



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Czékus József

**PONT-MULTIPONT OPTIKAI
HOZZÁFÉRÉSI HÁLÓZATI
ARCHITEKTÚRÁK ANALITIKUS
ÖSSZEHASONLÍTÁSA ÉS
KÖLTSÉGELEMZÉSE**

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

KONZULENS

Mitscenkov Attila (TMIT),

Mazroa Dániel (TMIT)

BUDAPEST, 2013

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
1.1 A dolgozat célkitűzései és felépítése	7
2 Optikai hozzáférési hálózati technológiák.....	9
2.1 TDM-PON	9
2.1.1 Gigabit-capable PON (GPON)	9
2.1.2 10 Gigabit-capable PON (10GPON)	10
2.2 Wavelength Division Multiplexing PON (WDM-PON)	11
2.2.1 WDM-PON hangolható lézerekkel.....	12
2.2.2 WDM-PON reflektív adóegységekkel.....	13
2.3 OFDM-PON.....	14
2.3.1 Koherens optikai OFDM	15
2.3.2 Direkt Detekciós Optikai OFDM.....	16
2.4 Hibrid PON rendszerek.....	17
2.4.1 TWDM-PON	17
3 Statisztikus multiplexálás és forgalmi modellezés	20
3.1 Statisztikus multiplexálás	20
3.2 Forgalmi modellezés.....	21
3.3 Multiplexálási nyereség számítása.....	22
4 Metrika az összehasonlításhoz.....	26
4.1 Összemérhetőség problémája	26
4.2 Szemléltetés ládapakolással	27
4.3 Költségszámítás	28
4.3.1 Időosztásos PON-ok költségmodellezése	28
4.3.2 Hullámhossz osztásos PON-ok költségmodellezése.....	29
4.3.3 OFDM-PON-ok és Hibrid PON-ok költségmodellezése.....	30
5 Matlab modell készítése és az eredmények értékelése.....	31
5.1 Statisztikus multiplexálás modellezése.....	31
5.2 Költségfüggvények implementációja	32
5.2.1 TDM-PON-ok költségfüggvénye	32

5.2.2 WDM-PON-ok költségfüggvénye	33
5.3 Ábrázolás	34
5.4 Eredmények értékelése	34
5.4.1 Statisztikus multiplexálás	34
5.4.2 Költségmodellek szemléltetése.....	36
5.5 Összehasonlítás	40
6 Összegzés, kitekintés	42
Irodalomjegyzék.....	44
Ábrajegyzék.....	46

Kivonat

Az örökké növekvő sávszélesség igények költséghatékony kiszolgálására ma az egyik legígéretesebb megoldást az úgynevezett pont-multipont optikai hozzáférési hálózatok jelentik. A cél a munkám során ezen hálózati architektúrák összehasonlítása volt az egy felhasználóra jutó költségük alapján. A vizsgálatok során figyelembe vettem, hogy a felhasználószám növelésével nem növekszik arányosan a teljes sávszélesség igény, mivel az egyre növekvő felhasználószám mellett egyre jelentősebbé válik az a kapacitásbeli nyereség, amelyet a hálózatot éppen nem használó végpontok jelentenek.

A pont-multipont hálózatok közös jellemzője, hogy a központ és egy, az előfizetőkhez közel elhelyezett elosztó/koncentráló egység közötti összeköttetés osztott közegnek tekinthető. A feladat megoldásához először meg kellett ismernem a vizsgálandó és összehasonlítandó optikai hozzáférési hálózati technológiákat. Az osztott közeg hozzáférési módja alapján a következőképpen csoportosíthatók a hálózatok: időosztásos, hullámhossz osztásos vagy ortogonális frekvenciaosztásos közeg hozzáférési hálózat. Ezek az alapvető hozzáférési módokon felül további hibrid megoldásokat is tanulmányoztam, amelyek az előbbi technológiák ötvözéséből adódtak.

Az eltérő technológiák különböző bitsebességeket és különböző maximálisan megengedhető felhasználószámot biztosítanak az osztott közegen. Megvizsgáltam a végpontok forgalmának statisztikus multiplexálásával megtakarítható sávszélességet és költséget. Ehhez szükséges volt a felhasználók forgalmát modellezni. A dolgozatban a felhasználókat kétállapotú ON-OFF forrásokként írtam le, így egymástól független folyamatok összegeként az aggregált átviteli sebességüket közelíteni tudtam a normális eloszlás segítségével. Ilyen módon adott konfidencia-intervallum mellett becslést lehet adni az osztott közeg ekvivalens kapacitására, azaz meghatározni, hogy $p < 1$ adási valószínűséggel rendelkező végpontok esetén egyszerre mennyi végpont szolgálható ki az adott aggregált sávszélességgel. Végül a hálózat teljes költségének és a statisztikus multiplexálással kapott felhasználószámának a hányadosa megadja az egy felhasználóra jutó hálózati költséget.

A munkám utolsó részében különböző hálózati megoldások összehasonlítását végeztem el és eredményeit értékeltem ki, a kapott egy felhasználóra jutó hálózati költségek alapján.

Abstract

To serve cost effectively the always increasing bandwidth needs nowadays we can use point-multipoint optical access networks. My goal is to compare these technologies with respect to their total cost per user. Through my study, I considered the total bandwidth not increasing linearly with the number of users, because we can take an advantage of inactive users, who are not transmitting data in network at the same time.

In point-multipoint networks the medium between centre of the network and splitter, which take place close to users, is shared. Firstly I had to study basic optical access technologies. These technologies can be classified by the method of accessing the medium: time division multiplexed, wavelength division multiplexed and orthogonal frequency division multiplexed networks. Furthermore, I studied more technologies which comes from mixing basic methods.

Different technologies achieve different aggregate bandwidths and different maximal number of users on the shared medium. We can reduce costs and bandwidth when we take advantage of statistical multiplexing. To estimate aggregate bandwidth I have modeled the individual traffic of each user as two state ON-OFF sources. Thus, it was possible to calculate equivalent capacity of their bandwidth with normal distribution. Due to the estimated equivalent capacity shared medium could be divided among more users with the same aggregate bandwidth. The total cost of network per number of aggregated users ratio indicate cost efficiency of actual technology.

In last section of my study I compared technologies based on their calculated cost per user ratio and then I evaluated results.

1 Bevezetés

Napjainkban az internetet használók egyre nagyobb sávszélességet igényelnek a nagyon sok felhasznált vonzó multimédiaszolgáltatások és egyéb nagy átviteli sebességet igénylő alkalmazások használata miatt. Ezt a növekvő igényt a korábban használt hálózati technológiákkal egyre nehezebb kielégítenie a hálózati szolgáltatóknak. A szűk keresztmetszetet jelentő előfizetői hurkok felkészítése nagyobb átviteli sebességekre így kiemelkedően fontos feladat. A hagyományos rézvezetős hálózati összeköttetések (csavart érpár, koaxiális kábel) kihasználtsága magas a sávszélesség tekintetében, ezért a hálózati szolgáltatók számára igény volt gyorsabb hálózati technológiák bevezetésére.

A szolgáltatók számára olyan megoldásra volt szükség, amely a nagy sávszélességű összeköttetések biztosítása mellett egyszerű, olcsón kiépíthető, olcsón üzemeltethető és a jövőben könnyen továbbfejleszhető. Ezek a jellemzők leginkább az optikai hálózati technológiákra bizonyultak igaznak.

Az optikai összeköttetéseket egy kis keresztmetszetű magból és attól eltérő törésmutatójú anyagból készült héjből álló kábelek biztosítják. A mag és a héj eltérő törésmutatója biztosítja az optikai jelek kis csillapítású terjedését a szálban. Az optikai hálózatok előnye, hogy az optikai szálaknak kicsi a keresztmetszetük, így sok összefogható belőlük, a szál csillapítása kicsi és az optikai jelek nagy sávszélességet képesek biztosítani az összeköttetés két pontja között. Ezzel szemben, azonban hátrányuk, hogy nagyon sérülékenyek, ezért telepítéskor ügyelni kell a maximálisan megengedhető görbületi sugár betartására. Általában föld alatti vagy légekábel formájában kerülnek az optikai szálak elhelyezésre, de léteznek tenger alatti optikai összeköttetések is. Egy városi környezetben a föld alatti kábelhelyezés nem egyszerű és olykor meglehetősen drága feladat, gondoljunk csak a szükséges út- és járdabontások számára egy új hálózat lefektetésekor.

