

Fénytvádközlő eszközök és alkalmazások

Tételkidolgozás

1, 2. Optikai összeköttetés jellemzése, teljesítménymérleg, zajmérleg

Az optikai összeköttetés alapvetően digitális jeleken alapul, ennek minden velejárójával (mintavett, kvantált, véges idejű, véges energiájú stb.). A vevő ismeri a lehetséges jelmintákat (nem kell alakhű átvitel teljesen), cél csak annyi, hogy helyesen döntsön egy adott bitre.

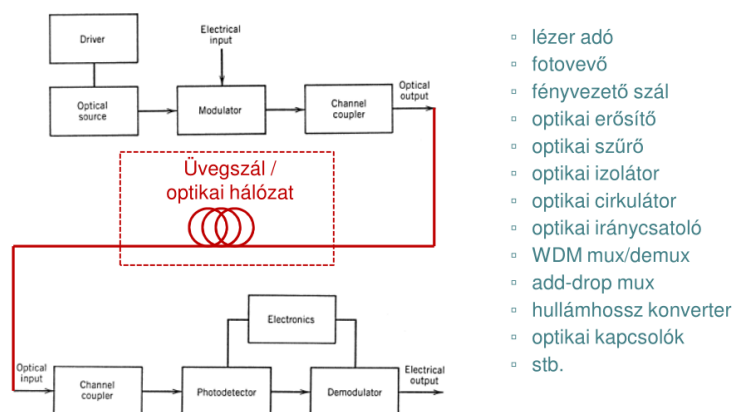
Elképzelhető **moduláció** típusok:

- **ASK** - amplitudó moduláció pl.: OOK, ami a legelterjedtebb, mert egyszerű, olcsó
- **PSK** - fázis moduláció pl.: korszerűbb rendszerekben, koherens vétel kell, drága, bonyolult, de 40 Gbps-hez kell
- **λ -SK** - gyakorlatilag lehetetlen

A moduláción felül szükségünk lehet bizonyos típusú kódolásokra is, amikkel létrehozuk az adott bitsorozatokat. Ezek közül elterjedt az *RZ* és *NRZ* kódolás (*NRZ* - kisebb sávszélesség, nehezebb időzíteni, *RZ* - nagyobb sávszélesség, egyszerű szinkronizálás, nagykapacitású rendszerekben előnyös). Az átviteli minőséget jellemzi a szemábra, a BER és a Q faktor (átváltható).

A *vételi minőséget* meghatározza a kvantum limit, amelynél feltételezzük, hogy az egyetlen minőségrontó tényező a fény kvantáltsága (befolyásolja a vevő kvantumhatásfoka és a beérkező fotonok száma).

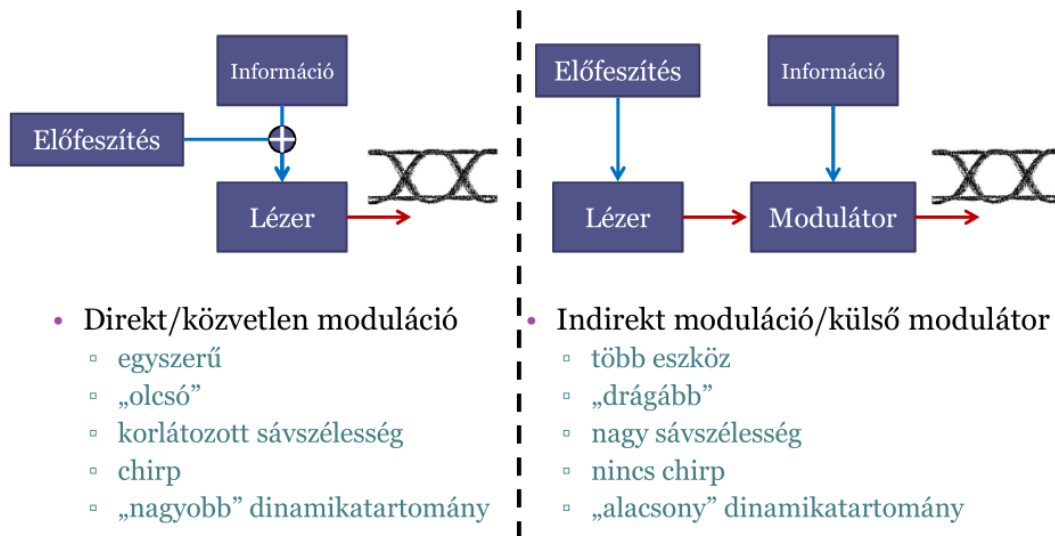
Optikai összeköttetés felépítése



Az **optikai adó** felépítése többféle lehet, ám egyetlen közös pontjuk biztos mégpedig, hogy a vezérlésük elektromos úton történik. Ez felelős az E/O átalakításért. Távközlésben kizárólag lézereket használnak ilyen célra ezek lehetnek (Fabry-Perot, DFB, VCSEL stb.).

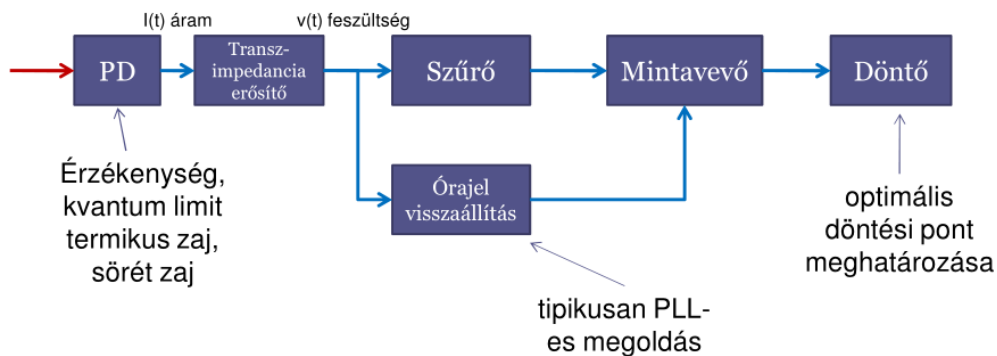
Jellemző paramétereik - *kimeneti optikai teljesítmény, küszöbáram, átalakítási hatások, hullámhossz, vonalszélesség, RIN, modulációs sávszélesség, torzítás, kioltási tényező* stb.

Optikai adó felépítése



Hasonlóképpen az **optikai vevő** esetében is ismertek hasonló paraméterek - PIN/APD, kvantumhatásfok, érzékenység, hullámhossz tartomány, detekciós sávszélesség, zaj, telítési teljesítmény, sokszorozási tényező (APD-nél) stb. Mivel az optikai vevő felelős az O/E átalakításért ezért, itt is értelmezhető a kvantumhatásfok csak fordított irányban. Ez az egyik legfontosabb paramétere az optikai vevőknek. Ennek értéke általában $R=0.5, 0.6, 0.7$ értékek.

Optikai vevő felépítése



IMDD – Intensity Modulation & Direct Detection

Mint minden más adatátviteli közegen, itt is megjelennek bizonyos jelenségek, melyek az átvitt jel minőségét rontják, ezek az üvegszálon, mint közegben lehetnek - csillapítás, diszperzió, zaj, nem-linearitás. Ezek segítségével jellemezhetünk egy optikai összekötést a következőkkel: **SNR, BER, teljesítménymérleg, zajmérleg, diszperziós mérleg, időmérleg** stb.

Optikai teljesítménymérleg

Az optikai teljesítménymérleg felállításakor végigvesszük, hogy az összeköttetésünkben az egyes komponensek milyen teljesítmény-csökkentő (csatlakozó csillapítás, szálcsillapítás stb.) vagy esetleg teljesítmény növelő hatásokkal (EDFA, Raman erősítők) rendelkeznek. Ezeket dB értékekben adjuk meg és így végig tudjuk követni az átviteli úton a teljesítmény viszonyainkat. Pontosan tervezhetőek lesznek a szakaszok hosszai és kapacitásai.

