

Flexibilis leágazó és kapcsoló eszközök a DWDM hálózatokban

BABICS EMIL, HORVÁTH A. RÓBERT, MESKÓ ÖRS

Magyar Telekom, PKI Távközlésfejlesztési Intézet
{babics.emil1, horvath.robert, mesko.ors}@t-com.hu

Kulcsszavak: DWDM, tisztán optikai hálózat, optikai kapcsoló, leágazó multiplexer, optikai cross-connect, ROADM

Az IP alapú csomagkapcsolt hálózati forgalom nagyarányú bővülése miatt egyre nagyobb szükség van megbízható és a hálózati változásokat (terhelés változás, berendezés-, kábelhibák stb.) egyre inkább figyelembe vevő optikai hálózatra. A meglévő DWDM hálózatokat olyan rugalmas optikai leágazó és kapcsoló eszközökkel kell kiegészíteni, bővíteni, amelyek alkalmasak az automatikus optikai szintű kapcsolásra. Ezzel egyrészt tehermentesíteni lehet a felsőbb rétegeket (L2, L3), valamint egy rugalmas optikai szintű hálózati réteget tudunk kialakítani. A cikk összefoglalja a DWDM hálózatok jelenlegi berendezéseit, tulajdonságait, majd pedig rámutat a tisztán optikai hálózat (AON) előnyeire és bevezethetőségére. Emellett részletesen bemutatja a különböző optikai kapcsolók technológiáját, valamint az ezekkel kialakítható berendezések (ROADM, OXC) tulajdonságait.

1. Bevezetés

A távközlési hálózatokban egyre nagyobb jelentőséggel bír a DWDM technika, mivel a rohamosan növekvő sávszélességet igénylő szolgáltatások, mint például az IPTV, a VoD és egyéb multimédiás felhasználások a gerinchálózatban olyan mértékű forgalmat generálnak, melyet nem lehet e technológia nélkül hatékonyan kiszolgálni.

DWDM átvitelt jellemzően a maghálózatokban alkalmaznak, ahol az IP és egyéb hálózati platformok számára biztosít nagykapacitású transzportot.

A DWDM hálózatok kialakításának alapvető motivációi az alábbiak lehetnek:

- A szolgáltatók az elmúlt időszakban megépítették optikai kábelhálózatukat, melyekben a fényvezető szálak kezdenek elfogyni. Mivel az új optikai kábelek építési költsége magas, ezért a meglévő kábeleken kell az átvihető kapacitást növelni.

- A jelregenerálást több párhuzamos rendszerben külön-külön meg kell oldani, ami növeli a költségeket, azonban DWDM alkalmazásával ezt csak egyszer kell megtenni.

A DWDM hálózatok építőelemei

Az OA – optikai erősítők feladata az optikai kábel csillapítása által okozott jelteljesítmény-csökkenés kompenzálása.

OTM – optikai végződő multiplexer, mely a DWDM rendszer kapacitása szerinti különböző hullámhosszúságú optikai jelet egyetlen vonali jellé multiplexálja, illetve másik irányban demultiplexálja.

Tipikusan gyűrűstruktúrában az optikai csatornák leágazására az OADM – optikai leágazó/beiktató multiplexer szolgál. Ezeknél a berendezéseknél a leágaztatható optikai csatornák száma és hullámhosszválasztéka korlátozott. A korszerűbb, rugalmasan konfigurál-

Rövidítések

AOM	Acousto-Optical Modulator
AON	All Optical Network
ASON	Automatically Switched Optical Network
cl.MUX	Colourless Multiplexer
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DEMUX	Demultiplexer
FEC	Forward Error Correction
FXC	Fibre Cross-Connect
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
IP	Internet Protocol
L2	Layer 2 (az OSI modellben)
L3	Layer 3 (az OSI modellben)
MEMS	Micro-Electrical Mechanical System
MUX	Multiplexer
MZI	Mach-Zender Interferometer
OA	Optical Amplifier
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OTM	Optical Terminal Multiplexer
OXC	Optical Cross-Connect
PLC	Planar Lightwave Circuit
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
VOA	Variable Optical Attenuator
VoD	Video-on-Demand
WB	Wavelength Blocker
WBXC	Wavelength-Band Cross-Connect
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WIXC	Wavelength Interchanging Cross-Connect
WSS	Wavelength Selective Switch
WSXC	Wavelength Selective Cross-Connect

ható leágazó multiplexerekben (ROADM) ilyen kötöttségek nincsenek.

Az *OXC – optikai cross-connectek* a DWDM hálózatban az optikai csatornák kapcsolásáért felelnek. Bár funkciója szerint egy ROADM is cross-connectnek tekinthető, az OXC alatt kettőnél jóval több vonali jel közötti kapcsolásra képes eszközt szoktunk érteni. Funkciója egy vezérelt optikai rendezőként szemléltethető legjobban. Ipari megvalósítása még nem elterjedt.

A DWDM hálózatok kulcseleme a *transzponder*, mely a kliens optikai jelét egy, a hullámhosszkiosztás szerinti, adott hullámhosszúságú optikai jellé alakítja, amely aztán a DWDM hálózaton átvihető. A jel optikai-elektromos-optikai átalakításon megy keresztül. Minden egyes optikai csatornához egy-egy transzponder tartozik.

A DWDM rendszerek első generációja a fogyóban lévő optikai szálkapacitások virtuális megsokszorozását szolgálta. Pont-pont összeköttetésekből lehetett a hálózatot felépíteni, ami több szakaszon áthaladó csatornák esetén költséges, a közbelső optikai-elektromos-optikai átalakítást végző transzponderek miatt.

Kisebb állomásokon, ahol csak néhány optikai csatornához való hozzáférés volt szükséges, fix leágazó multiplexereket (OADM) alkalmaztak. Ezek néhány csatorna leágaztatását és beiktatását tették lehetővé; az összes csatorna közül csak bizonyos csatornákat tudtak leágaztatni, megnehezítve ezzel a hullámhosszkiosztás tervezését és a hálózat későbbi bővíthetőségét.

A DWDM következő generációja az előző generáció legjelentősebb hátrányait igyekezett kiküszöbölni. A technológia fejlődésével egyre nagyobb távolságokat lehetett áthidalni úgynevezett 3R regenerálás nélkül, mert egyre nagyobb mértékben tudták a fényvezető jeltorzítását optikai úton kompenzálni, illetve fejlett hibajavító kódolásokat (FEC) alkalmazni. Így közbelső, regeneratív transzponderek alkalmazására jóval ritkább esetben volt szükség.

A végződő multiplexerek és fix OADM-ek helyett újabban rugalmas ROADM-eket használhatunk. Ezek nagy

előnye, hogy egy állomáson tetszőleges optikai csatornát választhatunk leágaztatásra és beiktatásra, megszüntetve ezzel a korábbi hullámhosszkiosztási kötöttséget.