A hozzáférési hálózatokban az optikai hálózati technológiák közül a passzív optikai hálózatok (PON - Passive Optical Network) használata terjedt el. Egy PON legfőbb előnye, hogy a szolgáltatói és felhasználói oldalon elhelyezett hálózati végpontokon kívül a hálózat nem igényel áramforrást az összeköttetés biztosításához, tehát passzív. Másik fontos előnye a PON rendszereknek, hogy pont-multipont topológiával rendelkeznek, ami biztosítja a száltakarékosságot a szolgáltató számára. A pont-multipont elrendezés úgy alakítható ki, hogy a szolgáltató központi irodája (CO - Central Office) és az előfizetők között található egy teljesítményosztó eszköz. Az osztó

segítségével megvalósítható, hogy a CO felé egyetlen optikai szálon vagy szálpáron folyjon a kommunikáció, így az optikai teljesítményosztót az előfizetőkhez közel elhelyezve lehetőség nyílik száltakarékos hálózat megépítésére. Mivel az osztó és a CO között osztott közegen zajlik a kommunikáció, szükséges a felhasználók közeghozzáféréseinek szabályozása.

A közeg hozzáférési módja alapján beszélhetünk időosztásos PON-ról (TDM-PON - Time Division Multiplexing PON), hullámhosszosztásos PON-ról (WDM-PON - Wavelength Division Multiplexing PON) vagy ortogonális frekvenciaosztásos PON-ról (OFDM-PON - Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON). A TDM-PON hálózatok a legegyszerűbbek, azonban a legrugalmatlanabbak is, abból a szempontból, hogy a felhasználók meghatározott maximális átviteli sebességét nem tudjuk megnövelni a későbbiekben a CO és a splitter közötti aggregált átviteli sebesség fölé. A WDM-PON rendszerek nagyobb rugalmasságot biztosítanak ebből a szempontból a szolgáltató számára, mivel egy újabb hullámhossz felhasználóhoz rendelésével képesek növelni az előfizetőhöz jutó maximális sávszélességet. Az OFDM-PON hálózatokban a szolgáltató alvívöket rendelhet a felhasználókhoz, így a WDM-PON technológiánál kisebb granularitással, de ugyancsak nagy tartományban képes változtatni az előfizetőhöz jutó sávszélességet.

Az előző bekezdésben bemutatott 3 fő technológia ötvözésével további hibrid technológiák valósíthatóak meg, amelyek még tovább képesek növelni a rugalmasságot, illetve javítani a granularitást. A kérdés azonban az, hogy meddig éri meg a szolgáltató számára a flexibilitás növelése. A munkám során a cél az optikai hozzáférési hálózati technológiák és rugalmasságuk vizsgálata, összehasonlítása és rugalmasságuk számszerűsítése volt, vagyis annak megvizsgálása, hogy mikor és meddig éri meg csökkenteni a granularitást ezekben a rendszerekben a felmerülő költségek figyelembevételével.

1.1 A dolgozat célkitűzései és felépítése

A következő fejezetben elsőként részletesebben ismertetem a munka technológiai háttérét jelentő elterjedt PON technológiákat és azok lehetőségeit.

A harmadik fejezet tartalmazza dolgozatban megcélzott első nagyobb elméleti problémát és annak (analitikus) megoldását. A pont-multipont hálózatok felhasználói által generált forgalom dinamikus modellezése segítségével azt vizsgáljuk, hogy a hálózat megosztott szakaszán milyen mértékű statisztikus multiplexálási nyereség érhető el. Iparági szereplőkkel folytatott konzultációk szerint a napi gyakorlatban a végfelhasználóknak azonos névleges bitsebességet (pl. 100 Mb/s) biztosító pont-pont és

GPON hálózatok esetén utóbbin akár közel egy nagyságrenddel magasabb sáv szélességű szolgáltatást képesek biztosítani, csupán a multiplexálási nyereség kihasználása révén, így ennek szerepe közel sem elhanyagolható.

A negyedik fejezet az egyes technológiai megoldások értékeléséhez szükséges fajlagos költségek kiszámításának módját mutatja be: általános költségmodellekkel különböző közeghozzáférési technikákra épülő pont-multipont optikai hálózatok költségbecslését. Mivel a cél nem csupán néhány meglévő és a piacon elérhető technológia összehasonlítása volt, hanem az egyes technológiákban rejlő potenciál, és az esetleges továbblépési irányok értékelése, szükség volt olyan konfigurációk várható költségének becslésére is, amelyek ma a piacon még nem elérhetőek. Ezek költségének becslése összetett feladat, az egyes komponensek változó módon függhetnek a rendszer sáv szélességétől, a csatlakozó végpontok és a hullámhosszak számától, valamint azok kezelésétől. Az alkalmazott költségmodellben szereplő függvények ezen sajátosságok költségvonzatát fogalmazzák meg, megfelelő illesztés révén a ma elérhető megoldások árát jól írják le, és megfelelő közelítést adnak az esetleges továbbfejlesztési irányok költségeire is.

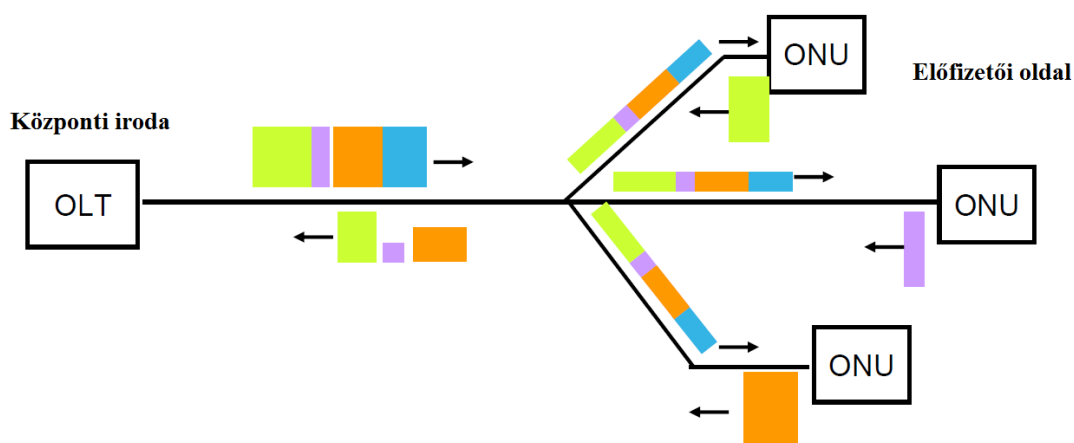
Az ötödik fejezetben ötvözöm a fentebb leírt megoldásokat: az osztott közegen elérhető statisztikus multiplexálás figyelembe vételével összehasonlítom az egyes pont-multipont hálózati technológiákat a kapott fajlagos költségeik alapján, és megvizsgálom, hogy az egyes technológiák milyen lehetőségeket rejtenek. Az utolsó fejezet az összegzést és a kitekintést foglalja magában.

2 Optikai hozzáférési hálózati technológiák

Ebben a fejezetben áttekintem az optikai hozzáférési hálózatok fontosabb és lehetséges típusait, továbbá ismertetem a későbbi összehasonlításukhoz szükséges tulajdonságaikat.

2.1 TDM-PON

A legegyszerűbb és a szolgáltatók által jelenleg is megvalósított optikai hozzáférési hálózatok közül a legelterjedtebbek az időosztásos közeghozzáféréseken alapuló passzív optikai hálózati technológiák. A TDM-PON-ok felépítését és működését szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra: TDM-PON felépítése [1]

2.1.1 Gigabit-capable PON (GPON)

A gigabit-képes GPON technológia a legegyszerűbb optikai hozzáférési hálózati technológia, bemutatását [2]-[4] források felhasználásával végzem.

Nevét az aggregált átviteli sebességéről kapta, ugyanis letöltési irányban 2488,32 Mb/s, feltöltési irányban 1244,16 Mb/s átviteli sebesség érhető el vele. Ez a sebességérték megoszlik a hálózatot használó előfizetők között. Egy GPON hálózatra a gyakorlatban maximum 64 felhasználót kapcsolnak, így az egy felhasználóra jutó átviteli sebesség a felhasználók számának függvényében 40-100 Mb/s.

A GPON hálózat a szolgáltatói egységből (OLT - Optical Line Termination), az optikai teljesítményosztóból és a felhasználói egységekből (ONU - Optical Network Unit) épül fel. Ezen eszközök között egy optikai szál vagy szálpár biztosítja az összeköttetést. Annak megfelelően, hogy optikai szálát vagy szálpárát használunk a

kommunikációhoz a hálózatban, a letöltési (felhasználói szemszögből) irányban használt hullámhossz eltérő lehet: 1 szál, száltakarékos esetben (ez az elterjedtebb) 1490 nm-es hullámhosszon, 2 szál átvitel esetén 1310 nm-es hullámhosszon történik az átvitel. A feltöltési irányban használt hullámhossz mindkét esetben megegyezik: 1310 nm.

A GPON hálózatokban az ajánlásnak megfelelően az OLT és a legtávolabbi ONU közötti távolság maximálisan 20 km lehet. A differenciális szálhosszúság is maximum 20 km lehet, amely azt mutatja meg, hogy az OLT-hez képest a legközelebbi és a legtávolabbi ONU közötti távolság mekkora. Az ennél nagyobb szálhosszúságbeli eltérések a feltöltési irányú időzítés és az OLT vevőjének véges dinamikatartománya miatt nem támogatottak.