Az **adó** oldalán tudhatjuk az **optikai teljesítményt**, amit az adónkból képesek vagyunk hatásosan kiadni (lézer teljesítmény), majd ezt követően a lézert hozzá kell csatolni az optikai szálhoz (illesztési pontatlanság, csatlakozó csillapítása, becsatolási veszteségek), majd végighaladunk az optikai szálon (1550 nm-en 0.2 dB/km) ez szintén csillapítja a jelszintet, a vevőegységbe szintén becsatoljuk a fényt (illesztési pontatlanság, csatlakozó csillapítása, becsatolási veszteségek) és elvégezzük az O/E átalakítást (**kvantumhatásfok**, zaj, lezárás illesztettsége, **érzékenység**) és az így kapott elektromos jelet feldolgozzuk. Általában az optikai átviteli úton hagynak mindig egy úgynevezett **rendszerterhelést** (6 dB), amely arra szolgál, hogy kisebb meghibásodás esetén még működésképes legyen a hálózat (értsd nem centizzük ki a rendszert).

Optikai zajmérleg

Az optikai teljesítménymérleg figyelemmel kísérése mellett fontos az optikai zajmérleg figyelése is, hiszen célunk a vételi oldalon a lehető legjobb döntés meghozatala. Ezért célunk, hogy maximalizáljuk az OSNR-t a vételi döntő áramkörnél.

Adó oldali SNR tényezők:

- Lézer zaja (RIN) - összeköttetés elején dominál
- Optikai erősítők zaja (spontán emittált zaj) - EDFA, spontán emittált zaja jelentős, $F=3-5$ dB - Raman, elosztott erősítés, keskeny erősítési sáv, akár negatív zajtényező ???
- Háttérsugárzás (szabadtéri optika)
- Kaszkádosított erősítők: előnye - javul a teljesítménymérleg, hátrány - romlik az OSNR; gyakorlatilag hiába nagy a jelszintünk, ha 5 dB az OSNR :)

Vevő oldali SNR tényezők:

- Lézer zaja (RIN) [-140 dB / Hz]
- Optikai erősítők spontán zaja (EDFA)
- Fotodióda zaja, van termikus zaj az elektromos tartomány miatt - az összeköttetés végén dominál
- Sötétáram, sörétzaj - oka: a fotodióda árama teljes sötétség esetén sem nulla - oka: a fotonok kvantáltak
- APD esetén a sokszorozódási zaj (sztochasztikus folyamat az erősítés)

Általában az elfogadható OSNR értéke legalább 15 dB.

Optikai diszperziómérleg

Számítása az előzőekhez hasonlóan a teljes fényúton szükséges. A diszperzió jelensége nem más, mint, hogy az üvegszálon, mint EM hullámvezetőn az egyes hullámhosszú komponensek más fázissebességgel haladnak. Ez vezet ahhoz, hogy időben "elkenődik az impulzusunk", egyfajta lineáris

torzítást szenved. Ha ez a szétcsúszás eléri a bitidő 1/4 részét akkor már szükségünk lesz valamilyen diszperzió kompenzáló egységre. Ilyen lehet például a + / - diszperziójú optikai szál. Akkor problémás a diszperzió kompenzálás, ha nem csak egyetlen hullámhosszon kommunikálunk (WDM rendszerben), mert itt óhatatlanul meg fog jelenni maradék diszperzió, mivel az összes csatorna jelét nem lehetséges ugyanazzal a diszperzió kompenzáló szállal javítani (a diszperzió alapjelenségéből következően). Ez a kompenzálási módszer azonban csak a kromatikus diszperzió ellen megoldás.

Diszperziós jelenségek felosztása:

- **Módus diszperzió** - az üvegben, mint elektromágneses hullámvezetőben adott szálkeresztmetszet mellett nem csak egyetlen módus képes terjedni, hanem több is - megoldás lehet rá az egymódusú szál (SMF), ami olyan keresztmetszetű, hogy csak egyetlen módus képes terjedni benne, vagy a GI szál alkalmazása
- **Kromatikus diszperzió** (előzőekben tárgyalt)
- **Polarizáció módus diszperzió** - a hullámvezető szál elliptikus keresztmetszetéből adódóan a a H és V polarizációs síkokban terjedő hullámok más-más sebességgel terjednek

Diszperzió mérleg - kromatikus

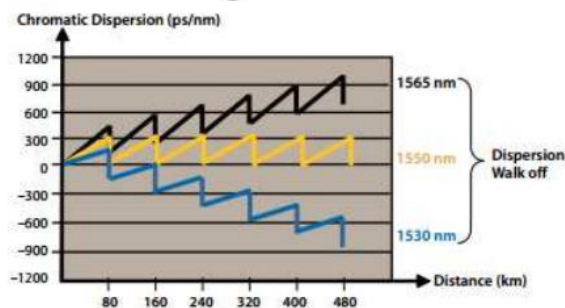
- Korlát:

$$\Delta T = |D \cdot \Delta\lambda \cdot L| \Rightarrow 4BL|D|\Delta\lambda < 1$$

=> max. összeköttetés hossz:

$$L_{\max} = \frac{1}{4B|D|\Delta\lambda}$$

Diszperzió mérleg - kromatikus



3, 4. Többcsatornás rendszerek, optikai nem-linearitás

A sávszélesség igények növekedésének köszönhetően, az egycsatornás rendszerek felől elindult a fejlődés a többcsatornás rendszerek felé. Adódott a kérdés, hogy miként lehetne adatfolyamokat elválasztani egymástól (rádiófrekvenciás megoldásokat hívjuk segítségül) és párhuzamosan küldeni őket. Ezek a nyalábolási formák a következők:

- **TDM** - időosztásos nyalábolás, jelenleg a GPON-ban használják az egyes felhasználók adatainak elválasztására
- **SCM** - alvivős multiplexálás, RoF rendszerekben alkalmazzák
- **SDM** - térosztásos nyalábolás, másik üvegszálon vezetjük a másik csatornát
- **WDM** - hullámhossz osztásos nyalábolás, egyszerre több hullámhosszon kommunikálunk
- **OCDMA** - optikai kódosztásos elválasztás, nehézkes mivel optikában unipoláris jelek vannak (vagy van fény, vagy nincs), amiknek a korrelációs tulajdonságuk rosszabb, mint a bipoláris (+ -) jeleknek

Részletesen a WDM rendszerrel foglalkozunk, hiszen ez a legelterjedtebb. Több típusa is van, ezek a WDM, CWDM, és DWDM.

	WDM	CWDM	DWDM
<i>Hullámhosszak száma</i>	2-3	8-16	40-80
<i>Csatorna távolság</i>	240 nm	20 nm	0.8 / 0.4 / 0.2 nm
<i>Csatornakapacitás</i>	2.5 Gbps	2.5 Gbps	10 Gbps
<i>Teljes kapacitás</i>	Néhány Gbps	20-40 Gbps	100-1000 Gbps
<i>Ár</i>	Alacsony	Közepes	Drága
<i>Alkalmazási terület</i>	PON (fel-le irány)	Városi hálózatok	Gerinchálózat

A továbbiakban koncentrálnunk a DWDM hálózatokra. Előnye ennek a fajta nyalábolási technikának, hogy nem szükséges optikai szálát cserélni (földmunkákat végezni, felbontani stb.), hanem csak a végeszközöket és esetleg az erősítőket kell kicserélni. Ezáltal viszont drasztikus sávszélesség és adatsebesség növekedést érhetünk el. Új csatornát bevinni a rendszerbe nem drága, dinamikusan változtatható a sávszélesség, illetve a csatornák. Nem utolsó sorban, sokkal kevésbé érzékeny az időzítésre, így sokkal nagyobb hatótávolságú, mint például a TDM. Több új eszközt is kell természetesen integrálni a hálózatba (MUX, ADMUX, DEMUX stb.), ezért az átállás azért nem teljesen zökkenőmentes.

Mivel a csatornáink igen közel vannak egymáshoz, ezért sokkal jobb tulajdonságú sávszűrőket kell használni, ez pedig költséges. Továbbá nem lesz elhanyagolható a csatornák közti áthallási jelenség sem, amivel egycsatornás rendszereknél nem kellett foglalkozni.

Követelmények az **optikai adó-oldalon**:

- Lézer: DFB keskeny vonalszélességű, magas SMSR, alacsony RIN
- Modulátor: csak külső modulátor (EA vagy MZI)
- Multiplexer: keresztáthallás alacsony legyen, kis beiktatási csillapítás

Követelmények az **optikai vevő-oldalon**:

- Demultiplexer: az egyes csatornák szétválasztása megfelelő módon, meredek karakterisztika

- Detektor: nagysebességű (alacsony parazita kapacitás), érzékenység megfelelő stb.