Ezek a rendszerek megalapozták a DWDM rendszerek következő generációját, melyben a fő hangsúly a minél nagyobb transzparencia, azaz, hogy optikai csatornákat közbelső optikai-elektromos átalakítás nélkül lehessen átvinni. További újdonság az új rendszerekben az optikai kapcsolási funkció a flexibilitás biztosítása érdekében. A DWDM hálózatot felhasználó platformok egyre nagyobb sebességű csatornákat igényelnek és egyre költségkímélőbb ezeket úgy szervezni, hogy ne kelljen elektromos szinten kezelni a csomópontokban csak átmenő tranzit igényeket.

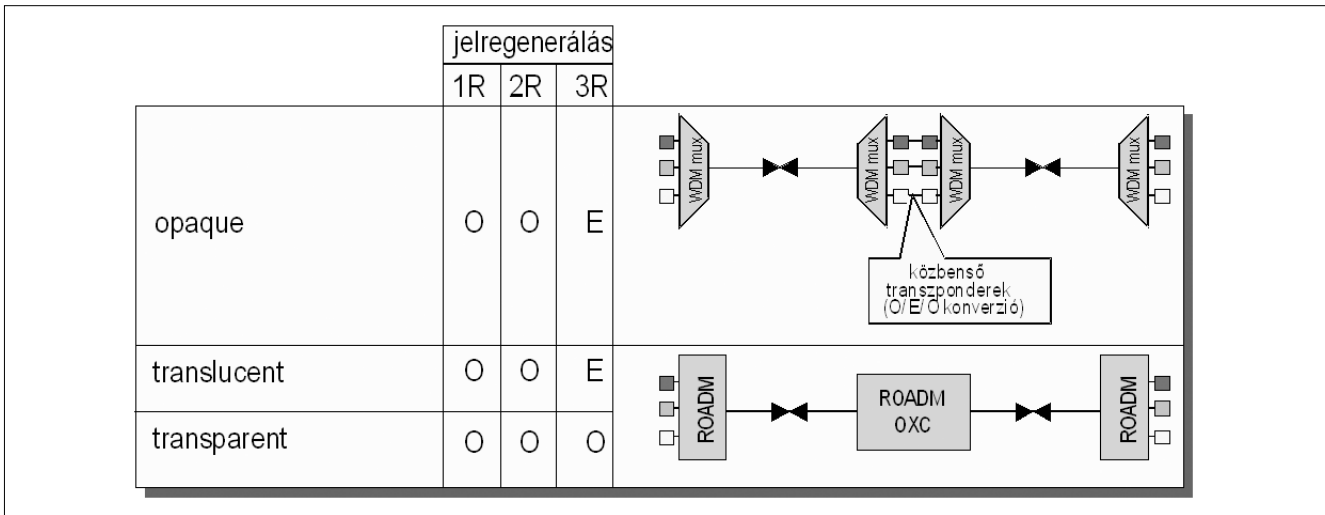
A transzparencia fokozatai

Az úgynevezett *opaque (nem átlátszó)* rendszerek tulajdonképpen az első generációs DWDM pont-pont összeköttetések voltak, melyekben az elektronikus 3R regenerálás miatt a több pont-pont rendszeren áthaladó csatornáknál mindig közbelső optikai-elektromos-optikai átalakításokat végző transzpondereket kellett alkalmazni. Ez jelentősen megnövelte a költségeket.

A *translucent (áttetsző)* és *transparent (átlátszó)* hálózatokat tulajdonképpen egyaránt transzparensnek tekinthetjük. A kettő közt az a különbség, hogy a transzparens hálózatokban mindhárom regenerálási szintet optikai tartományban végzik. A technológiai fejlettség jelenlegi szintjén az újraidőzítés optikai tartományban (3R) még nem kiforrott és költséges, már csak azért is, mert – szemben az 1R és 2R regenerálással – az újraidőzítést csatornánként külön-külön kell elvégezni. A translucent hálózatokban a 3R regenerálást még elektromos tartományban végzik, csupán ennek számát igyekeznek a lehető legalacsonyabb szinten tartani.

Az 1. ábrán a három transzparencia-osztály összehasonlítása látható, abból a szempontból, hogy az **1R** (optikai erősítés), **2R** (1R+optikai diszperzió kompenzáció) és **3R** (2R+újraidőzítés) regenerálás optikai (O) vagy elektromos (E) tartományban történik-e.

1. ábra Az optikai transzparencia fokozatai



2. Optikai kapcsolók

Az optikai szintű leágaztatás és kapcsolás legfontosabb eleme, „lelke” a kapcsolást optikai-elektromos-optikai átalakítás nélkül megvalósító kapcsolómező. Az egyes technológiák fizikai megoldásai és skálázhatósága miatt különböző kapcsolási architektúrák és más-más optikai szintű kapcsolás valósítható meg.

A kapcsolás szintje lehet szál szintű (FXC – Fiber Cross-Connect), amely valójában egy automatizált optikai patch-panel és például kábelátvágások esetén hasznos, amikor egy másik nyomvonalú optikai szárra tudja irányítani a teljes fénynyalábot. Ennél egy kicsit finomabb felbontást biztosít a spektrumsáv kapcsoló (WBXC – Wavelength-Band Cross-Connect), amely azonos végpontú összeköttetéseket a spektrumban egymás melletti hullámhosszakkal valósít meg, így „csak” a spektrumsávokat kell kapcsolni a bejövő vonali irányok között.

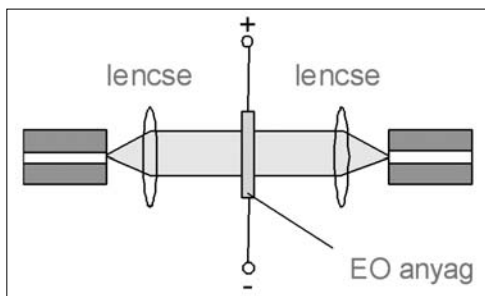
A távközlési szolgáltatók AON hálózatának kiépítéséhez legmegfelelőbb a WSXC-alapú (Wavelength Selective Cross-Connect) kapcsoló, amely a meglévő WDM infrastruktúrához is jól illeszkedik. Ezek a kapcsolótípusok minden bejövő vonali irány minden hullámhosszát blokkolásmintesen tudják kapcsolni egymás között. A WIXC (Wavelength Interchanging Cross-Connect) az előbb említett WSXC tudásán felül még hullámhosszkonverzióra is képes. Ez még nagyobb rugalmasságot és kihasználhatóságot biztosít, hiszen nem kell az adott összeköttetésnek a teljes útvonalán ugyanazt a hullámhosszát biztosítani. Jelenleg a hullámhosszkonverzió optikai szinten még nehezen megvalósítható, ezért a szolgáltatói hálózatokban egyelőre még nem várható a megjelenésük.

A továbbiakban a WSXC-alapú kapcsolók kapcsolómezőinek a technológiai megoldásaira térünk ki.

VOA (Variable Optical Attenuator) alapú kapcsolók

Változtatható csillapítású tagok egyik lehetséges megvalósítása két optikai szál közé egy elektro-optikai anyag közbeiktatása, amelynek feszültség hatására megváltozik a törésmutatója (2. ábra).