A fel- és letöltési irányú kommunikáció a GPON-ra jellemző keretekben (GTC - GPON Transmission Convergence) történik. A használt kódolás NRZ. Egy GTC keret hossza fel- és letöltési irányban is 125 μ s hosszúságú. Feltöltési irányban 19440 bájtól áll, letöltési irányban 38880 bájt alkot egy GTC keretet.

A letöltési irányban haladó csomagok üzenetszórással minden ONU-hoz eljutnak, azonban a GTC keretek payload részében található GEM (GEM - GPON Encapsulation Method) keretek címezése alapján minden ONU csak a neki szóló GEM csomagokat veszi figyelembe. Feltöltési irányban egy ONU csak előre meghatározott időtartományban küldhet csomagot az ütközések és csomagvesztések elkerülése érdekében. Ezt az adási tartományt az OLT a letöltési irányú GTC keretekben az ONU-khoz tartozó egyéni pointerekkel (BWmap - Bandwith Map) szabályozza. Ezek a BWmap pointerek bájt alapon határozzák meg, hogy a feltöltési GTC keretben melyik ONU hányadik bájt után kezdhet csomagot küldeni és meddig kell befejeznie a kommunikációt. Tehát a GPON hálózatokban bájt alapú granularitással biztosított a közeghozzáférés. Ez 64 Kb/s-os granularitást jelent.

2.1.2 10 Gigabit-capable PON (10GPON)

A 10GPON szabvány a GPON 10 Gb/s aggregált sávszélességű továbbfejlesztett változata. A szakirodalomban XG-PON vagy NG-PON1 néven is előfordul. A technológia bemutatását [5]-[7] források alapján végzem.

A szabvány úgy lett kidolgozva, hogy a 10GPON hálózatok párhuzamosan telepíthetők legyenek a már meglévő GPON rendszerek mellé. Ehhez a paramétereit úgy választották meg, hogy ne ütközzenek a GPON paraméterekkel. A közös hálózatba telepítésükhöz szolgáltató központi irodájában a GPON-OLT mellé elhelyezésre kerül egy 10GPON-OLT is, amelyek hullámhossz-osztásos splitteren keresztül csatlakoznak

az optikai elosztóhálózathoz. Így a GPON-ONU-k és 10GPON-ONU-k vegyesen kapcsolhatók a hálózathoz és a nekik megfelelő központi egységgel képesek kommunikálni.

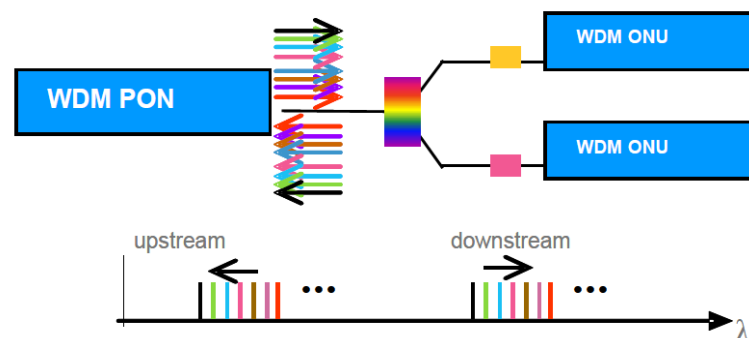
A 10GPON hálózatokban az aggregált sávszélesség 9953,28 Mb/s letöltési irányban és 2488,32 Mb/s a feltöltési irányban. A splitterek osztási arányának az ajánlás szerint támogatnia kell a GPON hálózatoknál gyakori 64 osztásos értéket, azonban lehetővé kell tennie többszörös osztási lehetőséget is, amely akár 128 is lehet. A GPON rendszerektől eltérően a letöltési irányú kommunikációra az 1577 nm-es hullámhosszt használják, a feltöltési irányú kommunikációra az 1270 nm-es hullámhosszt, így biztosítva az egy optikai hálózatban való használhatóságot a GPON hálózattal. A 10GPON hálózatokban az ajánlásnak megfelelően az OLT és a legtávolabbi ONU közötti maximális távolság értékének legalább 20 km-nek kell lennie, hogy a GPON hálózatokkal biztosított legyen a kompatibilitás.

A kommunikációhoz a 10GPON rendszerekben a GPON keretezés továbbfejlesztett változatát, XGTC keretezést használják. Az XGTC kereteket PHY keretekben szállítják, ezek hossza 125 μ s. A letöltési irányú PHY keretek 38880 szóból állnak. Egy szó 4 bájtot jelent, tehát a fizikai rétegben letöltési irányban 125 μ s alatt az OLT 155520 bájtot küld az ONU-k irányába. A feltöltési irányú PHY keretek 38880 bájtot hosszúak.

A 10GPON hálózatokban is, a GPON-hoz hasonlóan, az OLT BWmap pontterekkel szabja meg az ONU-k küldési idejét, azonban ez szó (4 bájtot) alapú. Ez azt jelenti, hogy a granularitás 4-szeres a GPON-hoz képest, tehát 256 kb/s a 10GPON hálózatokban.

2.2 Wavelength Division Multiplexing PON (WDM-PON)

A hullámhosszosztásos hálózatok bemutatását [8] forrás 4.2 fejezete alapján teszem. A WDM-PON-ok felépítését a 2. ábra mutatja be.



2. ábra: WDM-PON felépítése [1]

A WDM-PON hálózatokban a felhasználók eltérő hullámhosszakat használva kapcsolódnak az OLT-hez egy hullámhossz szelektív elosztó egységen (AWG - Arrayed Waveguide Grating) keresztül. Az így kapott hálózat a következő előnyökkel rendelkezik: az optikai hálózat által nyújtott nagy sávszélesség jobban kihasználhatóvá válik, protokoll és szolgáltatás független kapcsolat valósul meg a végpontok között, könnyen skálázhatóvá válik a sávszélesség, alacsony csillapítású optikai csatornán zajlik a kommunikáció és a hálózati topológia virtuálisan pont-pont összeköttetésnek tekinthető. Mivel minden hullámhosszhoz csak egyetlen ONU-nak van hozzáférése, ezért garantált a hálózat biztonságos használata is.

A WDM-PON technológia egyik hátránya a magasabb megvalósítási költsége, amely miatt a ma használt hálózatokban még nem terjedt el széles körben. A magasabb árat a bonyolultabb kialakítású ONU-k használata indokolja, ugyanis a szolgáltatók részéről követelmény az eszközök gyártói felé az ONU-k hullámhossz függetlenségének biztosítása. Erre az üzemeltetés, gyártás és raktározás egyszerűsítése miatt van szükség. A problémára két megoldást jelentő módszer terjedt el: hangolható lézerek használata az ONU-k adóegységében, reflektív adóval rendelkező ONU-k használata a hálózatban.

2.2.1 WDM-PON hangolható lézerekkel

A WDM-PON hálózatokban biztosítani kell az eltérő hullámhosszúságú vivők előállítását a kommunikáció számára. Az első kezdeményezésekben ezeket hangolható lézerekkel valósították meg az OLT-ben és az ONU-kban is.

Az ONU egységek adóvevőinek az előfizetők nagy száma miatt biztosítaniuk kell az alacsony árat, alacsony energiafogyasztást és a hullámhossz független működést. A költségek és a fogyasztás alacsonyan tartása céljából az ONU-k hűtés és hullámhossz követő vezérlés nélküliek, ami speciális hangolási követelményeket támaszt a WDM-PON hálózatokban.

Lehetőségünk van a WDM rendszerek integrációjára egy már meglévő optikai hálózatban (pl.: GPON), amely AWG helyett splitterrel osztja szét az optikai jeleket az ONU-k felé. Ebben az esetben a WDM-PON ONU-kban szükség lesz egy hullámhossz szelektív eszköz alkalmazására. Általában két megoldás közül választhatunk, vagy hangolható szűrőt vagy hangolható lézert kell az ONU vevőjébe építenünk. Egy ilyen integráció során, azonban számolnunk kell a teljesítményosztó miatti nagy csillapítással, vagyis a hálózat által lefedhető terület csökkenésével.

Egy egyszerű DWDM-PON rendszerrel akár 80 kétirányú csatorna megvalósítása lehetséges egy optikai szál használata esetén [9]. Mivel jelentősen több csatornára lenne szükség, hogy sok felhasználót kiszolgáló hálózatot kapjunk, ezért figyelembe kell venni a csatornák számának bővítési lehetőségét. Több csatorna használatához addig kell növelni a használandó hullámhossz tartományt, illetve csökkenteni a csatornák optikai sávzélességét, ameddig lehetséges.