Optikai nem-linearitás

Az optikai hullámvezető, mint EM hullámvezető lineárisnak tekinthető egy adott optikai teljesítményszintig (néhány mW-ig). Mivel a WDM rendszerekben az összes hullámhossz egyetlen optikai szálon terjed ezért, ezt a néhány 10 mW-os teljesítmény küszöböt könnyen elérhetjük (80 csatorna, csatornánként 1 mW - már rögtön 80 mW) és ekkor olyan nem-lineáris optikai jelenségek jelentkeznek, amelyek akadályozhatják, de speciális esetekben segíthetik is az átvitelt.

Optikai nemlineáris jelenségek:

1. **Nem-lineáris szórás** - két különböző hullámhosszú optikai jel között fényt teljesítmény csatolódik át
 - a. **Stimulált Brillouin szórás**, hatásmechanizmus: **optikai fotonok** és **akusztikus fononok** közti kölcsönhatás - teljesítmény szint, ahol jelentkezik: minimum **100 mW**
 - b. **Stimulált Raman szórás**, hatásmechanizmus: **kisebb hullámhosszú** csatornák felől energia adódik át a **nagyobb hullámhosszú** (kisebb energiájú) fotonok felé, a különbség pedig fononok formájában távozik - teljesítmény szint, ahol jelentkezik: **minimum 1 W**
2. **Nem-lineáris fázismoduláció** - harmadrendű nem-linearitás (keverés)
 - a. **Four-Wave-Mixing**: Négyhullám keverés - **optikai csatornák** közötti kölcsönhatás következtében **intermodulációs** termékek jelennek meg a **csatornák** különbségi és összegfrekvenciáin (**átlapolódáshoz** vezet) - koherens folyamat N^3 -el arányosan nő a termékek száma (N csatorna esetén) - teljesítmény szint, ahol a jelenség jelentkezik: **10mW** - megoldás **nem egyenletes csatorna-kiosztás**, így megfelelő helyre kevered(!het!)nek az intermodulációs termékek
 - b. **SPM** és **XPM**: **ön-** és **kereszt-fázis** moduláció - kiváltó ok: optikai Kerr hatás, avagy a törésmutató intenzitásfüggő, ez pedig fázismodulációt okoz - SPM egycsatornás rendszerben, XPM többcsatornás rendszerben - teljesítményszint, ahol a jelenség jelentkezik: **10 mW** - alapvetően intenzitás-moduláció okozta fázismoduláció mindkettő

Az optikai nem-linearitásoknak sok hátrányos tulajdonságuk van, azonban bizonyos jelenségeik segítenek minket a tisztán optikai jelfeldolgozás egy-egy megoldásához, tehát nem érdemes rá úgy tekinteni, mint egy haszontalan káros jelenség, ami csak azért van, hogy nehezítse az életünket.

5. (D)WDM hálózatok

A WDM hálózati topológiák és hierarchiáknak több absztrakciós rétegük van. Az alsó réteg a fizikailag létező "fényút", amely minden két csomópont között húzódik. A második réteg a logikai réteg, amely megmutatja, hogy két nem közvetlen optikai kapcsolattal rendelkező csomópont milyen módon kapcsolható össze. A topológiák, amiket használnak: **csillag, fa, gyűrű, háló, szövevényes**. A valóságban általában sohasem éppen egy fajta hálózati topológiát követnek, hanem leginkább **szövevényes-gyűrűs** hálózatokat találhatunk.

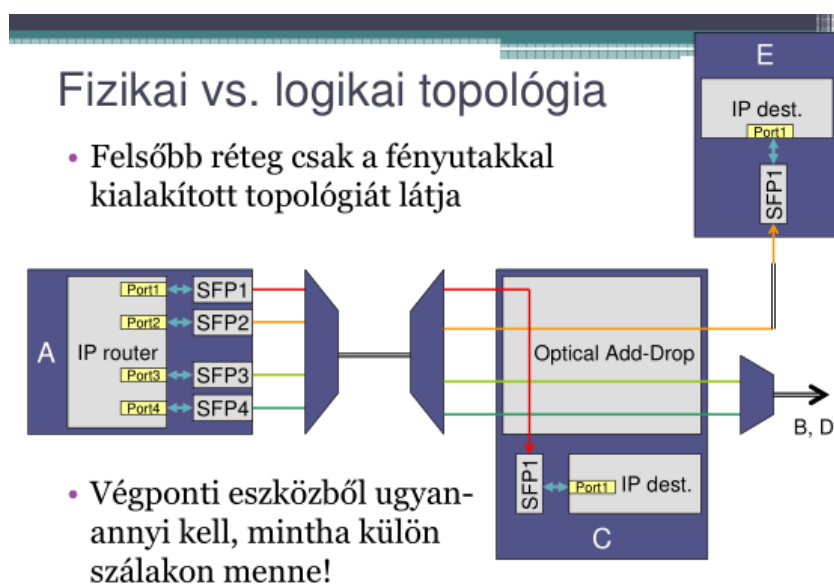
A WDM szövevényességét tovább bonyolítja, hogy itt egyetlen fényszálon már több hullámhosszt is továbbítunk, ezért szükséges komoly menedzselése a hullámhosszaknak és a kiosztásnak. A logikai topológia **bármikor átalakítható** (rugalmas kapacitású hálózat) a **kívánt sáv szélesség igényeknek** megfelelően (nyalábolás). Egy további felosztás a következő:

- **Pont-Pont WDM:** olyan csomópont, ahol történik O/E/O átalakítás (lehetőség van elektromos tartománybeli jelfeldolgozásra, 3R is!)
- **Tisztán optikai WDM:** a csomópontban csak kapcsolás történik (nincs O/E/O)

Az egyes hálózati szegmensekben előírnyozott, hogy milyen fizikai topológiát használjunk:

- **LAN: csillag topológia,** nincs redundancia, kevés hibavédelem
- **Metro-MAN: egy/kétirányú gyűrűs topológia,** öngyógyító struktúrák, redundancia 1x meghibásodásra, szakaszvédett megoldások több szálon
- **Városi/Helyi: háló vagy szövevényes mesh** struktúra, több redundancia, nagyobb hibavédelem, flexibilis, részleges háló általában

A logikai és fizikai topológia közti fő különbséget az adja, hogy míg a fizikai topológia effektíve azt jelenti, hogy melyik vas melyikkel van összekötve (fényszállal), addig a logikai topológia az, ami a felsőbb hálózati rétegekből látszik (melyik elemen keresztül melyiket vagyok képes elérni, nem érdekel, hogy milyen elemeken keresztül, csak az, hogy el tudok-e jutni oda egyáltalán).



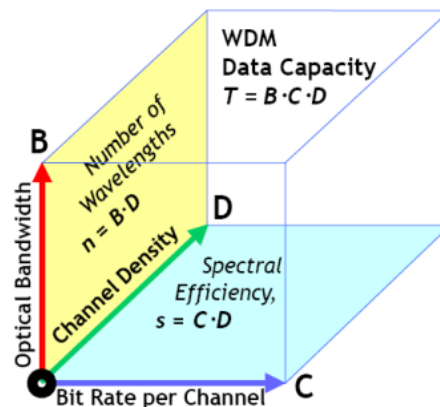
Egy WDM hálózat megtervezésekor, külön figyelmet kell fordítani a **fizikai** és egyszeresmind a **logikai** topológia felépítésére. A logikai topológia segítségével állíthatjuk **dinamikusan** a **sávzélesség**-igényesebb csomópontok **elérési útjait**, de ehhez persze szükséges a fizikai topológia kapacitása. Az **útvonalválasztást** és a **csatornakiosztást** is ekkor kell kialakítani, jóllehet ez később újra konfigurálható. A **hullámhossz kiosztást** és a az **útvonalválasztást** természetesen korlátozza az, hogy az egyes utakon milyen **csillapításra** és egyéb **minőségrentő** tényezőkre számíthatunk. Létrejöhet blokkolás is a hálózatban, ha nem ügyesen sáfárkodunk az útvonalakkal és a csomópontok erőforrásaival. Ráadásul a **hullámhosszak összerendelését** és **leválasztását** valamilyen módon menedzselni kell, mivel senki nem akarja, hogy más felhasználó adatcsomagjai kerüljenek hozzá emiatt (kivéve, az NSA).