Ezt az alkatrészt a DWDM berendezések több pontján alkalmazzák. Az alapvető és egyik legfontosabb alkalmazása az, hogy ezzel tudják az optikai jelszinteket akár helyileg kézzel, vagy távvezérelt módon pontosan beállítani. Emellett a két szélső értékét használva (teljes áteresztés, vagy teljes lezárás) optikai kapcsolóként is funkcionálhat.



2. ábra VOA

PLC (Planar-Lightwave Circuit)

A sík hullámvezetős technológia a félvezetős technika alapszik. Egy hordozó rétegre (tipikusan szilícium), vékony burkolatot készítenek, amelynek alig kisebb a törésmutatója, mint a fölötte lévő magrétegnek. A magrétegből ezután litográfiai eljárással (maszk és maratás) kialakítják a megfelelő struktúrát. Ahhoz, hogy ebből a struktúrából hullámvezetőket kapjunk, be kell vonni még egy kisebb törésmutatójú anyaggal. Ezzel az eljárással különböző interferometrikus elemeket alakítanak ki. Általában Mach-Zehnder interferométert, amelynél a becsatolt fényt kettéosztják, majd pedig különböző úthosszakon átvezetve újra egyesítik őket és az így találkozó hullámok vagy kioltják (fél hullámhossznyi különbség esetén), vagy erősítik egymást. Az úthosszkülönbséget piezo-elektromos és termikus hatással is el lehet érni.

Ezen kívül „Y” alakú csatolót is készítenek hullámvezetőből, amely két ágának a törésmutatóját lehet változtatni hőmérséklet vagy elektromos tér hatásával. Integrált optikai hullámvezetővel buborék-kapcsolót is készítenek, amelynél a két hullámvezető kereszteződésében a hullámvezetők törésmutatójával megegyező folyadék van. A folyadékot kis fűtőszállal melegítik, a melegítés hatására buborék keletkezik, amelyen törést szenved a fény és a másik irányba terjed tovább.

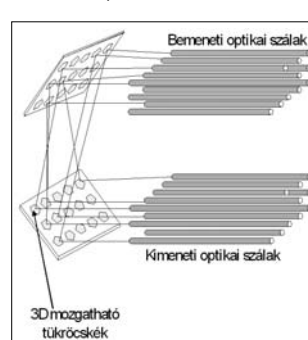
A PLC technológia előnye, hogy minden multiplexert, demultiplexert (AWG – Arrayed Waveguide Grating), kapcsolót és csillapító tagokat ugyanazzal a félvezető eljárással egy kompakt eszközbe lehet integrálni.

Opto-mechanikai kapcsolók

A legegyszerűbb megoldás mechanikai kapcsolásra, ha a szálakat mechanikai úton léptetőmotor, vagy elektromágnes segítségével mozdítják el. Ez a módszer lassú és skálázhatóság szempontjából sem előnyös.

Egy másik lehetséges opto-mechanikai megoldás a MEMS (Micro-Electro Mechanical System) technológia. A MEMS-alapú technológiában mechanikus elemek vannak, amelyeket az aktuátor valamilyen külső vezérlésre (elektrosztatikus, elektromágneses, termikus) mozgásba hoz. A beépített mechanikus elemek apró tükröcskék, amelyek mozgásukkal megváltoztatják a fény útját.

Létezik kétdimenziós MEMS kapcsoló, melynek tükröi kétállású mozgásra képesek („digitális”). Ezekkel jelenleg max. 32x32 portos kapcsolómátrixot lehet megvalósítani, mivel a fény szabadon megtett úthosszával lineárisan nő a csillapítás. Ennél jelentősen nagyobb portszámot (akár 8000x8000-est) is meg lehet valósítani 3D



MEMS-el (3. ábra) mert a tükrök „analóg” módon tetszőleges dőlésszögbe állíthatók, ezért nem csak síkban helyezhetők el. Hátránya, hogy ez lényegesen bonyolultabb pozicionálási mechanizmust igényel.

3. ábra 3D MEMS

SOA alapú kapcsolók

A félvezető optikai erősítőt (Semiconductor Optical Amplifier) is lehet optikai kapcsolóként használni. A lézerciódia működéséhez hasonlóan elektromos pumpálás (gerjesztés) hatására gerjesztett állapotba lehet hozni az elektronokat (populáció inverzió), amelyek az alapállapotba visszakerülés során, indukált emisszió által erősítik a bejövő fényt. Ha a pumpálást kikapcsoljuk, akkor az erősítés helyett erős csillapítás lép fel, amit így a fény kapcsolására is tudunk használni. A megoldás hátránya a hozzáadott zaj, amely SOA esetében 6-8 dB.

Akusztó-optikai kapcsolók

Az akusztó-optikai modulátor működése az optikai rugalmasság elvén alapul (elasto-optic effect), mely során az anyag szerkezete deformálódik és ennek hatására változik a fénytörési mutatóját. Ha a torzulás akusztikai sűrűsödés vagy ritkulás hatására jön létre, akusztó-optikai modulátorról (AOM) beszélünk. Akusztó-optikai hatás akkor lép fel, ha a fénysugár olyan átlátszó anyagon (például üveg) halad át, melyben hanghullámok is mozognak. Az akusztikai hullámokat létrehozhatja egy piezo-elektromos átalakító, melyet egy RF jel vezérel.

Mivel a hanghullám alakja szinuszos, ezért egy változó törésmutatójú rács jön létre az eszközben. A rács a különböző hullámhosszúságú nyalábokat eltérő mértékben törí meg, így azok elkülönülnek egymástól. A megfelelő törésmutatójú helyhez illesztett kimeneti csatolóval hangolható szűrő és kapcsoló hozható létre.

A technológiát DWDM regenerátor állomásokon alkalmazva Optikai Add/Drop Multiplexer (OADM) alakítható ki, ahol egy vagy több hullámhossz ki- és becsatolása lehetséges.

Folyadékkristályos kapcsolók

A folyadékkristályok olyan szerves anyagok, melyek makroszkopikusan folyékonyak, vagyis a folyadékokhoz hasonlóak, viszont mikroszkopikus szempontból a molekuláik a szilárd testekhez hasonló kristályszerű rendezettséget mutatnak. A molekulák megnyúlt alakúak, leginkább pálcikához hasonlóak. Megfelelő körülmények között a molekulák irányítottságát meg lehet változtatni, egy bizonyos irányba be lehet őket forgatni. Az irányítottság befolyásolja a folyadékkristály optikai tulajdonságait, ami által hatással van az áthaladó fénynyaláb polarizációjára. A folyadékkristályos optikai kapcsolókra jellemző a kis beiktatási csillapítás mellett a csatornák közötti minimális áthallás.