Amennyiben az AWG sávzélessége elég nagy és az átviteli sebesség és a frekvencia stabilitás lehetővé teszik, egyszerű megoldás lehet a hangolható lézerek használata olyan módon, hogy a feltöltési optikai vivőfrekvenciát a letöltési vivőfrekvenciához közelre állítva (de ügyelve az ütközés elkerülésére) az AWG azonos portján történjen a kommunikáció. Azonban a stabil hangolható lézerek magas ára jelenleg korlátozza az elterjedést a hozzáférési hálózatokban.

2.2.2 WDM-PON reflektív adóegységekkel

A WDM-PON hálózatba szerelt hangolható adóegységek alapvető alternatíváit a reflektív adóval rendelkező ONU-k jelentik. Ezekben a hálózati megoldásokban az OLT biztosítja a feltöltési irányban a vivőt az ONU-k számára, amelyek azt reflektálva és modulálva a feltöltéseknek megfelelően visszairányítják az OLT felé. Ennek a megoldásnak az előnye, hogy az OLT-ben nagyteljesítményű és korszerű alkatrészek foglalhatnak helyet, míg az ONU-k felépítése egyszerűsödik és olcsóbbá válik, ezzel nagymértékben csökkentve a hálózatépítési költségeket.

A reflektív hálózat kiépítéséhez az OLT-be építhetünk multi-frekvenciás lézereket, amelyek hangolásmentessé teszik a hálózatot és nagyobb kisugárzott optikai teljesítménnyel képesek a hálózattal lefedhető terület méretét növelni.

A reflektív adókkal lehetséges a fel- és letöltési kommunikációra ugyanazt a hullámhosszat használni, ezzel növelve a spektrális hatékonyságot. Az azonos hullámhossz használatakor azonban figyelembe kell vennünk a csatornák közötti áthallást, amely elkerülhetetlen. A kétirányú kommunikáció megvalósításához egy vivővel, olyan modulációt kell használni a letöltési irányban, mely a feltöltési irányú adatok küldésekor másik modulációs eljárással újramodulálható. Erre a gyakorlatban letöltési irányban frekvenciamodulációt használnak, feltöltési irányban pedig ezt a frekvenciamodulált jelet újramodulálva intenzitás modulációval küldi vissza az ONU az

OLT-nek. Az újramodulálás a frekvenciamodulált letöltési irányú jel konstans intenzitása miatt lehetséges intenzitás modulációval.

Reflektív adóegységekkel megvalósítható az újramodulálásnál egy egyszerűbb módszer is, amelyet a modulálatlan pilotjel küldése jelent az OLT-ből az ONU felé. Így, az OLT-nek kell biztosítania a pilotjelet az ONU számára, amelyet az ONU modulálva visszaküld az OLT-nek.

2.3 OFDM-PON

Az OFDM-PON alapú hálózatok bemutatását [8] forrás 4.3 fejezete alapján teszem.

Az optikai hozzáférési hálózatokban az átviteli sebesség növelésének szükségessége az adó-vevők sávszélességének megtartása mellett az ortogonális frekvenciaosztásos multiplexálás (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) alkalmazását eredményezte. Az OFDM egy olyan több vivős modulációs módszer, amellyel egy optikai csatornán áthaladó adatfolyamot több keskenysávú ortogonális csatornán küldhetünk át. Az alcsatornák ortogonálisak és a frekvenciatartományban egymásra lapolódnak, azonban az alvivők maximumánál, a többi alvivő 0 értéket vesz fel. Az OFDM előnye, hogy az optikai eszközök változtatása nélkül elektronikus jelfeldolgozással könnyen skálázható magasabb rendű modulációs formátumba, például 16-QAM, 64-QAM is lehetséges.

Az alacsony sávszélességű alcsatornák lehetővé teszik a rugalmas erőforrás allokációt a hálózatban és nagy granularitást biztosítanak. Az erőforrás allokációra dinamikus alvivő allokációs algoritmusok használhatók. Továbbá a modulációs formátum változtatásával is változtatható a felhasználóhoz jutó átviteli sebesség értéke.

Az OFDM rendszer megvalósításának fő kihívását a fázis zajra való érzékenysége és az egyes vivőfrekvenciák közötti ofszet által eredményezett vivők közötti interferencia jelenti. Problémát jelenthet még a az OFDM jelekre jellemző nagy csúcstényező. Az OFDM rendszerek készítéséhez nagyfelbontású analóg-digitális és digitális-analóg konverterekre is szükség van, a konverterek felbontása korlátozza az alvivők számát.

Az optikai kommunikációban két fő OFDM megközelítés létezik melyek közül az egyik a koherens optikai OFDM (CO-OFDM - Coherent Optical OFDM), másik

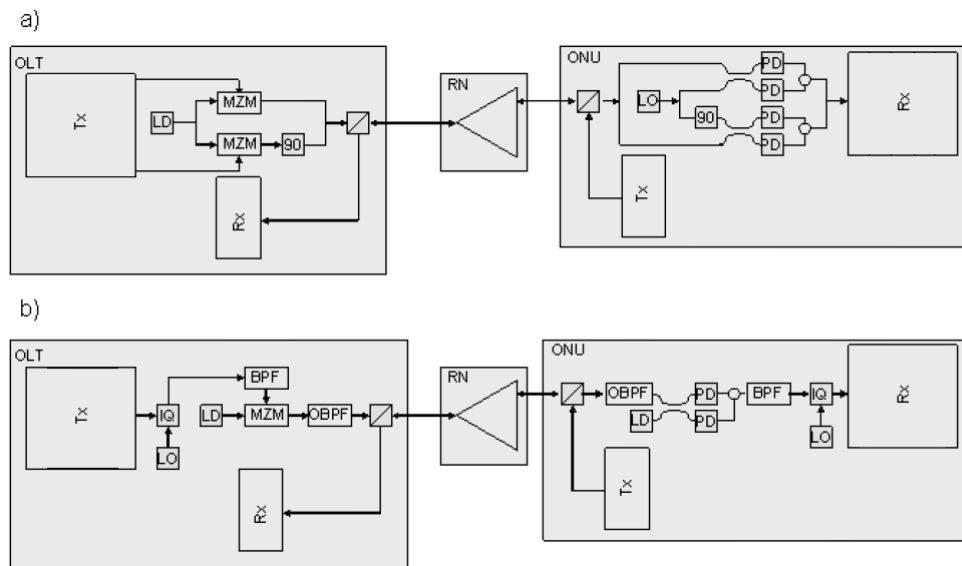
pedig a direkt detekciós optikai OFDM (DDO-OFDM - Direct Detection Optical OFDM). A CO-OFDM jobb megoldásnak számít spektrális hatékonyság szempontjából, azonban a megvalósításához több és bonyolultabb eszközökre van szükség, mint például I/Q modulátorokra, rádiófrekvenciás keverőkre vagy koherens vevőkre. A DDO-OFDM módszer az egyszerűbb optikai intenzitás modulációra épül.

2.3.1 Koherens optikai OFDM

A koherens OFDM hálózatokban az adó és a vevő a fel és a le irányú konverziót végezheti helyi oszcillátorral vagy anélkül is. Minden esetben szükség van soros-párhuzamos, illetve párhuzamos soros átalakításra az OLT-ben és az ONU-ban. A digitális időtartománybeli jelet az inverz Fourier-transzformációval (IFFT - Inverse Fast Fourier Transform) értjük el és ezt követően védelmi idővel egészítjük ki és konvertáljuk át a digitális-analóg konverterek segítségével. A védőidővel a csatorna diszperziója miatt keletkező szimbólumközi áthallást csökkenthetjük.

A közvetlen felkonvertálásnál (3. ábra, a) az optikai adóegység optikai I/Q modulátort használ, ami két Mach-Zender modulátorból tevődik össze, hogy a valós és a képzetes részét a jeleknek a rádiófrekvenciás tartományból az optikai tartományba konvertálja. Az optikai OFDM vevőegység két pár szimmetrikus vevőt és egy optikai 90°-os késleltetőt alkalmaz, hogy az optikai I/Q vételt teljesítse. A rádiófrekvenciás OFDM vevő alapsávi jelfeldolgozást végez, hogy visszaállítsa a küldött adatokat. A közvetlen konvertálás előnye, hogy nem igényel szűrőt az adó és a vevő a kommunikációhoz, továbbá csökkentett elektronikus sávszélességet igényel az adó és a vevő oldalon is.

A köztes frekvenciás (3. ábra, b) (IF - Intermediate Frequency) architektúrában az OFDM alapsávi jelet először felkonvertáljuk egy közepes frekvenciára az elektronikus tartományba és később végezzük el a jel optikai tartományba konvertálását egy Mach Zender-modulátorral. Vétel során az optikai OFDM jelet először lekonvertáljuk egy köztes frekvenciára és elektronikus I/Q vételt végzünk. A jelet ezután egy analóg-digitális konverterrel mintavételezzük és FFT eljárással demoduláljuk. Végül a digitális jelfeldolgozó egység (DSP - Digital Signal Processing) elvégzi a torzítás kiegyenlítést, frekvencia offset kompenzációt, fázis helyreállítást és a szimbólum azonosítást.