6. Nagysebességű (10G+) összeköttetések, nem koherens módszerekkel

Mint mindig, most is mi a célunk? Kapacitás növelése, sávzélesség növelése, hogy a júzer nézhesse 4K-ban a kecskepornót. A jelenlegi kapacitás viszonyok a gerinchálózatban:

Cél: Kapacitás növelése

- Jelenlegi rendszerek
 - Optikai sáv
 - EDFA => C sáv, ~1530~1565nm
 - 35nm
 - Csatorna távolság
 - 0.8nm, 100GHz
 - 0.4nm, 50GHz
 - (0.2nm, 25GHz)
 - Csatornák száma
 - 40 (100GHz/0.8nm)
 - 80 (50GHz/0.4nm)
 - Egy csatorna adatsebessége
 - 10Gbps/csatorna
- => 80*10Gbps=800Gbps/üvegszál



Hogyan lehetne **növelni** a kapacitást?

- Optikai vivők számának növelése
 - Optikai sáv növelése
 - Csatornatávolság csökkentése
- Egy csatorna kapacitásának növelése
- Egyéb fizikai hatások kihasználása (pl. polarizációs síkok)

Csatornák számának növelése:

ne csak a C-sávot, hanem használjuk az **L-sávot** is, **nagyobb** lesz a **kromatikus diszperzió**, új **erősítők** kellene (EDFA nem tudja az L-sávot erősíteni)

Sűrűbb csatorna kiosztás:

csatornák közti távolság legyen **25 GHz**, így akár **160 csatorna** lenne a C-sávban, sokkal **meredekebb szűrőkarakterisztikák** kellene (szűrőcsere drága!)

Csatornánkénti adatsebesség növelése: 10G, **40G**, 100G

más modulációs formákat kellene használni, úgy, hogy a jelenlegi rendszerrel kompatibilis maradjon minden (10G), problémás az együttműködés a különböző modulációk és bitsebességek miatt (OSNR, diszperzió kompenzálás erősítés stb.)

40G problémák:

- érzékenyebb az **OSNR**-re (4x)
- érzékenyebb a **PMD**-re (4x)
- jelentősen érzékenyebb a **kromatikus diszperzióra** (16x)
- a nagyobb frekvenciasáv miatt sokkal érzékenyebb a **nem-linearitásokra**

40G megoldások:

- alacsonyabb teljesítmény - kisebb **nem-linearitás**
- **RZ-kód** - szintén nem-linearitás miatt
- új modulációs formák - nem elég az **OOK**, **kell FEC is**

	10G → 40G	40G → 100G
Szükséges OSNR	6dB-vel több	~4dB-vel több
CD tolerancia	1/16 (4km -> 65km SSMF, NRZ)	<1/6 (<1km -> 4km, SSMF, NRZ) (2.5km -> 15km, SSMF, RZ-DQPSK)
Nemlineáris hatások	iFWM & iXPM (domináns SSMF-ben) XPM (elsősorban 10G OOK csatornákkal)	Csatornán belüli hatások korlátozzák a teljesítményt (Bitek távolsága 2.5x kisebb)
PMD Tolerancia	1/4 (2.5ps <- 10ps, NRZ)	1 / 2.5 (max DGD tolerancia: 21ps -> 8ps, RZ-DQPSK)

Átállás a 40G rendszerre 10G-ről:

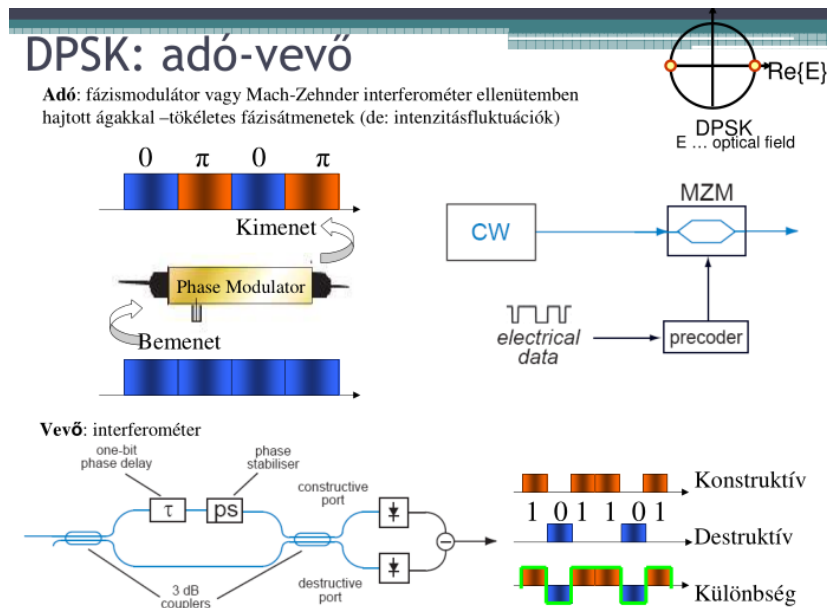
A 10G és 40G DWDM interfész ára 2013-ra konvergált így egyre többen, ha új rendszert telepítenek inkább 40G DWDM rendszerre esik a választás. Már szabványosított SDH-SONET hálózat dolgozik alá (STM-256). Létezik ugyanakkor 100G rendszer is, amely még nem ennyire elterjedt. A modulációs forma, amit itt használni kívánunk ellenálló kell legyen a PMD-nek, kompatibilis kell legyen a 10G rendszerekkel, spektrálisan hatékony kell legyen stb. Az így szóba jövő modulációk: DPSK (10G-40G), DQPK (10G-40G), DP-QPSK (40G+), utóbbi a legellenállóbb a PMD-nek és így a legdrágább modulátor-demodulátor eszközzel járó is.

Hamarosan kiderült, hogy nem lesz elegendő csupán az intenzitás-modulációt használni, így szükséges lenne bevezetni a fázismodulációt is. Optikai tartományban a fázismodulációt intenzitás-moduláció konverzióval oldhatjuk meg, mivel a fotovevő csak fotonszámot "számol". Így az

amplitúdóból egy teljes periódus alatt kiolvasható az egyes fázisokhoz tartozó amplitúdó. Ez nagyon limitált módon működik és nem is igazán használják, ehelyett jött a koherens vétel, mivel másképp nem tudunk a fázisinformációra hagyatkozni.

Még egy próbálkozás volt fázismoduláció előállítására, ez pedig a közvetlen detektálás késleltetővel. Nincs szükség helyi lézere, csak a saját jelet késleltetjük majd hozzáadjuk az eredetihez, ezzel a fázisváltozás meghatározható.

Ilyen adó-vevő struktúrát (DPSK modulátor) létrehozhatunk Mach-Zehnder interferométerrel.

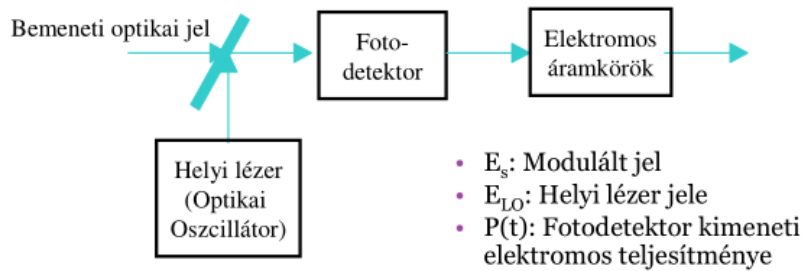


A DPSK modulált jel sávszélessége némileg nagyobb, mint az OOK modulált jelé, ezért erre alakították ki a P-DPSK modulációt, ami annyi újdonságot hoz, hogy 50 GHz-re illesztették a sávszélességet, és a késleltető vonal nem egy egész bitidőnyit késleltet, hanem valamilyen rövidebb időintervallumot (CD toleranciát lehet a késleltetéssel optimalizálni)

7. Koherens optikai rendszerek

Mint mindig, most is a rádiófrekvenciás technikában elterjedt átviteli módszereket veszi át az optika. A bemeneti optikai jelet keverjük egy helyi lézere (LO), majd ezt vezetjük a fotodetektorra, így a bejövő jel fázisát pontosan meg tudjuk határozni. Ráadásul az egyenletek levezetéséből kiderül, hogy hasznos jeljeljesítményt (SNR-t) tudunk növelni, ha a helyi lézer jelét felerősítjük. Nyilván a nem-lineáris hatásokkal számolni kell, de ez minden esetre jó hír (gyökös kifejezés). A keverés a fotodióda nem-lineáris karakterisztikája biztosítja.