Az optikai kapcsolótípusok összehasonlítása

Az előbbieken összefoglalt transzparens (a kapcsolást O-E-O átalakítás nélkül megvalósító) optikai kapcsolókat több fajta szempontból lehet osztályozni:

- **Skálázhatóság** – maximum mennyi hullámhossz („hány portos”) egyidejű kapcsolását tudja megvalósítani egy adott technológiájú eszköz

- **Kapcsolási idő** – a kapcsolási idő a fény, az eszköz bemenetén és a megfelelő kimenetén való megjelenése között eltelt időt jelenti
- **Fogyasztás** – mekkora teljesítményt vesz fel a kapcsolóeszköz működés közben
- **Beiktatási csillapítás** – ez a paraméter jelenti azt a csillapítást, amivel az adott kapcsolóeszköz a teljes rendszer (optikai átvitel) csillapításához hozzájárul
- **Áthallási elnyomás** – a csatornák (hullámhosszak) közti áthallás azt jelenti, hogy egy adott hullámhosszúságú jel optikai teljesítményének egy része egy másik hullámhossz kimenetén jelenik meg. Ez jelminőség-romláshoz vezet, ezért ezt a teljesítmény „átcsatolást” alacsony szinten kell tartani. Az eszköz e csillapítását nevezzük áthallási elnyomásnak.

Az 1. táblázat tartalmazza a fent leírt optikai kapcsolók technológiáira vonatkozó értékeket.

	Kapcsolási idő	Beiktatási csillapítás	Elnyomás/áthallás	Relatív fogyasztás	Skálázhatóság (max.)
Léptető-motoros	10-50 ms	2,5 dB	55 dB		10 port
Termo-optikai	2-10 ms	10 dB	20-30 dB	közepes	10 port
Elektro-optikai	1 ns	8 dB	25-35 dB	közepes	10 port
Buborék	< 1ms	3-6 dB	40-50 dB	közepes	8 port
MEMS 2D	10 ms	4-5 dB	50 dB	alacsony (16x16-nál: 1-2 μW)	32 port
MEMS 3D	10 ms	4-5 dB	50 dB	alacsony	8000 port
SOA	1-5 ns	8 dB	40 dB		10 port

1. táblázat Optikai kapcsolók összehasonlítása

A táblázatból kiderül, hogy legjobban a MEMS alapú kapcsolók skálázhatóak és az elnyomási arányuk is jó. A leggyorsabbak az elektro-optikai, illetve SOA-alapú kapcsolók, amelyeket előnyösen lehet majd alkalmazni a jövőbeli optikai csomag- vagy börszt-kapcsolás során. Ugyanakkor ezek a technológiák kevésbé skálázhatóak és a SOA alapú kapcsoló még kutatási stádiumban van.

A fogyasztásuk ezeknek az eszközöknek nem jelentős, például egy mechanikus 16x16-os 2D MEMS kapcsoló sem fogyaszt többet 1-2 μW-nál üzem közben.

3. Optikai leágazó multiplexerek

3.1. Fix 2/4/8 csatornás Optical Add/Drop multiplexerek

Az OADM-ek két vonali oldali kapcsolódással rendelkező berendezések, melyek egy sokcsatornás WDM vonali jelből 2, 4, vagy 8 hullámhossz ki- és becsatolására alkalmasak. A be- és kimeneti erősítők és diszperzió-kompenzáló egységek mellett a demultiplexer és

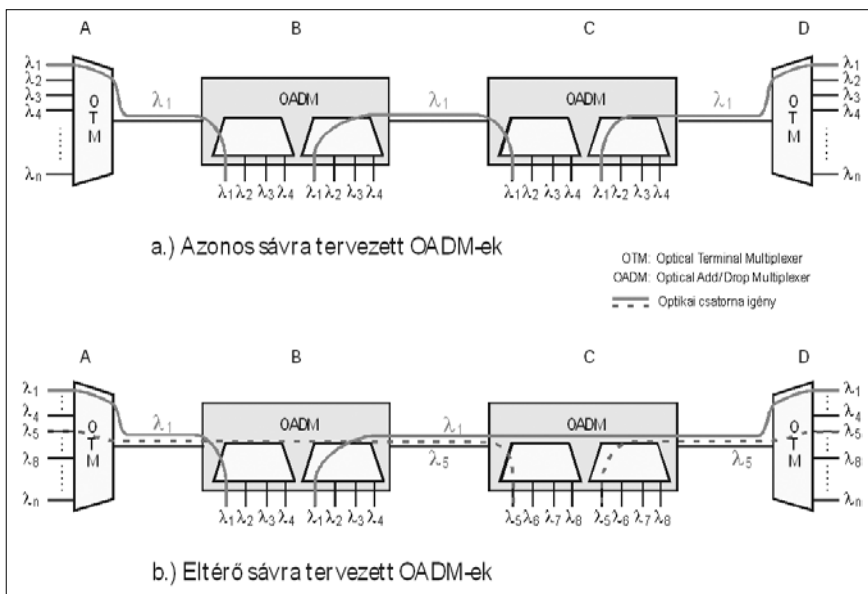
multiplexer modulok a legfontosabb alkotói. A multiplexer és demultiplexer modulok valósítják meg az adott hullámhosszak leágztatását az állomáson, míg a többi hullámhossz 3R regenerálás nélkül áthalad a berendezésen.

A fix OADM neve is jelzi, hogy a leágztatható/beiktatható optikai csatornák egy adott eszközben gyárilag rögzítettek, mind számukat, mind pedig hullámhosszukat tekintve.

Ezért megkövetelik a hálózattervezőktől, hogy megjósolják a jövőben várható forgalmi- és sáv szélesség igényeket annak érdekében, hogy elkerüljék a szolgáltatások átirányításával, esetleg leállításával járó hálózati bővítéseket. A tervezések tökéletlensége és a váratlan forgalmi igények azt eredményezik, hogy a fix OADM-eket tartalmazó hálózatokat folyamatosan újra kell tervezni és át kell rendezni, ami extra költségeket, a meglévő szolgáltatások megszakadását, valamint a rendelkezésre álló sáv szélesség messze nem optimális kihasználását eredményezi.

Fix OADM-eket jellemzően gyűrű- és busz-struktúra kialakításánál alkalmaznak. Az OADM-ek kialakításánál általában 2, vagy 4 hullámhosszra illesztett sáv szűrőket használnak. Több, egymás melletti OADM tervezésénél komoly megfontolást igényel a jövőben várható forgalmi igények helyes becslése. Amennyiben a szomszédos állomások közötti igények megjelenésére számítunk, úgy azonos sávra (azonos hullámhosszakra) érdemes tervezni az OADM-eket, de ebben az esetben egy távolabbi állomásról (például a busz-struktúrát lezáró optikai végződő multiplexer (OTM) felől) érkező igények elvezetése problémás lehet amiatt, hogy a célállomásra érkezethető hullámhosszak mindegyike kicsatolódik a közbenső OADM állomásokon (4/a. ábra). Ellenkező esetben, ha az egymás melletti OADM-eket eltérő sávra, különböző hullámhosszak kicsatolására tervezzük, az állomások közötti közvetlen igények elvezetése nem fog működni (4/b. ábra).