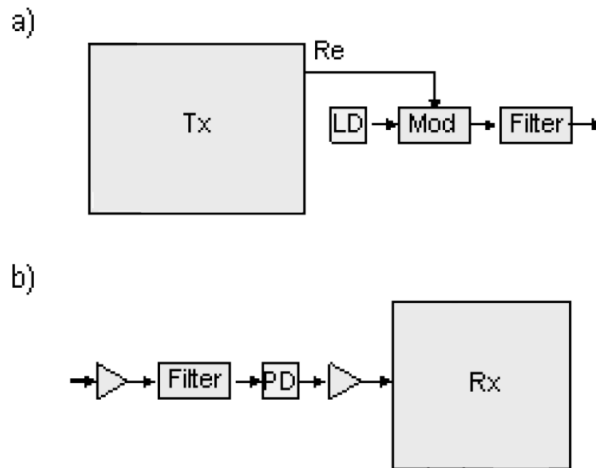
3. ábra: CO-OFDM megvalósítási lehetőségei: a) közvetlen fel- és lekonvertálással, b) köztes frekvenciás konvertálással [8]

2.3.2 Direkt Detekciós Optikai OFDM

Talán a legvonzóbb OFDM megoldás a PON hálózatokban a költségeket figyelembe véve a DDO-OFDM. A direkt detekciós vétel egyszerűbb vevő felépítést tesz lehetővé a CO-OFDM vételénél a spektrális- és az energiahatékonyság rovására. Általában egy optikai oldalsávú (OSSB - Optical Single Side Band) OFDM jel és a vivőfrekvenciás komponens átvitelével valósítják meg. Az OFDM jelet frekvenciatartománybeli védősávval választják el az optikai vivőtől. Több megvalósítási lehetőség van egy DDO-OFDM adóegységnek, amelyek közül a legegyszerűbbet mutatom be. A bonyolultabb típusokban összetettebb optikai modulátorok és több digitális-analóg átalakító eszköz alkalmazására van szükség.

A 4. ábra a) részén látható adóegység egy egyszerű optikai modulátor segítségével végzi el a az optikai tartományba történő konverziót. A modulátor kétoldalsávú optikai jelet bocsát ki, és ezután az egyik oldalsávot egy optikai szűrő kiszűri. A modulátor elektronikus bemenete egy valós alapsávi jelet kap és csak egy darab digitális-analóg konverterre van szükség.

A 4. ábra b) részén egy egyszerű direkt detekciós optikai vevő látható. A fotódióda négyzetes karakterisztikája miatt a vett jel számos kevert összetevőből áll. Ezek közül a hasznos komponensek az OFDM oldalsáv és az optikai vivő keveréséből állnak elő.



4. ábra: DDO-OFDM a) adóegység és b) vevőegység blokkvázlata [8]

2.4 Hibrid PON rendszerek

A korábban bemutatott alapvető technológiák ötvözésével további új architektúrák valósíthatók meg, amelyekre így több technológia tulajdonságai lesznek jellemzőek. Ezek a hibrid PON technológiák általában nagyobb előfizetői bázis kiszolgálását, nagyobb rugalmasságot vagy magasabb átviteli sebességet tesznek elérhetővé.

2.4.1 TWDM-PON

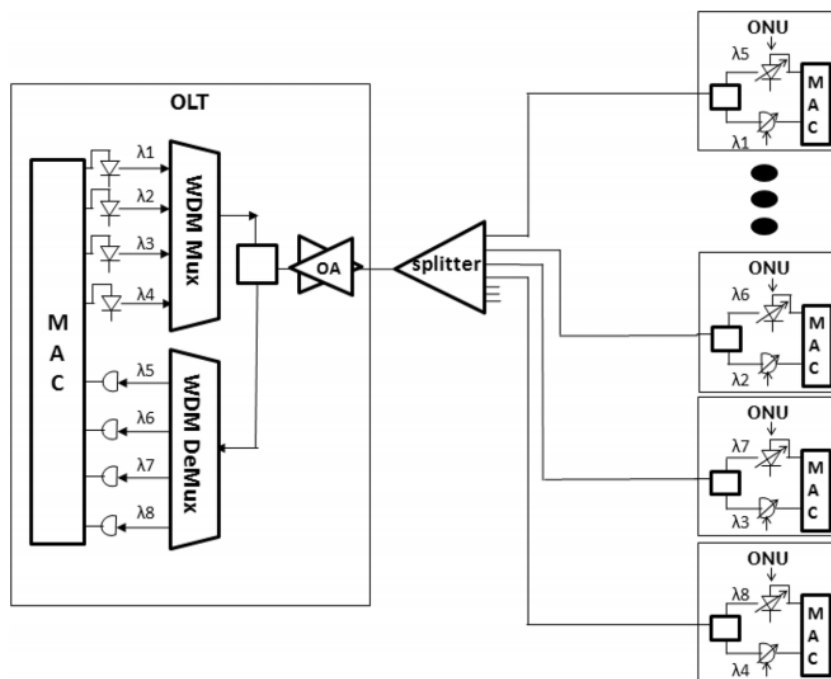
A TWDM-PON elnevezés a Time-Wavelength Division Multiplexing PON összetételből ered és olyan architektúrát takar, amelyben egyszerre valósul meg a felhasználók között időosztás és hullámhosszosztás is.

A TWDM-PON - másik nevén NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network Stage 2)) - projekt az FSAN (Full Service Access Network) közösség által lett elindítva [10]. A projekt fő célja annak megvizsgálása volt, hogy hogyan lehet az optikai hozzáférési hálózatban az átviteli sebességet 10 Gb/s fölé emelni. A szolgáltatók fő elvárásai a rendszerrel szemben a következők voltak: legalább 40 Gb/s aggregált letöltési sebesség, 40 km lefedhető távolság, 1:64-es osztásarány támogatása és legalább 1 Gb/s hozzáférési sebesség elérése ONU-nként.

Több alkalmas technológia is kínálkozott a 10 Gb/s átviteli sebesség átlépésére. Ezek közül az FSAN közösség és a nemzetközi gyártók támogatását a TWDM technológia kapta, amely több időosztásos 10GPON rendszer WDM technológiával

való összegzésén alapul. A TWDM-PON architektúra négy hullámhossz-párral képes biztosítani a 40 Gb/s letöltési és 10 Gb/s feltöltési sebességet.

Az alapvető TWDM-PON architektúrát mutatja az 5. ábra. Látható, hogy összesen négy hullámhossz-párt használ a rendszer, egy hullámhosszpárt egy letöltési és egy feltöltési hullámhossz alkot. Az egyszerű hálózati telepítés és leltározás eléréséhez hullámhossz független ONU-kból épül fel a hálózat. Az ONU-k hangolható adó- és vevőegységekkel rendelkeznek, melyek a négy hullámhossz közül bármelyikre hangolhatóak. Az OLT-ben a megfelelő teljesítményviszonyok eléréséhez egy optikai erősítő (OA – Optical Amplifier) található, ez végzi a letöltési irányú jelek erősítését és a feltöltési irányú jelek feldolgozás előtti előerősítését. Az optikai elosztóhálózat (ODN – Optical Distribution Network) teljesen passzív, mivel az erősítő és a WDM multiplexer/demultiplexer az OLT-ben helyezkedik el, a hálózatban egy egyszerű optikai teljesítményosztó található.



5. ábra: TWDM-PON rendszer felépítése [10]

A TWDM-PON hálózatok előnye, hogy a szolgáltatónak lehetősége van arra, hogy kezdetben akár egy OLT-vel és egy hullámhossz-párral építse ki a hálózatát, majd később a felhasználói bázis növekedésével bővítheti azt, amennyiben szükséges. Továbbá lehetőség nyílik a TWDM-PON használatával az előfizetői hurkok szolgáltatók közötti megosztására is. Ebben az esetben minden egyes operátor

rendelkezik egy saját OLT-vel és a hozzá tartozó néhány hullámhossz párral. Ezután a szolgáltatói OLT-k portjait egy közös WDM multiplexeren át egy optikai szálba vezetve összegzik a forgalmakat.

3 Statisztikus multiplexálás és forgalmi modellezés

Iparági szereplőkkel folytatott konzultációk rámutattak, hogy a pont-multipont hálózatok megosztott szakaszán elérhető multiplexálási nyereség közel sem elhanyagolható tényező. Ez ugyanis a napi gyakorlatban már egy GPON hálózat esetén is közel egy nagyságrenddel magasabb sáv szélességű szolgáltatást tesz lehetővé, mint amit a rendszer névleges sáv szélessége biztosíthatna. Mivel az optikai hozzáférési hálózati eszközök árának meghatározó összetevője az adott sebességnek megfelelő optikai adó és vevő egység, e jelenség fontos szerepet játszik hálózatok méretezésekor.