Koherens vétel



A jelet a helyi lézer jelével keverjük: a keverést a fotodióda karakterisztikája biztosítja (négyzetes kapcsolat az optikai és az elektromos teljesítmény között)

$$E_s = A_s \exp[-j(\omega_c t + \phi_s)] \quad E_{LO} = A_{LO} \exp[-j(\omega_{LO} t + \phi_{LO})]$$
$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\omega_{IF} t + \phi)$$

A koherens detekció előnyei:

- "optikai" erősítés
- a helyi lézer miatt úgy viselkedik, mint egy ultra-keskeny WDM szűrő, akár hangolható is
- fázis információ megőrzése
- minőségromtó hatások kiegyenlítése lehetséges (CMD, PMD)
- akár polarizáció multiplexálás is...

A koherens detekció hátrányai:

- Összetettebb vevő
- Magas szintű DSP
- Homodin vétel jobb érzékenységet és jobb bithibaarányt biztosít, de ehhez a helyi lézert a bejövő jelhez kell illeszteni (frekvencia és fázis)
- Polarizáció érzékeny működés
- helyi oszcillátor jele és bejövő jel azonos polarizációs állapot legyen
- A bejövő és a helyi lézer polarizációs állapotának illesztéséhez kézben kell tartani a jel polarizációs állapotát
- Aktív polarizációs szabályzás (esetleg diversity vagy polarizáció kapcsoló) szükséges

A koherens vételi módok:

- **Homodin** vétel: információ alapsávba keveredik, helyi lézer frekvencia és fázis-illesztett
- **Heterodin** vétel: információ köztes frekvenciára keveredik le, nincs frekvencia se fázis-illesztettség, így könnyebb előállítani
- **Intradin** vétel: a lézer frekvencia és fázis is majdnem egyezik, az eltérést elektromosan kompenzáljuk.

Koherens vétel létrehozása történhet Optikai PLL-lal, intradin vevővel. A homodin vétel optikában nehezen kivitelezhető általában intradin vétel jellemző. Lehet használni Optikai Costas hurkot is, de amit nem úszunk meg semmiképpen az a valós idejű digitális feldolgozás (DSP). Ezáltal a rendszer

flexibilis is lesz (átprogramozható bármikor), de sokkal bonyolultabb a vevő felépítése. Amit a digitális jelfeldolgozás tud:

- komplex amplitudó előállítás (I-Q jelek)
- AdaptiveEqualizer (ISI kompenzálás)
- PMD kompenzálás
- Órajelvisszaállítás
- Vívó fázisbecslés

Alkalmazott modulációs formák:

- DPSK, QPSK, DP-QPSK
- QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM
- OFDM !!!

Sebesség szerint:

- 40Gbps - (D)BPSK, P-DPSK
 - Vevő általában késleltető + interferrométer
 - NRZ vagy RZ
- 40 Gbps - DQPSK - nem elterjedt, a 10G csatornák felőli nem-linearitások miatt
- 100Gbps - (D)QPSK (NRZ vagy RZ)
 - Digitális koherens rendszer
- 400Gbps - 16QAM(?)

8. Hozzáférési hálózatok, TDM-PON

Mint minden távközlési hálózatnál, ugyanígy az optikai hálózatnál is a legdrágább rész a "last mile", azaz a felhasználó bekötése egy alközpontba. A jövőbeli előírányzott cél nem más, mint hogy minden háztartásban legyen valamilyen optikai szálhoz hozzáférés. Ezt az irányzatot FTTx-nek nevezik, ahol az 'x' lehet: C:Curb, Cabinet, B:Building, H:Home, stb. Mindennek nem más az oka, mint hogy a felhasználó már egyszerre akarja a 4K kecskepornót és a FullHD HUSTLER TV 18+-t és a torrentet tolni maxon, vagyis tehátogy: SÁVSZÉLESSÉGET AKAROOOK! (triplePlay, meg még csomó rohadt buzzWord tartozik még ide). Az optikai szálakat már nem kizárólagosan hang adat átvitelére alakították ki, hanem kifejezetten videó és multimédia átvitelre. Mivel ez a technológia nem megy el a jó öreg koax/réz kábelén, ezért a bekerülési költsége magas, új kábelt, modemet stb.-t kell venni. Mivel a hozzáférési hálózati kábelek a teljes hálózat majdnem 80%-át teszik ki, ezért ezt teljes egészében lecserélni reménytelenül drága, de el lehet kezdeni szép lassan.

Az FTTH rendszerek előnyei felsorolásszerűen:

- Nagy átviteli kapacitás, nagy sávszélesség - kecskepornó, HUSTLERTV és egyéb informatív multimédia források
- Könnyen feljavítható - későbbiekben emelhető sávszélesség
- Könnyen telepíthető (földben és levegőben is vezethető kábelek)
- Teljesen szimmetrikus szolgáltatás - nem ADSL
- Alacsony üzemeltetési és karbantartási költségek

- Nagy távolságok
- Kis átmérőjű, könnyű kábelek
- Nincs elektromágneses kompatibilitási probléma
- Tisztán optikai eszközök - optikailag átlátszó

Topológiailag léteznek Pont-Pont és Pont-Multipont rendszerek is, illetve egy másik csoportosítás szerint aktív és passzív optikai hálózatok (AON, PON). Természetesen hibrid megoldások is vannak csak azért, hogy nehéz legyen az élet. Összefoglalva az egyes topológiai megoldások előnyeit és hátrányait:

Elosztó hálózat vs. P2P

Elosztó hálózat

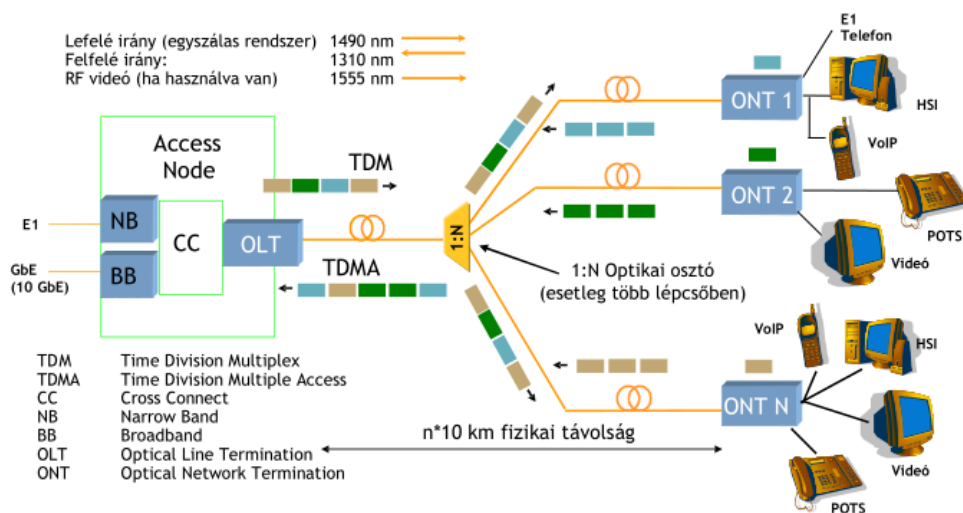
- **Kevesebb optikai szál és aktív interface**
 - Kisebb helyigény a központban
 - Kisebb tápigény
- **Költséghatékony megoldás**
- **A közös letöltési sebesség korlátozó**
- **Aszimmetrikus sebesség**
- **Nehezebb szétválasztás**
- **Összetettebb hibakeresés**
- **Lehallgathatóság => titkosítás**
- **TDM keretszervezés végpontok között (bonyolult ONT)**
- **Passzív optikai osztás miatt nagy csillapítás (32 végpont => 15dB)**

Pont-pont

- **Költségesebb topológia (csillag) => minden felhasználóhoz külön szál**
- **Nagyobb szálbefektetés, de a telepítés („ásás”) költségei azonosak**
- **Több aktív interface**
 - Több helyigény a központban
 - Nagyobb elosztó keretek
 - Nagyobb teljesítményigény
 - Egyszerű, olcsó eszköz a központban
- **Időálló befektetés => Jövő-biztos (legfejlettebb optikai szál architektúra)**
- **Szimmetrikus összeköttetés**
- **Könnyebb sáv szélesség upgrade**
- **Könnyebb szétválasztás**
- **Nincs lehallgathatóság**
- **Csatornák nem zavarják egymást**