4. ábra OADM-rendszerek



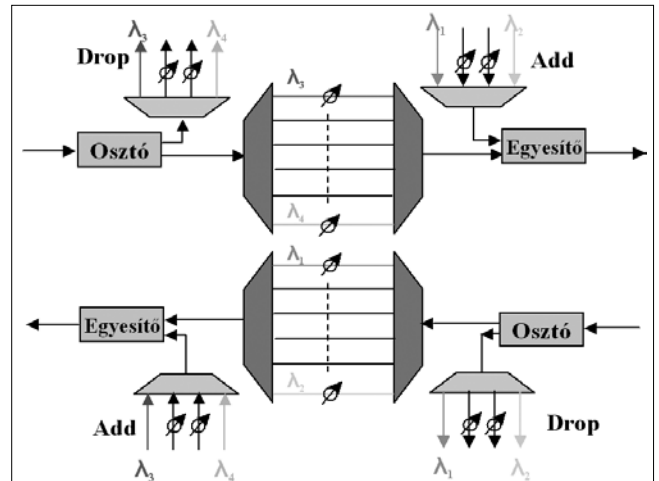
A fenti problémákra megoldást jelenthet, ha több, eltérő hullámhosszon működő 2 vagy 4 csatornás OADM-modult kombinálunk az egyes állomásokon, de ez már jelentős költségnövekedést eredményez.

3.2. Reconfigurable Optical Add/Drop multiplexerek

3.2.1. Wavelength Blocker (WB)

hullámhossz blokkolós technológiával

A WB technika alapeleme, amely a leágztatást/beiktatást lehetővé teszi: a VOA. Ezek két szélső állapotát alkalmazzuk az ROADM kialakításában, az 5. ábra szerinti funkcionális felépítéssel.

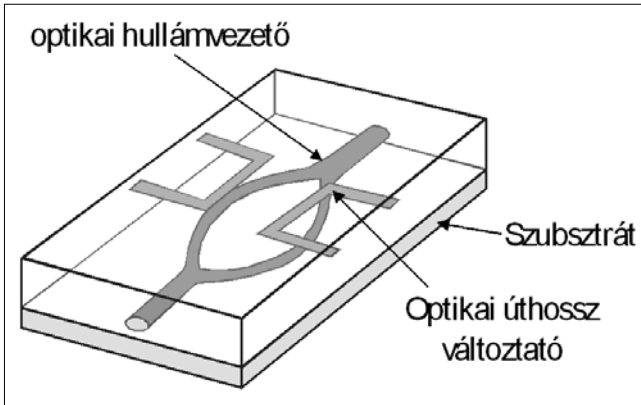


5. ábra WB-alapú ROADM elvi felépítése

Az egymással szembe fordított demultiplexerek után és a multiplexerek közé minden egyes hullámhosszra ilyen változtatható csillapítású eszközöket helyeznek el, és az azonos vonali irányba továbbítandó hullámhosszakat csillapítás nélkül továbbengedik, a kicsatolandókat vagy más irányba kapcsolandókat pedig nagy csillapítást alkalmazva elnyomják, letiltják.

A csillapító tagok változtatása történhet helyi beavatkozással is, de a több irány összefüggősége (például ha az adott hullámhossz leágzó irányát engedélyezzük, a továbbítandó közül le kell tiltanunk) és az egyszerűbb és gyorsabb átkonfigurálhatóság érdekében a menedzselő rendszerből való irányítás a célszerűbb.

Változtatható optikai csillapítókat már a technológia fejlődésének kezdeti szakaszában elő tudtak állítani, ezért nyilvánvaló volt, hogy az első ROADM-eket is ilyen eszközökkel építették fel. Előnyük az egyszerű működési elvből fakadó egyszerű megvalósíthatóság. Azonban nem lehet egy eszközbe integrálni a VOA-t és a hullámhossz-kiválasztási funkciókat. Egy ROADM kialakításához sok egységre, kártyára van szükség, így a teljes berendezés sok helyet foglal el.



6. ábra Mach-Zehnder interferométer

3.2.2. Planar Lightwave Circuit (PLC) technológia

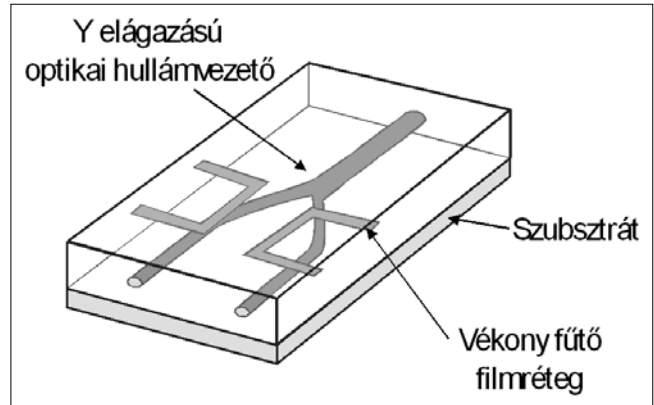
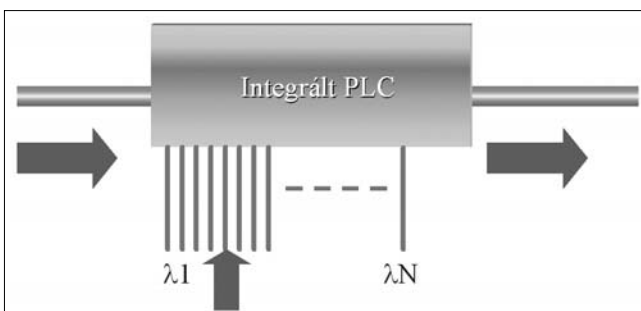
A sík hullámvezetős technológiát több gyártó is alkalmazta az optikai szintű blokkolásmentes leágaztató multiplexerek felépítéséhez. Nagy előnye, hogy a kapcsolás mellett ugyanazon félvezetőre integrált eszközökkel lehet megoldani a beérkező és kimenő fénynyaláb demultiplexelését, multiplexelését, valamint a szükséges csillapító tagokat. Így egy nagyon megbízható, kompakt eszközt lehet megvalósítani, szemben a Wavelength Blocker-es megoldással.

A gyakorlatban a 2. szakaszban leírt Mach-Zehnder interferométert (6. ábra), vagy „Y” alakú (7. ábra) hullámvezetős megoldásokat alkalmaznak.

Az MZI megoldásnál az optikai úthosszat változtathatjuk piezoelektromos, vagy hőhatással. A kapcsolás ezek után a következők szerint történik: a bejövő fény kettéosztása után azonos periódusnál megjelenik, vagy fél hullámhossznyi különbség esetén kioltják egymást, ezért nem jelenik meg a kimeneten. Az „Y” elágazású optikai hullámvezető egy speciális polimerből készül, mely hő hatására megváltoztatja a törésmutatóját. A becsatolt és kettéosztott fény ezek után csak az egyik ágon jelenik meg, a másikon a törésmutató-változtatás miatt nem.

A leírt PLC-elemeket felhasználva alakítják ki az Add/Drop multiplexereket (8. ábra), amelyek a hullámhosszakat ki tudják csatolni, vagy tovább tudják kapcsolni a kimenő vonali irányra. A technológiából adódik, hogy egy hullámhosszat csak egy meghatározott kimenetre, illetve vissz irányban bemenetre lehet csatolni, ezért hangolható hullámhosszú transzpondereket nem lehet alkalmazni.