Az elérhető multiplexálási nyereség meghatározása érdekében szükség volt a felhasználók által generált forgalom dinamikus modellezésére, így a fejezetben ismertetem az alkalmazott egyszerű, de a multiplexálási nyereség számítására képes forgalmi modellt, majd bemutatom, hogy ennek segítségével hogyan számíthatjuk ki az adott kapacitású osztott közegen kiszolgálható előfizetők számát.

3.1 Statisztikus multiplexálás

A statisztikai modellek használatán alapuló és a felhasználók forgalmát összegző hálózati technikát statisztikus multiplexálásnak nevezzük [11]. A módszer az áramkörkapcsolt rendszerek használata során terjedt el a szolgáltatók között: a telefonhálózatot a felhasználók általában csak rövid idejű telefonbeszélgetésekre használták, ezt felismerve a szolgáltatók a telefonközpontok közötti összeköttetéseket olyan módon méretezték, hogy a linkek kapacitása kevesebb legyen, mint az összes felhasználó egyidejű kiszolgálásához szükséges kapacitás. Ilyen módon kialakított hálózati kapcsolatnál sok előfizető volt képes osztozni a hálózati kapacitásokon és a szolgáltató költséget takarított meg ezáltal. Azonban, amikor több előfizető telefonált, mint amennyire a hálózati összeköttetés méretezve volt, hívásblokkolás következett be. Az előfizetők viselkedését leíró statisztikus modellek ismeretében az operátor képes volt megbecsülni a hívásblokkolás valószínűségét például egy évre vonatkoztatva. A felhasználók telefonálási szokásainak statisztikai modellezése a hívásblokkolás vagyis a szolgáltatás kiesési idejének minimalizálása miatt volt fontos.

A multiplexálás során a hálózati összeköttetés méretezésének eredményeül kapott kapacitást ekvivalens kapacitásnak nevezzük. Az ekvivalens kapacitás alatt azt a

hálózati kapacitást értjük, amely elegendő kiszolgálni adott összkapacitású felhasználót bizonyos konfidencia intervallummal meghatározott hívásblokkolás mellett. Bevezetve a névleges kapacitás fogalmát, amely alatt a felhasználók kiszolgálásához szükséges statisztikus multiplexálás nélküli kapacitást értjük, a multiplexálási nyereséget az ekvivalens és a névleges kapacitás különbségeként értelmezhetjük.

A statisztikus multiplexálás módszere alapvetően az áramkörkapcsolt telefonhálózatok méretezésére volt kitalálva, azonban a csomagkapcsolt hálózatok méretezése során is elterjedt metódus a költségmegtakarítás ezen formája.

3.2 Forgalmi modellezés

A hálózati forgalmak statisztikus multiplexálásához szükséges a felhasználók hálózati folyamatait valamilyen statisztikai modellel leírni. Tudatában annak, hogy a forgalmi modellezés egy nagyon bonyolult és összetett tudományág, a munkám során próbáltam egy egyszerű, de a multiplexálási nyereség megjelenítésére alkalmas statisztikai modellel leírni a felhasználók hálózati forgalmát – a dolgozatban bemutatott munka célja elsősorban ugyanis nem a forgalmi modellezés maga, hanem az eltérő multiplexálási technikák révén elérhető multiplexálási (nyalábolási) nyereség összehasonlítása volt.

A hálózati forgalmat az felhasználók által futtatott alkalmazások generálják, amelyek közül a legjellemzőbbek három csoportba sorolhatók: a webes tartalmak elérését segítő alkalmazások, a peer-to-peer alapú fájlmegosztó alkalmazások és a multimédiás tartalom elérésére szolgáló alkalmazások [12]. A munkám során az egyszerű forgalmi modell kialakítása céljából, és mivel a felhasználók legnagyobb része a hálózati összeköttetését webes tartalom elérésére és böngészésére használja, elsődlegesen a webes jellegű forgalmak modellezését tartottam szem előtt. Ez az általánosítás a következő szempontok figyelembevételével történt. A peer-to-peer fájlmegosztást használó felhasználókról általában feltételezhető, hogy nagyméretű fájlokat osztanak meg egymással, amely teljes sáv szélességű kapcsolatot vesz igénybe a le- és a feltöltési irányban is. Az ilyen nagy forgalmat bonyolító "heavy userek" általában kevesen vannak a hálózatban, számuk $\sim 0,1\%$ körüli [13]. Mivel az optikai hozzáférési hálózatokban egy hálózatához általában kevés előfizető csatlakozik, tipikusan maximum néhány száz, ezért a nagyforgalmat bonyolító "heavy userek" száma nagyon kicsi. Meg kell jegyeznünk, hogy amennyiben figyelembe szeretnénk

őket venni a modellezés során, megtehetjük, hogy a számukra külön sáv szélességet allokálunk - amelyet az idő nagy részében ki fognak használni teljes kapacitással - és ezen sáv szélességgel csökkentett maradék kapacitásra végezzük el a statisztikus multiplexálást. A multimédiás tartalommal kapcsolatos szolgáltatásoknak a hálózati sáv szélességét az alkalmazásokban használt kodekek határozzák meg. A kodekek bitsebessége vagy a bitsebességüknek maximuma állandó. Ahhoz, hogy a hálózat ki tudja szolgálni a multimédia alkalmazás igényét, a kodek bitsebességének kisebbnek kell lennie a hálózati kapacitásnál. A későbbiekben feltételezni fogom a végpontokról, hogy mind a maximális sáv szélességet kihasználva forgalmaz a hálózaton, ezért a multimédia alkalmazások által generált forgalmak modellezésétől eltekintek.

A továbbiakban a felhasználók webes hálózati folyamatainak modellezését részletezem. A web kliensek működése a valóságban állandóan változó bitsebességű folyamatokat generál a forgalomban, azonban modellezhetőek ON-OFF jellegű források leírásával [12]. Az ON-OFF jellegű forrásmodellezés azt jelenti, hogy az adott felhasználó egy időpillanatban vagy használja a hálózatot teljes sáv szélességgel (ON állapot) vagy nem bonyolít forgalmat (OFF) állapot. Ahhoz, hogy a felhasználó ON állapotban van p valószínűséget rendelhetünk, így az OFF állapot valószínűségére $(1-p)$ valószínűség adódik. Az ilyen felhasználói forgalmi modell a valószínűség számítás egy jól ismert eloszlását eredményezi, a kétállapotú Bernoulli-eloszlást. Az eloszlás leírásához x_i valószínűségi változót használjuk. A felhasználók egymástól független viselkedésének köszönhetően a modellezésükre szolgáló Bernoulli valószínűségi változókat összegezhethetjük és így $X = \sum_{i=1}^n x_i$ binomiális eloszlású valószínűségi változót kapunk eredményül, amely a felhasználók összegzett forgalmát vagyis az optikai hozzáférési hálózatok esetében az osztott közeg forgalmát jellemzi.

Továbbá vegyük észre, hogy az azonos sebességgel kommunikáló végpontokkal való modellezés előnye, hogy számításaink során nem szükséges figyelembe venni az adott optikai technológiájú rendszerekre jellemző granularitást. A granularitást nem szabadna figyelmen kívül hagynunk, amennyiben a modellben a végpontok eltérő sebességekkel lennének képesek kommunikálni.

3.3 Multiplexálási nyereség számítása

Az X valószínűségi változó eloszlásának ismeretében, megállapítható a várható értéke és a szórása. Mivel X binomiális eloszlású, így a várható értékére igaz a

következő összefüggés: $E(X) = n \cdot p$ és tudjuk, hogy a szórása $\sigma_{Binom} = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)}$ lesz. Jelölje C az ekvivalens kapacitást, vagyis azt a hálózati kapacitást, amely megadott blokkolási valószínűség mellett elég a hálózat számára n felhasználó kiszolgálásához. Mivel a várható értékre méretezve a hálózati összeköttetés az idő nagy részében túlterhelődne, továbbá C ekvivalens kapacitással kicsi blokkolási valószínűség biztosítható, ezért tudjuk, hogy $n \cdot p < C < n$, ahol n az összes felhasználó számát, illetve hálózati forgalmát jelöli egységnyire választva a felhasználói forgalmazás mértékét. Tehát például ha 100 felhasználó 40%-os valószínűséggel használja adásra a hálózatot, akkor az összegzett forgalmuk várható értéke 40 egységnyi egy felhasználóra jutó sávszélesség lesz és ebben az esetben az ekvivalens kapacitásuk 40 és 100 közötti.

