7] Zhensheng Jia; L. Alberto Campos Coherent Optics Ready for Prime Time in Short-Haul Networks, 08 January 2021, IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9318242> (Letöltés időpontja: 2025-03-04)
- [8] Koby Reshef, Getting ready for 800G-1.6T DWDM optical transport, Lightwave + BTR webinar (OnLine, az előadás ideje: 2025-01-29 19:00-20:00, a: https://www.youtube.com/watch?v=Vc_ipmG18UI linken elérhető az előadás felvétele.)
- [9] 2x800G Muxponder <https://www.packetlight.com/products/100g-200g-dwdm-transport/2-x-800g-muxponder> (Letöltés időpontja: 2025-03-15)
- [10] Kvantumkulcs-elosztás a PacketLighttal, Megjelenés: 2024-03-21., <https://relnet.hu/kvantumkulcs-elosztas-a-packetlighttal/>