A PON technológia:

PON áttekintése



Forgalmak szétválasztása /osztott közegek

Lefelé és felfelé irány szétválasztása: WDM

Az ONT-k forgalmának szétválasztása: TDM

A PON technológiában az egyes **felhasználók adatai TDM** osztásban különülnek el, míg a **fel- és letöltési irányok WDM**-mel különülnek el (*1310 nm UP, 1490-1550 nm DOWN*). Az **adatelosztási mechanizmus** a következőképp történik:

- **lefelé irányban (pont-multipont hálózat)**
 - Az **OLT** kezeli a teljes sávszélességet, időosztásos multiplexálás
 - Az **OLT** által küldött információ minden **ONT**-hez eljut (adatszórás jelleg)
 - Az **ONU** választja ki a saját adatait, csak a neki szóló forgalmat dolgozza fel
 - A „címezéseket” a keretszervezésben elhelyezett fejrészek hordozzák
 - Broadcast jelleg: önmagában nem biztonságos
 - Az **ONU** vevők állandó optikai teljesítményt vesznek, kis költséggel megvalósíthatók
- **felfelé irányban (multipont-pont hálózat)**
 - Az összes ONU egy felfelé irányuló csatornán osztozik
 - Az **ONU**-k csak az OLT irányában kommunikálnak
 - Az **ONU**-k nem érzékelik egymás forgalmát
 - Az **ONU**-k közötti adatforgalom közvetlenül nem megoldható
 - A splitter és az **OLT** közötti szakaszon ütközés léphet fel (Az **ONU**-k adatforgalma ütközhet)
 - Az **ONU**-k nem érzékelik az ütközést
 - **OLT** irányít

Az időosztásos nyálábolás miatt az **OLT** felméri az egyes **ONU**-k távolságát (OTDR), majd ehhez igazítja az **ONU** időzítését. A távolságok különbözősége miatt természetesen az **OLT**-hez érkező jelteljesítmények sem azonosak, ezeket szükséges erősíteni (**AGC** az **OLT**-ben).

A PON szabványok közül az APON, BPON, GPON (ITU-T, EU) és az EPON (IEEE) terjedt el. Röviden az APON-ról: ATM alapú PON, fix hosszú csomagok, késleltetésre érzékeny forgalom szállítására alkalmas, nem hatékony fejléc (5%). BPON ennek a továbbfejlesztettje (nagyobb átviteli sebesség, dinamikus sávszélesség kiosztás). EPON: Ethernet PON, változó hosszúságú adatcsomagok, TDMA feltöltés.

GPON (Gigabit Passive Optical Network) jellemzői:

- ITU G.984.1 - G.984.4 szabvány
- **Ethernet & ATM** protokoll is
- Több sebességű változat (legelterjedtebb: **1.244Gbps/2.48Gbps**)
- **Maximum felhasználószám:** elvi határ max. 256 (gyakorlatban 32-64)
- **Maximum távolság:** 60 km
- Egyes felhasználók közötti távolság különbség: max. 20 km
- **Generic Framing Protocol** (fix hosszúságú és periodikus keretezés)
- Hibajavítás és titkosítás
- **Forward Error Correction:** adó oldalon redundáns bitek, hibajavítás
- Advanced Encryption Standard: információ védelem, 128 bites titkosítási eljárás

A GPON megjelenésének fő oka az volt, hogy sem az APON sem az EPON nem tudta ellátni teljes egészében a hálózati struktúrát (EPON nem tudta a multipont-pont irányt, APON nem tudta kezelni a pont-multipont irányt), ezért egy hibrid megoldás kellett, ez lett a GPON.

A protokoll fejléc csomagolás (**GPON encapsulation**) az egyik ilyen technika, amit beletettek a **GPON**-ba, mivel így a **GPON** adatmezőbe bármilyen protokollt lehetséges beágyazni (akár TDM, akár Ethernet). A felhasználók különböző távolsága miatt ranging megoldás is került a rendszerbe, vagyis az egyes késleltetéseket az egyes felhasználókig az **OLT** feltérképezi és kézben tartja. (fontos, hogy a mérés idejére le kell állítani az összes többi **ONU**-t, hiszen így lesz csak egyértelmű a mérés) Míg az **EPON**-nál a teljesítményszintet az első csomag segítségével mérték meg, a **GPON**-nál az **ONU** és **OLT** közti megállapodás alapján történik a teljesítmény illesztés (**OLT** utasítja az **ONU**-t, hogy milyen Powerrel adjon - persze amíg bírja szusszal).

További probléma, hogy a közeli hullámhosszokon működő **ONU**-k a spontán emisszió által zavarják egymást (nem akarjuk a lézert teljesen kikapcsolni), a baj az, hogy a lézereknek van feléledési ideje, és ezt szintén az **OLT**-nek kell menedzselni (**ONU** elküldi neki a késleltetést), így ha nem küldünk adatot, **ki kell kapcsolnunk a lézert**.

Az egyes felhasználók adatait csak lefelé irányban szükséges kódolnunk (felfelé az **ONU**-k nem látják egymást, 128 AES titkosítás).

A jobb optikai **SNR** érdekében használhatunk mind fel, mind lefelé irányban **FEC**-et (szokásos jó öreg Reed-Solomon blokk-kódoló). Pl.: 1e-12 BER esetén 5dB-vel gyengébb **SNR** is elég, ha van **FEC**.

Értelmezhetjük a QoS osztályokat is optik.dafsdffas.d..das.f..... *Na ezt nem, én nem bocs, én megrögzött QoS definíció ellenes vagyok - olvassátok el a diákat.*

A **GPON** rendszerek hátrányai:

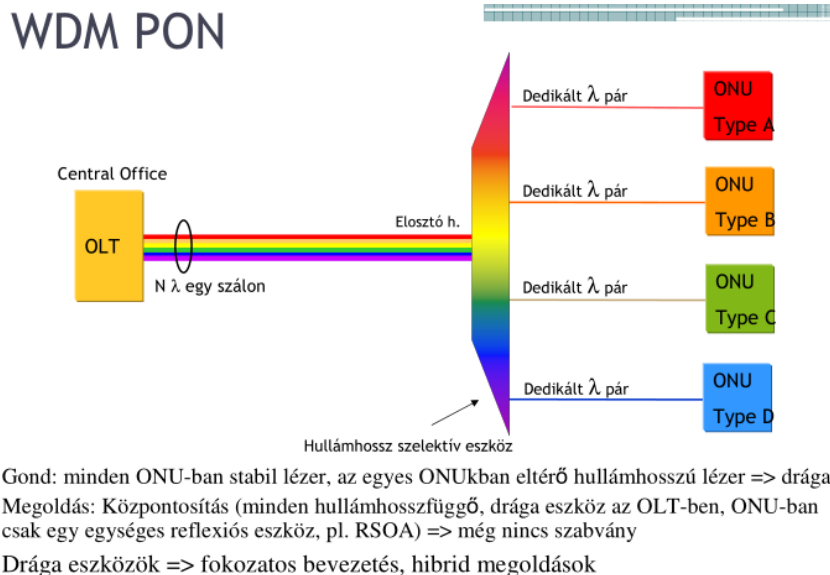
- Felhasználók azonos adási teljesítményének problémája
 - Ha minden felhasználó azonos teljesítménnyel adna, akkor eltérő teljesítménnyel érkeznének meg a központba, és a vevő nem tudná dekódolni a felhasználók jeleit (túl van a vevő dinamika tartományán)
 - Teljesítményállítás protokoll segítségével, amely hasonló jellegű, mint GSM rendszernél az eltérő távolságban lévő felhasználók miatt.
- Felhasználók közötti távolság korlátozott az időzítések miatt
 - Eltérő távolságok esetén elcsúsznak egymáshoz képest a felhasználók által küldött adatcsomagok - OLT tudja kompenzálni egy darabig
 - Védőidő használata
 - Túl nagy távolság esetén akkora lenne az elcsúszás, hogy rendszer nem tudná kezelni, a csomagok átlógnának a szomszéd időzésébe.
- Központ és felhasználók közötti távolság korlátozott
 - nincsen aktív optikai eszközünk, illetve 3R regenerátorunk
- Korlátozott felhasználószám
 - Protokoll miatt (elvi korlát, ennyit tud megcímezni)
 - Gyakorlatban: a teljesítmény miatt.