A multiplexálási nyereség számításánál a feladat az ekvivalens kapacitás meghatározása, megadott blokkolási valószínűség figyelembevételével. A kiszámítás a következő módon történik: olyan C ekvivalens kapacitás értéket keresünk, amelyre igaz, hogy X valószínűségi változó C -nél nagyobb értékeket összesen ε valószínűséggel vesz fel. Ebben az esetben ε a megadott blokkolási valószínűség értékét jelöli, azaz az idő ekkora részében lesz a hálózati összeköttetés túlterhelve. A túlterhelés jelen esetben nem a kapcsolat megszakadását jelenti, hanem a felhasználók sávszélességének csökkenését, tehát nem kell túl szigorú követelményt megadnunk. A feladat matematikailag tehát a $P(X > C) = P(\sum_{i=1}^n x_i > C) = \varepsilon$ egyenlet megoldását jelenti, ahol P -vel egy esemény bekövetkezésének valószínűségét jelöltem.

Az egyenlet megoldásához a binomiális eloszlást a 6. ábra által mutatott módon közelíthetjük normális eloszlással. Erre azért van szükségünk, mert a normális eloszlású valószínűségi változó blokkolási valószínűsége könnyen számítható a Gauss-féle hibafüggvény alkalmazásával [14]. A Gauss féle hibafüggvényt a következő módon számíthatjuk ki: $\text{Erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-t^2} dt$. A normális eloszlást a következő formulával tudjuk közelíteni [14]:

$$N(m, \sigma)(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{Erf} \left(\frac{x-m}{\sqrt{2} \cdot \sigma} \right) \right],$$

ahol m a normális eloszlás várható értékét σ pedig a szórását jelöli. A megkapott formula segítségével kiszámítható a normális eloszlás hibavalószínűsége:

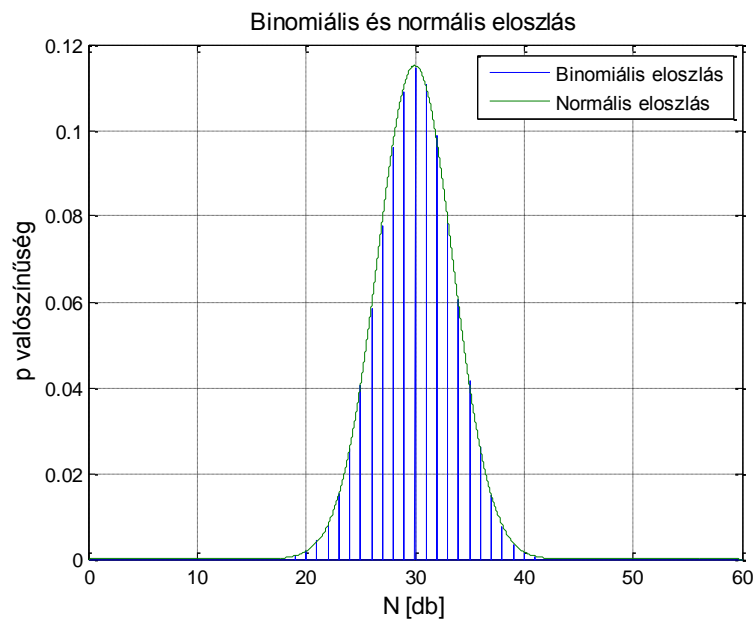
$$\varepsilon = 1 - N(m, \sigma)(x) = \frac{1}{2} \text{Erfc} \left[\frac{x-n \cdot p}{\sqrt{2 \cdot n \cdot p \cdot (1-p)}} \right],$$

amely egyenletben az Erfc függvény, az Erf hibafüggvény komplementerét jelenti és behelyettesíttem a normális eloszlás várható értékét és szórását. Tehát, ha C ekvivalens kapacitás értékét szeretnénk meghatározni, adott ε blokkolási valószínűsége, akkor a

$$P(X > C) = \frac{1}{2} \operatorname{Erfc} \left[\frac{c - n \cdot p}{\sqrt{2 \cdot n \cdot p \cdot (1 - p)}} \right] = \varepsilon$$

egyenletből kell kifejeznünk C -t. A végeredményül kapott egyenlőség:

$$C = n \cdot p + \sqrt{2 \cdot n \cdot p \cdot (1 - p)} \cdot \operatorname{Erfc}^{-1}(2 \cdot \varepsilon).$$



6. ábra: Binomiális és normális eloszlás összehasonlítása

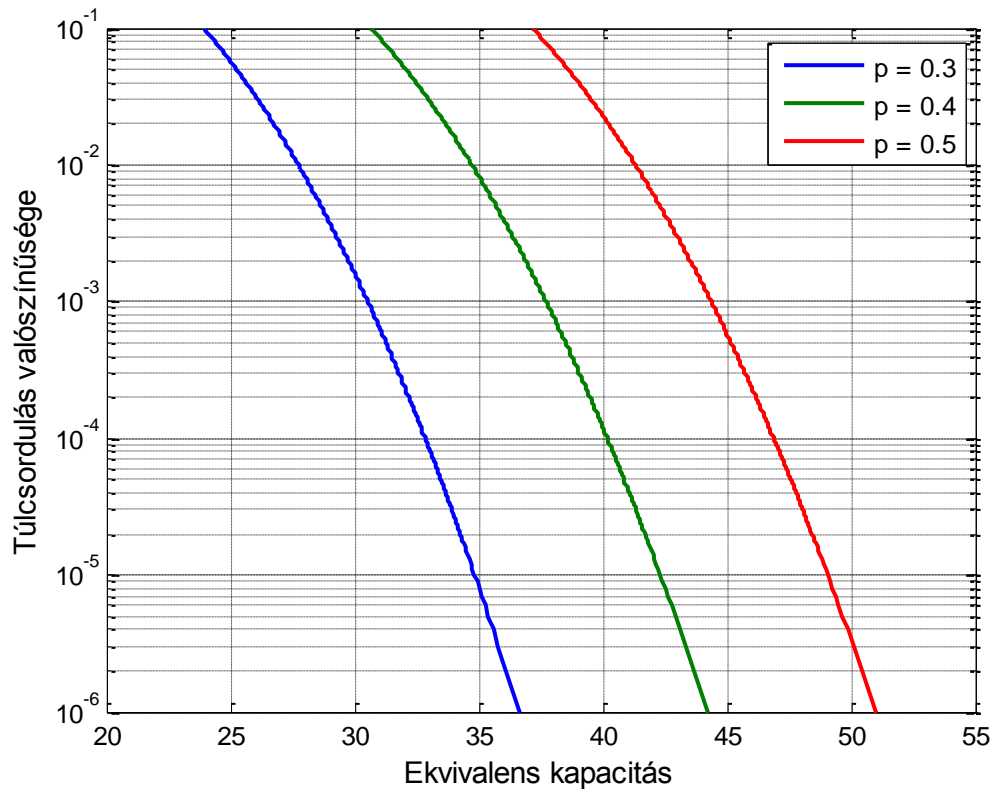
Látható, hogy az ekvivalens kapacitás n, p és ε paraméterek ismeretében könnyen meghatározható, amennyiben minden hálózati csomópont ON-OFF jellegű forrásként viselkedik és mindegyikük p valószínűséggel használja a hálózatot forgalmazásra teljes sáv szélességével.

Mivel több felhasználó forgalmát statisztikusan multiplexálva egyre nagyobb a multiplexálási nyereség érdemes ezt az átlaghoz viszonyítva kiszámítanunk. Az átlagtól való relatív eltérést a következőképpen számíthatjuk ki:

$$\frac{c - n \cdot p}{n \cdot p} = \operatorname{Erfc}^{-1}(2 \cdot \varepsilon) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - p)}{n \cdot p}}.$$

Ezen összefüggés alapján n növelésével az átlagtól való relatív eltérés $\frac{1}{\sqrt{n}}$ -nel változik, tehát a multiplexálási nyereségünk ennek megfelelően nő.

Az 7. ábra megmutatja, hogy $n = 64$ felhasználó esetén és a statisztikus multiplexálást felhasználva mekkora hálózati kapacitás szükséges a kiszolgálásukhoz $p = 30\%$, 40% és 50% esetén. Az ábráról a méretezéshez egyszerűen leolvashatjuk az értékeket. Amennyiben például 64 felhasználót szeretnénk kiszolgálni, akikről tudjuk, hogy a hálózati kapcsolatot csak 40% -ban használják forgalmazásra, 10^{-3} blokkolási valószínűség mellett, akkor elegendő csupán 37 felhasználónyi sáv szélességet biztosítani számukra (vagy fordítva: 64 felhasználóra elegendő sáv szélesség valójában alkalmas 118 felhasználó kiszolgálására).