8. ábra PLC alapú ROADM



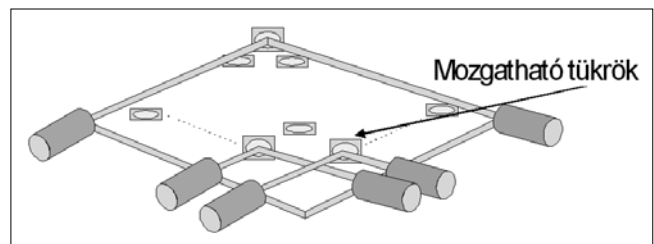
7. ábra „Y” alakú hullámvezető

3.2.3. Wavelength Selective Switch (WSS) technológia

A WSS ROADM a kétdimenziós MEMS-alapú technológiára épül, amelynek nagy előnye a PLC technológiával szemben, hogy lényegesen nagyobb mértékben skálázható, így előrevetíti az OXC kialakítási lehetőségét is.

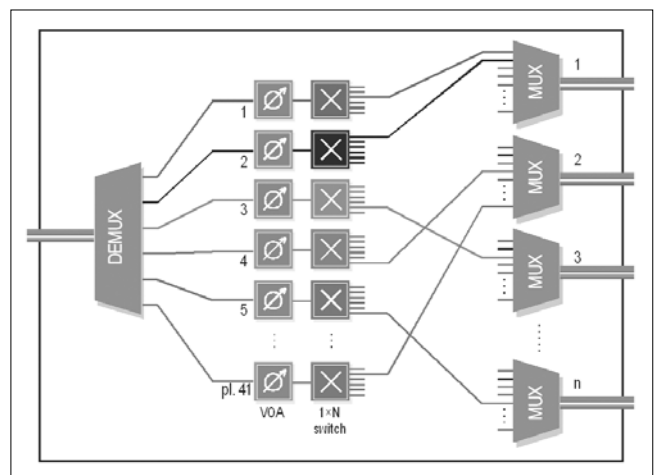
Az alkalmazott 2D MEMS esetén a tükröcskék síkban, mátrix-szerűen helyezkednek el (9. ábra) és a bejövő fényt bármelyik kimeneti irányba tudják kapcsolni. Ennek feltétele, hogy a többi (amelyik irányba nem kapcsolunk) ugyanazon sorban lévő tükröknek síkban kell állniuk.

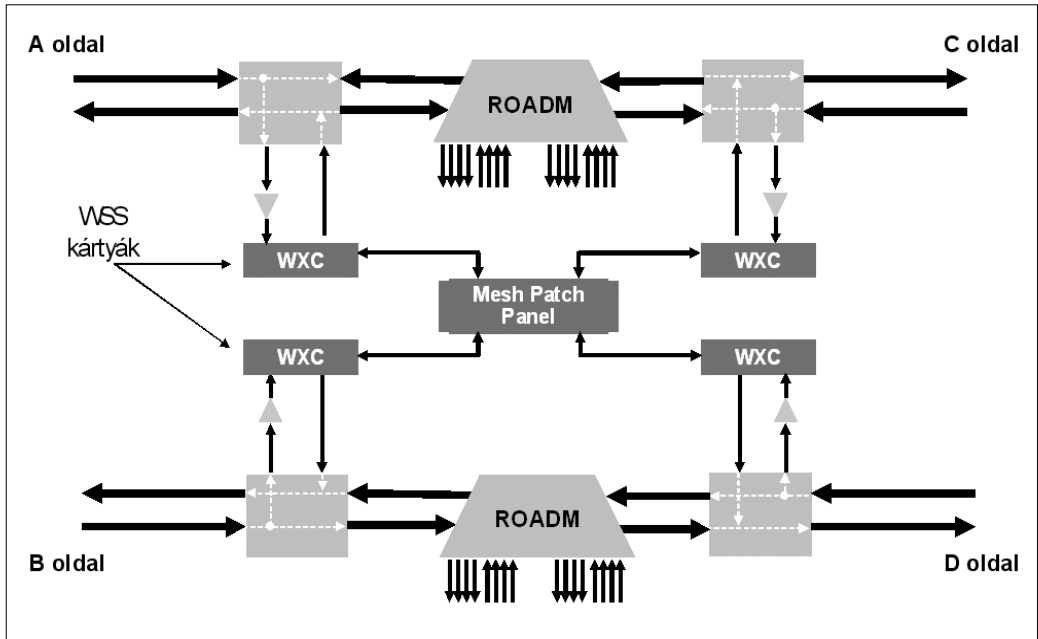
9. ábra 2D MEMS kapcsoló



A gyártók egyelőre kompakt kapcsoló kártyákat alakítanak ki, amelyeket fel lehet használni ROADM kialakításához. Egy ilyen tipikus eszköz sematikus ábrája látható a 10. ábrán.

10. ábra WSS modul





11. ábra
OXC funkció kialakítása
meglévő ROADM-el

Ezek a kártyák több aggregált porttal ($n=10$ -es nagyságrendben) rendelkeznek, amelyek nincsenek külön dedikálva bemeneti vagy kimeneti portként. A bemeneti fénynyaláb demultiplexálása után, ahogy azt a 10. ábra is szemlélteti, minden egyes hullámhossz kapcsolását egy $1 \times n$ -es 2D MEMS-alapú kapcsoló végzi. Így bármelyik kimenetre blokkolásmentesen tudja irányítani az egyes hullámhosszakat.

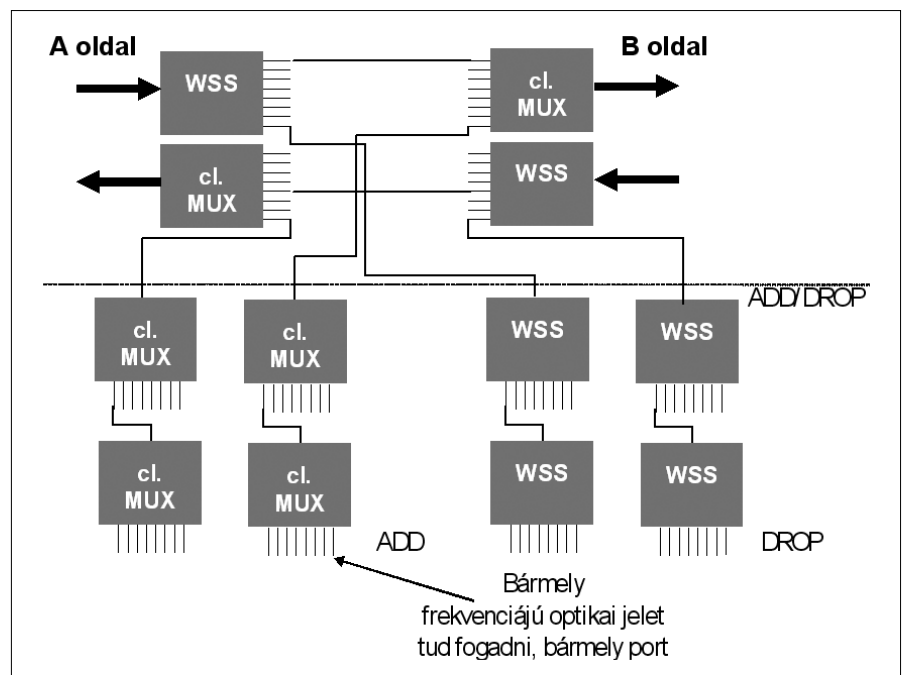
Az ROADM-et ezen WSS modul (tipikusan egy kártya) felhasználásával tudják kialakítani, úgy hogy az egyik portját egy demultiplexerre kötik rá (ez lesz a fix leágaztató rész), egy másik portját pedig összekötik egy ugyanolyan WSS kártya portjával, amely a vonali oldalon továbbítandó hullámhosszakat fogja kezelni. A becsatolás (Add) is egy multiplexerrel történik, amelyet a második kártya egy portjára kötnek rá.