A **PON** rendszerek továbbfejlesztései:

- SuperPON
 - nagyobb hatótáv >100 km
 - nagyobb osztásarány - 256-2048
 - nem teljesen passzív (vannak erősítők)
- WDM PON

- protokoll független
- több felhasználó
- nagyobb sávzélesség és biztonság
- nincs szabványosítva

Részletesebben a **WDM PON** rendszerről:



Speciális megoldások: WRPON, WSPON, Hibrid WDM-PON, NG-GPON (GPON-WDMPON együttélés)

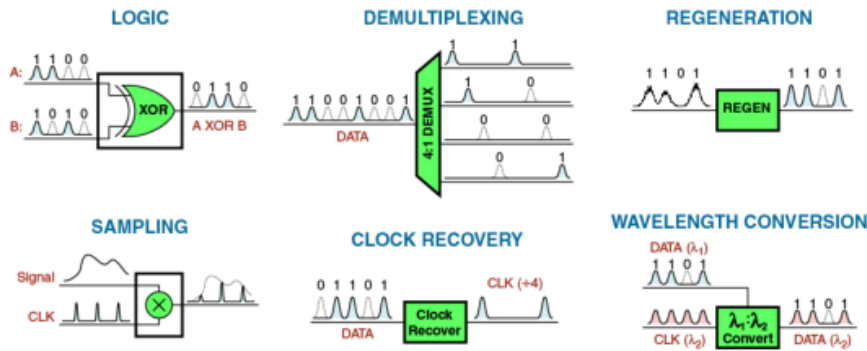
9. Hozzáférési hálózatok, jövőbeli irányok

A probléma meglepő módon nem más, mint hát öhm, tehát, izé, hogy sávzélesség, mobilról Youtube, USTREAM, Snapchat, Instagr.am and shit. Évről évre elég erőteljesen nő a gerinchálózaton átvitt adatmennyiség, egyre több felhasználó van stb. Probléma, hogy ráadásul ez a növekedő forgalom csomósodik, egy napra vetítve 25%-ában az időnek. Minél dinamikusabb hálózatot kell kiépíteni emiatt, hogy átcsoportosíthassuk az erőforrásokat, amennyiben szükséges. Elvileg a kábel kapacitása 100 Tbps, ennek kb. a tizede kihasználható a mai rendszerekkel. A fogyasztás pedig kb. 1W/1Gbps, ami nem sok, de nem is kevés főleg ha 100 Tbps-ra gondolunk.

Amik nagyon hiányoznak az **áttöréshez**:

- **Tisztán optikai** jelfeldolgozás - optikai kapu, nemlineáris jelenségek
- **3R, WC**, optikai logikák, stb.
- **Optikai számítógép**
- **Csomagkapcsolt optikai hálózatok**
- **Rugalmas optikai hálózat** (elasztikus hálózat, SDN)

Megvalósítható feladatok

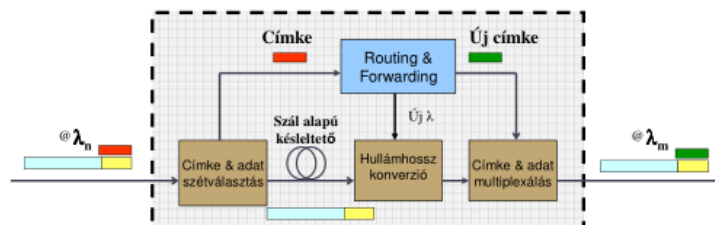


- **Sebesség**
 - Optikai nemlineáris jelenségek => gyorsabb működés, mint a leggyorsabb elektronika
 - Rövid optikai impulzusokat könnyebb létrehozni, mint a rövid elektromos impulzusokat (fs)
- **Ár / Egyszerűség**
 - Nincs drága O-E-O átalakítás a rendszerben
 - Csak a hálózat határán van O-E vagy E-O átalakítás
- RF hatásokra nem érzékeny
- Kis jelvesztés (?)
- DE
- A megvalósítható feladatok komplexitása korlátozott

A cél: **Tisztán** optikai **csomagkapcsolt** hálózat

A tisztán optikai csomagkapcsolt hálózat megvalósításának fő problémái, hogy nincs optikai vezérlésű optikai memória, nincs elég gyors stabil kapcsoló, és tisztán optikai jelfeldolgozás (fejlécek bontása, és felrakása, bitfaragás stb.). Optikai memória helyett megoldás lehet a kapcsolt késleltető vonal (SDL) de ez nem valami rugalmas megoldás. A fejléceket ugyan lehetne külön hullámhosszon küldeni, de akkor ismét időzítési problémák léphetnek fel.

Csomópont funkcionális felépítése



A hybrid (optikai és elektronikai) csomópont

- nagysebességű (pl. 10 Gbit/s) alapsávi csomag-folyam teljesen optikai átvitele
- címke elektronikus feldolgozása a csomópontban (közben a csomag késleltetése)
- a hullámhossz-konverter vezérlése
- új címke előállítás, csomaghoz hozzáadása

A jelenleg **elérhető** megoldás:

Optikai Burst kapcsolás: **azonos célhoz tartó csomagok** esetén előre egy időintervallumra lefoglaljuk a csatornát és burst-öt küldünk. Átvitel után a kapcsolatot lebontják. Nem szükséges optikai memória (nem kell puffert alkalmazni) .

Ismét egy BuzzWord gyűjtemény:

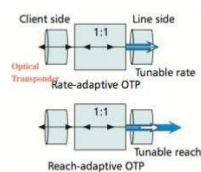
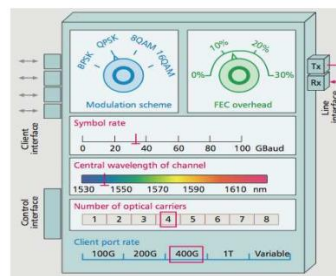
Rugalmas optikai hálózat

A meglévő és a jövőben várhatóan felmerülő alkalmazások támogatására rugalmas és hatékony hálózat szükséges

- Flexibilis spektrum kiosztás, hangolható transceiver-ek, flexibilis OXC
- Flexibilis Optikai Csomópontok
- Útvonalválasztás és spektrum kiosztás megoldása

Software defined network

- Hangolható (rugalmas) transceiver
- A software defined radio-hoz hasonló elv (már megint a rádiós kommunikációból lessük el a módszereket)

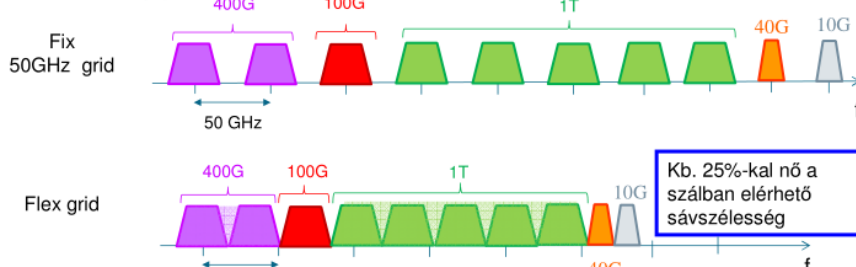


A cél: mindig az elérhető leghatékonyabb erőforrás-kihasználás az adott minőségi feltételek mellett... NEM,NEM, QoS TAKARODJ!

Növelni kellene a spektrális hatékonyságot, magasabb rendű modulációval, sűrűbb csatornakiosztással, kisebb védősávok alkalmazásával, OOFDM-mel stb. Emellett flexibilisre kellene tervezni a csatornakiosztást és lefoglalást (**FlexGrid** kezdeményezés), nem lenne fix a csatornatávolság, és sávokat is ide oda tologathatnánk. De jó lenne...

Flexgrid

- A spektrális hatékonyság növelése érdekében fix csatornatávolság (50GHz/100GHz) helyett flexibilis csatornatávolság menedzsmentet alkalmazunk
 - 6.25 GHz grid
 - 12.5 GHz sáv szélesség lépcső
- A csatorna távolság a csatornán folyó kommunikációnak megfelelően állítható
 - 10G 40G: 25 GHz slot
 - 100G & 200G: 37.5 GHz slot
 - 400G: 75 GHz slot
 - 1T: 187.5 GHz slot



Adaptív rendszer: alkalmazkodjunk - forgalomhoz, minőségromláshoz, szál típushoz, sebességigényekhez stb.

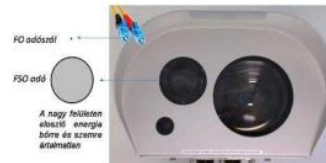
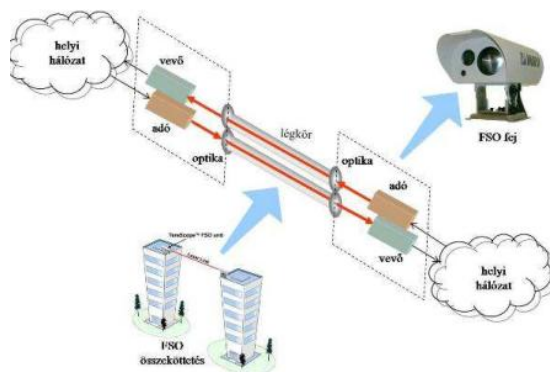
Hogyan: dinamikus modulációváltás, csatorna-újrakiosztás, spektrális szélesség állítása stb.

10-11. Szabadtéri optikai rendszerek

FSO - Free Space Optics

A rövid távolságú néhány **10-100 m** sávszélesség-igényes alkalmazásokhoz ideális technológia lehet az FSO. Leginkább **épületek** közti **kommunikációra** használják tartalék rendszerként, esetleg **mikrohullámú rendszerek mellé**. Előnye, hogy olyan helyeken használható, ahol más **RF kommunikáció tiltott** (pl.: repterek, stb.). **Nehezen lehallgatható, biztonságos** csatorna. **Nem szükséges engedélyztetni**, mivel olyan frekvenciasávban működik, ahol ez nem szükséges (200 THz körül, 1250 nm-en).

Rendszer felépítése

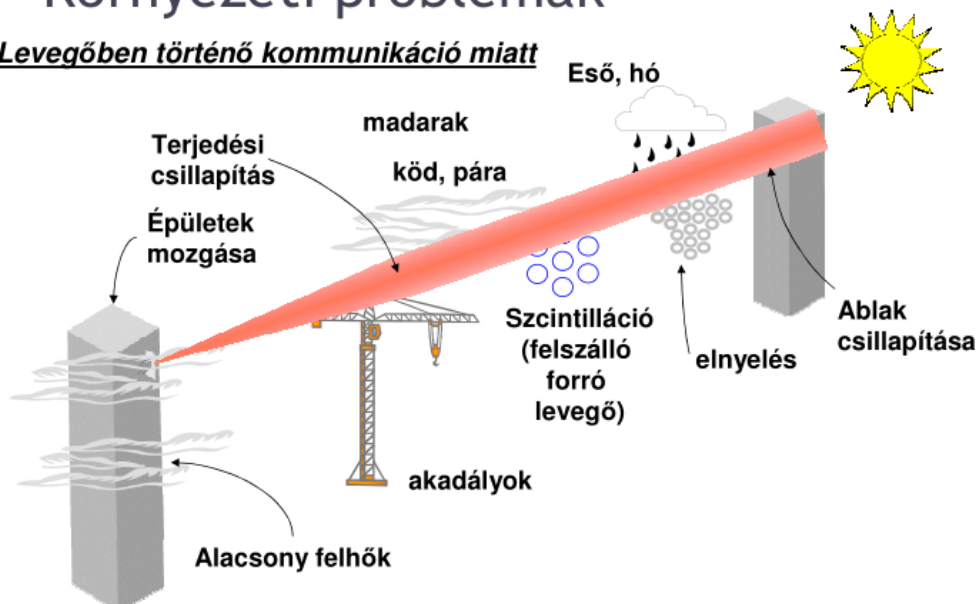


Full duplex

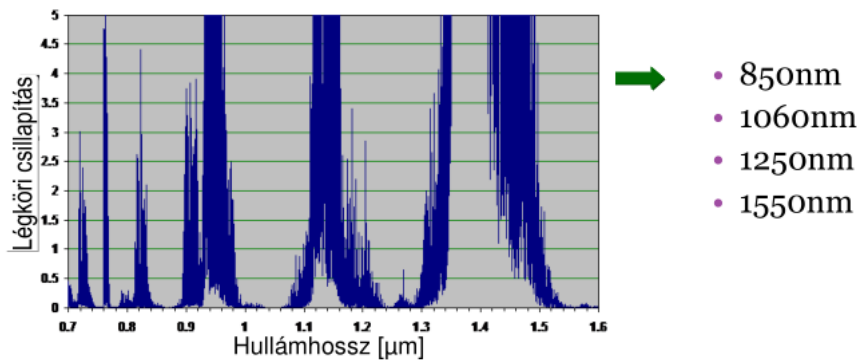
Legtöbbször a terjedési közeg a földfelszínhez **közeli levegő**, ezért ennek a sajátosságaihoz alkalmazkodnunk kell. Amik **tönkretesznek** a kapcsolatunkat:

Környezeti problémák

Levegőben történő kommunikáció miatt



A csillapítás mértéke a levegőben a következőként alakul: (ezért használjuk az 1250 nm hullámhosszt)



	csillapítás	látótávolság	
Tiszta időjárás	0.2 ÷ 1 dB/km	10 ÷ 25 km	Rayleigh szórás
Eső	3 ÷ 9 dB/km	2 ÷ 4 km	Geometriai szórás
Hó	7 ÷ 12 dB/km	1 ÷ 2 km	
Köd, pára	30 ÷ 80 dB/km	200 ÷ 500 m	Mie szórás
Erős köd	≈ 300 dB/km	≈ 50 m	

Éves szinten néhány órára szakad meg a kapcsolat összegezve, jellemzően 500 m feletti távolságú összeköttetéseknel. Azért, hogy ezekben az időkben se legyünk kapcsolat nélkül, be szoktak építeni tartalék mikrohullámú rendszereket. Ez a két megoldás jól kiegészíti egymást, mivel pl.: esős időben a mikrohullámú link használhatatlan, ekkor az FSO link vígan teszi a dolgát, ködben pedig éppen megfordul ez a tendencia.

Az FSO előnyei:

Előnyök

- Átlátszó, protokoll független, nagy sávszélesség
- gyorsan telepíthető, áthelyezhető
- **nem szükséges frekvencia engedély**
 - Fény: szabályozás alá eső frekvencia sávokon kívül esik
- **interferencia mentes működés**
 - Az adatátvitelhez használt lézer fény érzéketlen a környezet elektromágneses zavaraira és nem okoz interferenciát más eszközökben, beléértve a vezeték nélküli összeköttetéseket is.
 - A minimális távolságot és/vagy irányszöveget megtartva az FSO link más lézeres összeköttetésekre sincs hatással még akkor sem, ha sugaraik keresztezik egymást.
- full duplex átvitel
- alacsony egészségkárosító hatás
- **kiemelkedő adatbiztonság**
 - Az alkalmazott lézersugár keskeny és láthatatlan, detektálása a sugáron kívül sem megfigyeléssel sem műszerekkel nem lehetséges.
 - A két végpont között a levegőben a sugár megcsapolása a gyakorlatban nem megoldható vagy azonnal észlelhető.
 - A lézerfej megfelelő elhelyezésével illetve takaró panel alkalmazásával a sugár célhelyszínen túli terjedése megakadályozható.
 - Még a sugárhoz való hozzáférés esetén is precízen beállított, állványra szerelt lehallgató berendezésre lenne szükség, amely ráadásul csak az egyik irányba folyó adatokat tudná elfogni.

Fontos, hogy az FSO lézerek nem károsak a környezetre, illetve, ha esetleg belenézünk közvetlen közletről az FSO lencsébe akkor is 10 másodpercig nem okoz maradandó károsodást a retinában. Nem látható fényű tartományban működik az FSO! Ilyen magas hullámhosszú sugárzás keresztülmegy a

retinán, és nem okoz ott károsodást. Ráadásul magasabb hullámhossz = kisebb fotonenergia! Az FSO-val elérhető sebességkategóriák a következők:

- **alacsony** (1-10 **Mbps**)
- **közepes** (10-100 **Mbps**)
- **nagy** (100-2,5 **Gbps**; WDM 10 **Gbps**; teszt: 160 **Gbps**)

VLC kommunikáció:

Erről nem vagyok hajlandó írni, már olyan rohadt unalmas...

The End