3.3. Optical Cross-Connect (OXC) eszközök

Az OXC-k alkalmazása jelent egy igazán rugalmas megoldást a kettőnél nagyobb fokszámú csomópontok esetén, hogy optikai szinten megvalósulhasson a hullámhosszak kapcsolása. Ezen funkció létrehozására már vannak kész megoldások, illetve jövőbe mutató elképzelések. Az alábbiakban ezeket foglaljuk össze röviden.

3.3.1. OXC funkció megvalósítása az ROADM fokszámának emelésével

A 3.1. szakaszban ismertetett ROADM megoldások egy másodfokú csomópontot (tipikusan gyűrűs hálózat esetén) tudnak kiszolgálni optikai kapcsolással. Ezeket az eszközöket felhasználva OXC-funkciót tudunk kialakítani. A 11. ábra egy ilyen lehetséges megoldást mutat be.



12. ábra
„Színezetlen” multiplexer használata

Ebben az esetben a meglévő ROADM-eket használják fel, amelyek a ki-be csatolás funkciót továbbra is biztosítják. Az ROADM-ek bemenő és kimenő vonali irányukat passzív osztókkal szétválasztják és a lecsatolt irányra a fent részletezett WSS kártyákat kapcsolnak, amelyeket egymással fixen egy patch panelen keresztül összekötik. Így lehet kialakítani meglévő ROADM-ek és WSS-ek felhasználásával nagyobb fokszámú csomópontokat, amelyeknek előnye, hogy egy korábban létesített ROADM-es csomópontot a meglévő eszköz felhasználásával tudjuk kettőnél nagyobb fokszámúra bővíteni.

A fenti megoldás hátránya, hogy az ROADM-ek, legyen az WB-, PLC- vagy WSS-alapú, az add/drop oldalon minden egyes hullámhosszat csak egy dedikált kimenetre/bemenetre lehet ki-becsatolni.

Erre a problémára jelenthet megoldást egy úgynevezett színezetlen multiplexer (cl.MUX) alkalmazása, melynek bármely bemenete bármely hullámhosszúságú jel fogadására alkalmas.

Az 12. ábrán egy ilyen ROADM-megoldás látható, ahol a bemeneti vonali oldalon WSS modulokat használunk a csatornák kicsatolásához vagy továbbküldéséhez. A DROP oldalon szintén WSS modulokat alkalmazunk, hogy bármely portra kicsatolható legyen bármely hullámhossz. A kimeneti vonali irányon és az ADD oldalon pedig hullámhossz-független passzív multiplexereket alkalmazunk.

Így az ADD oldalon is alkalmazhatóak változtatható hullámhosszú transzponderek minden porton. További előnye ennek a megoldásnak, hogy a cl.MUX-ok pasz-

zív optikai elemek, ezért jóval olcsóbbak a WSS moduloknál. A megoldás hátránya, hogy kettőnél nagyobb fokszámú csomópont kialakítása kizárólag ezen eszközök alkalmazásával nagyon bonyolulttá és a sok külön eszköz miatti hibakeresés, teljesítmény-tervezés és -beállítás szempontjából kezelhetetlenné válik.

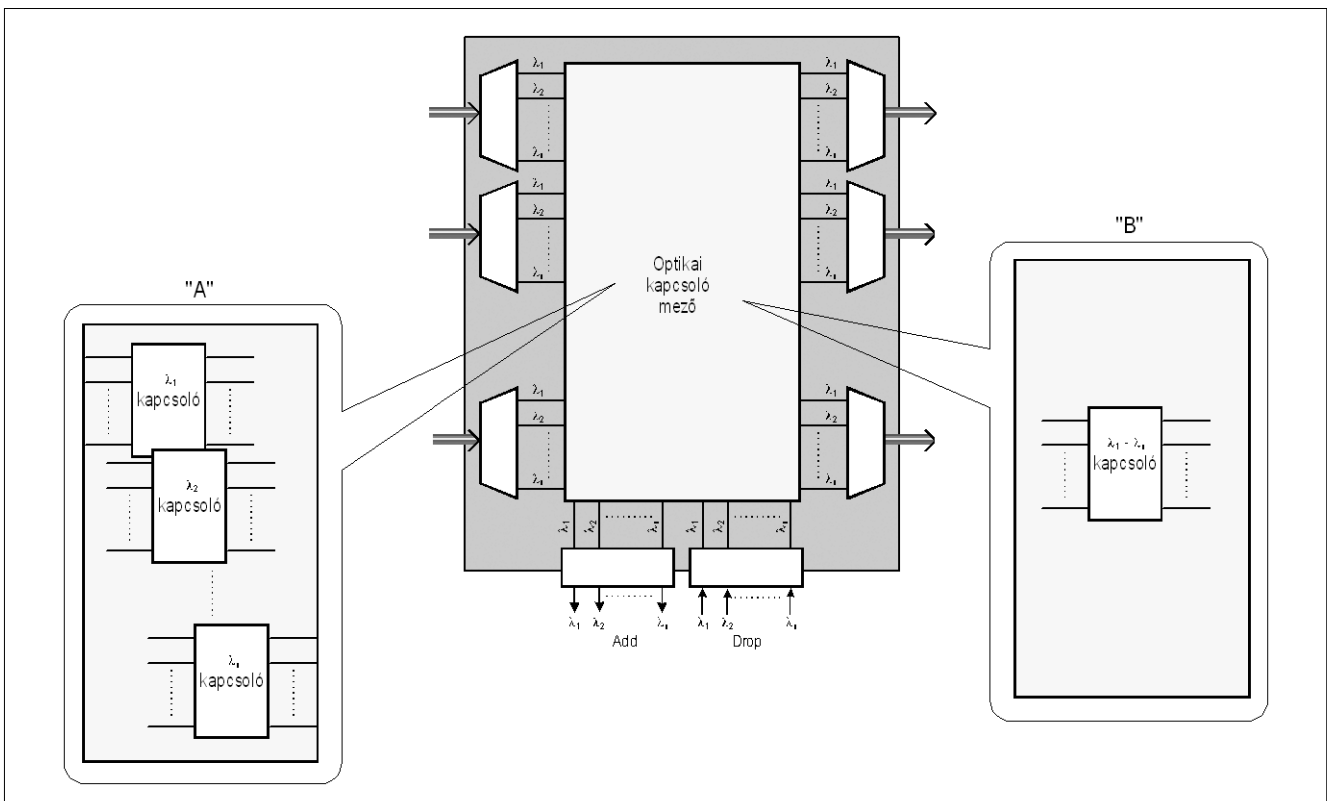
3.3.2. „Valódi” Optical Cross-Connect

A 3.3.1-es részből világosan kiderül, hogy ROADM-ek felhasználásával nehézkes és bonyolult nagyobb fokszámú csomópont kialakítása. 4-6 vonali irány még tervezhetőnek, kezelhetőnek tűnik, de az igazi megoldást erre a problémára egy komplett „valódi” OXC kifejlesztése jelentené. Ez pillanatnyilag még a gyártóknak is csak a jövőbeli terveikben szerepel, ezért technológiai és architektúráis megvalósításukról, bővíthetőségükről csak fejlesztési irányok és elképzelések állnak rendelkezésünkre.

Az OXC egy olyan komplex berendezés, amely több (és esetleg modulárisan bővíthető) aggregált vonali oldallal rendelkezik, valamint alkalmas hullámhosszak ki-becsatolására is. A belső optikai kapcsoló mezője pedig képes minden vonali és ADD/DROP irányból érkező hullámhossz blokkolásmentes kapcsolására. Erre láthatunk egy példát a 13. ábrán.

A belső kapcsolási mező architektúráis kialakítására több megoldás is létezik. Az „A” megoldás a hullámhosszak szerint particionált optikai kapcsoló, amely egyszerűbb technológiai megvalósítást, ugyanakkor bonyolultabb vezérlést eredményez, mint a „B” típusú hullámhossz-független optikai kapcsoló architektúra.

13. ábra „Valódi” OXC felépítése



4. Összefoglalás

A cikkben ismertetett rugalmas optikai leágazó és kapcsoló eszközöknek kulcsszerepük van, hiszen ezek teremtik meg a lehetőségét a jövő intelligens optikai hálózatának, melyben az optikai hálózat kliense (például az IP hálózat) automatikusan, emberi beavatkozás nélkül tud majd optikai csatornákat létrehozni illetve megszüntetni, az aktuális forgalmi viszonyoknak megfelelően (ASON/GMPLS).

Az előzőekben láttuk, hogy az optikai kapcsoló eszközökben többféle technológiát alkalmaznak, és ettől függően különböző kiépítettségű és rugalmasságú eszközöket lehet kialakítani. Nyilván ezek költsége arányban van a funkciógazdagságukkal és flexibilitásukkal, ezért különböző hálózati síkokban szinte mindegyiknek megvan a létjogosultsága.

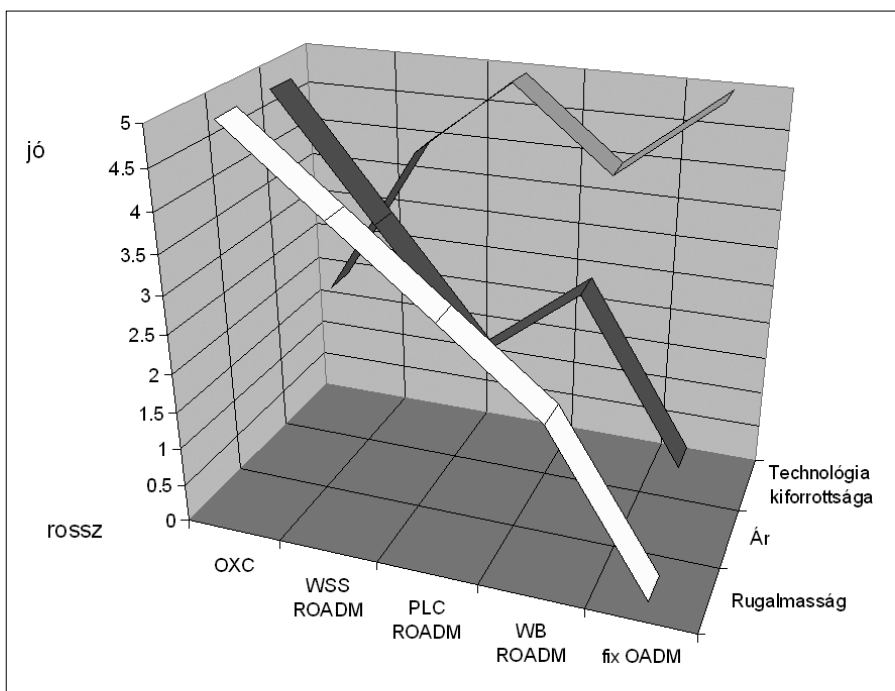
A 14. ábrán három kulcsfontosságú jellemző alapján szemléltetjük a különböző technológiák közötti különbségeket, illetve egymáshoz való viszonyukat.

A WB elven működő ROADM-ek, nagy helyigényű kialakíthatóságuk és magasabb megvalósítási költségük miatt nem olyan kiforrott termékek, és széleskörű hálózati alkalmazásuk a jövőben sem várható.

Rugalmasság szempontjából az OXC-k a legkedvezőbbek, hátrányuk viszont a magas ár, és - talán emiatt - az a tény, hogy még nem jelent meg a piacon tömeggyártásban készült berendezés.

A szolgáltatók jelenlegi és közeljövőbeli optikai hálózatában egyenlőre elegendőnek tűnik egy OXC-nél kisebb ROADM. Ezek közül is a leginkább kecsegtető a WSS technológián alapuló, mellyel kettőnél több fókuszú ROADM is kialakítható.

14. ábra
Optikai leágazó és kapcsoló technológiák összehasonlítása



Irodalom

- [1] Megyer Balázs, Paksy Géza, Szodényi Ákos, Zsigmond Szilárd: Optikai cross-connect-ek (OXC-k) alkalmazása a transzport-hálózatokban. BME-KKK-Magyar Telekom, K+F szerződés, 2005.
- [2] Tarek S. El-Bawab: Optical Switching. Springer Science+Business Media Inc., 2006.
- [3] Jakab Tivadar, Lakatos Zsolt, Paksy Géza, Zsigmond Szilárd: Tisztán optikai hálózatok bevezetésének és üzemeltetésének tervezési támogatása. BME-KKK-Magyar Telekom, K+F szerződés, 2006.
- [4] Kevin H. Liu: IP over WDM. John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [5] Lajtha György, Szép Iván: Fénytvádközlő rendszerek és elemek. Akadémiai kiadó, Budapest, 1987.
- [6] www.patentstorm.us/patents/ (Liquid crystal optical switch, US Patent Issued on March 28, 2006. Letöltve: 2007.06.07.)
- [7] http://www.optical-network.com/ (Letöltve: 2007.06.07.)
- [8] Steven D. Robinson: ROADMs: the route to intelligent networking. Fibre Systems Europe, 2007 tavasz.