7. ábra: Ekvivalens kapacitás értékei $N=64$ felhasználó esetén

4 Metrika az összehasonlításához

Ez a fejezet az eltérő hálózati technológiák összehasonlításához szükséges egy felhasználóra jutó költségek kiszámításának módját mutatja be különböző pont-multipont optikai hálózatok számára. Mivel a munkámmal a cél a jelenleginél jobbedelmezőbb hálózatok irányelveinek a kutatása, így a költségmodellezéssel szükség volt olyan lehetséges hálózati topológiák várható költségének becslésére is, amelyek ma a piacon még nem elérhetőek. Ezeknek a jövőbemutató hálózati rendszerek költségének becsléséhez a következő költséget befolyásoló paramétereket kellett figyelembe vennem: a rendszer sávszélessége, a csatlakozó végpontok és a hullámhosszak száma, valamint az osztott közeg hozzáférési módja. Az így kapott költségmodellben szereplő függvényekkel az optikai hozzáférési hálózatok jól leírhatók, megfelelő illesztés révén a ma elérhető megoldások árát jól mutatják és megfelelően közelíthetőek vele a ma még kutatási területnek számító fejlesztési lehetőségek költségei.

4.1 Összemérhetőség problémája

A kutatók egyre rugalmasabb PON rendszerek kifejlesztésén dolgoznak napról napra. Azt tudjuk, hogy a rugalmasan konfigurálható PON rendszerekkel pénzt és erőforrást takaríthat meg a szolgáltató, de azt nem tudjuk, hogy milyen mértékű rugalmasságot várunk el egy hálózati technológiától, hogy a hálózati operátor számára jobbedelmező legyen a telepítése és az üzemeltetése is. Az egyből látható, hogy az operátor számára a cél az eladható sávszélesség és a kiszolgálható előfizetők számának maximalizálása.

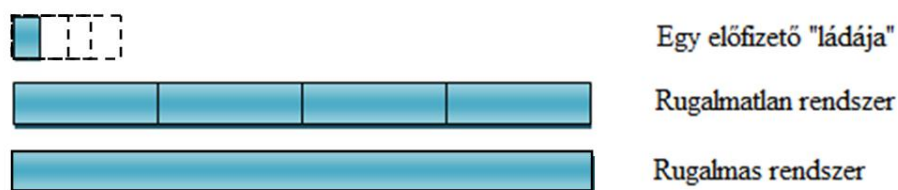
A tervezés során természetesen felmerülő kérdés, hogy mennyit nyerünk egy rugalmasabb rendszer, például a dinamikus sávszélesség allokáló (DBA-Dynamic Bandwith Allocation) algoritmus bevezetésével és használatával egy sima PON rendszerben?

A hálózat költsége jó mérőszámnak tűnik a rugalmasabb PON hálózatok által elérhető nyereség számszerűsítésére. Költséget a felhasználók forgalmának statisztikus multiplexálásával takaríthatunk meg. A korábban levezetett multiplexálási nyereség kifejezéséből ugyanis láthattuk, hogy a statisztikus multiplexálással annál nagyobb sávszélesség takarítható meg, minél nagyobb a felhasználószám. Mivel a költségekkel a

célunk eltérő rendszerek összehasonlítása ezért célszerű az adott rendszerre jellemző egy felhasználóra jutó költséget vizsgálnunk.

4.2 Szemléltetés ládapakolással

A problémát legjobban a ládapakolással [15] lehet szemléltetni. Jelen esetben egy felhasználó forgalma feleltethető meg egy ládának és a helyek mérete, ahová a ládákat kell elhelyeznünk, jelképezi a technológiára jellemző osztott közeg átviteli kapacitását. A feladat nehézségét az jelenti, hogy a felhasználó ládája nem minden esetben ugyanakkora méretű, a dinamikus sáv szélesség hozzárendelés miatt. A rendszer rugalmasságát ezzel a módszerrel úgy tudjuk figyelembe venni, hogy az osztott közeg méretének megfelelően hely mennyire osztható fel szabadon a felhasználói sáv szélességet jelképező ládákkal. Egy hullámhosszosztásos rendszer például rugalmatlannak számít, mivel a hullámhosszak között nincs lehetőség a sáv szélesség megosztására. Így az osztott közeg határain belül a ládapakolási feladatban további korlátok lesznek, amelyeket figyelembe kell venni az előfizetőknek jutó sáv szélesség tervezésekor. Ezek a határok nem nyúlhatnak át az előfizetők "ládái". Egy időosztásos hálózati technológiát tekintve az osztott közeg határain belül nem lesz több határ, mivel az időrések felhasználókhöz rendelésével teljesen rugalmasan lehet a felhasználói forgalmakat kezelni. A 8. ábra szemléletesen mutatja be a problémát, látható rajta egy rugalmatlan és egy rugalmas rendszer ábrázolása. Továbbá látható az is, hogy a rugalmatlan rendszerben az osztott közeg teljes sáv szélességén belül is vannak határok.

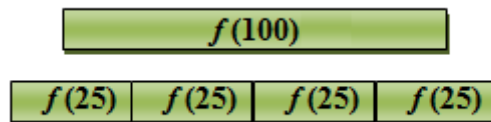


8. ábra: Ládapakolási feladat illusztrálása

A multiplexálási nyereséget is könnyen megérthetjük a 9. ábra megvizsgálásával. Az ábrán f jelöli a statisztikus multiplexálást, mint függvényt, amelynek a paramétere pedig a kiszolgálható előfizetők száma. A téglalapok az ábrán a megadott számú statisztikusan multiplexált előfizetők kiszolgálásához szükséges kapacitást jelöli. Látható, hogy egy nagyobb sáv szélességet jelentő egybefüggő osztott

közeggel sávszélességet takaríthatunk meg, a több különálló, azonban az összegzett felhasználószámban megegyező kapcsolathoz képest. Ez a tulajdonság a multiplexálási nyereség nem lineáris tulajdonságából adódik. A nem lineáris tulajdonsága a relatív multiplexálási nyereségből is levezethető és a következő egyenlet adódik:

$$4 \cdot f(25) > f(100).$$



9. ábra: Multiplexálási nyereség bemutatása

4.3 Költségszámítás

A munkám során a cél nemcsak a jelenlegi optikai hozzáférési hálózati rendszerek leírása volt, hanem a ma még nem létező, illetve ma még el nem terjedt hálózati topológiákat is. Ehhez olyan költségmodellek összeállítására volt szükségem, amelyekben szereplő függvények segítségével becsülhetőek a továbbfejlesztési irányok költségei is. A következő fejezetben a költségmodellek előállítását mutatom be.

4.3.1 Időosztásos PON-ok költségmodellezése

Alapos megfontolás után és az OLT-k és ONU-k fizikai rétegbeli működésének és felépítésének ismeretében az a következtetés vonható le, hogy az időosztásos OLT-k és ONU-k árai az általuk feldolgozott sávszélességtől függenek. A hálózatépítés más területein már ismert ökölszabályt alkalmazva, amely szerint egy hálózati építőelem által kezelt sávszélesség 10-szeresre növelésével általában 4-szeres árbeli növekedés tartozik, közelítőleg gyökös összefüggést kapunk az ár sebességfüggésére. Az OLT-re így kapott gyökös összefüggés a következő:

$$\sqrt{\frac{\text{osztott közeg sávszélessége}}{2,5 \text{ [Gb/s]}}}$$

A nevezőben szereplő érték a GPON hálózatok osztott közegének aggregált sávszélessége, amelyhez képest viszonyítunk. Az ONU-ra kapott összefüggés hasonló módon áll elő, azonban az ONU esetében a felhasználóra jutó sávszélességet érdemes 100 [Mb/s]-hoz arányítani a gyökös kifejezésben. Értelemszerűen egy TDM-PON hálózatban az OLT költségét elég egyszer számolni, mivel ebből az eszközből csak egy

található a szolgáltató központi irodájában, azonban az ONU-ból annyira van szükség, amennyi felhasználót képes a rendszer kiszolgálni.

A teljesítményosztót megvizsgálva azt a következtetést vonhatjuk le, hogy alapvetően minden ilyen jellegű osztó 1:2 osztású építőelemekből épül fel. Tehát az ára lineárisan függ a rá köthető felhasználók, vagyis a kimenetei számától, mivel egy 1:2N arányú osztó feltételezhetően 2-szer annyiban kerül, mint egy 1:N osztásarányú rendelkező. Ezt a belsejében található építőelemek száma indokolja.

4.3.2 Hullámhossz osztásos PON-ok költségmodellezése

A továbbiakban érdemes a technológiai ismertetőnél külön tárgyalt reflektív és hangolható lézeres WDM-PON megoldásokat egyként kezelni, mivel a hálózat felépítése szempontjából azonosak és a piacon jelenleg mind a két megoldás megtalálható közel azonos áron. A WDM-PON-ok ONU-jainak költsége hasonló módon számítható az időosztásos PON hálózatok ONU-jainak költségéhez, azonban az OLT költsége attól eltérő lesz. Ebben az esetben ugyanis az OLT-nek képesnek kell lennie eltérő hullámhosszak kezelésére, ezért még egy gyökös összefüggéssel megszorozva kapjuk a WDM-PON OLT-jének költségmodelljét. Ebben a gyökös összefüggésben a 8 hullámhosszhoz képest célszerű viszonyítani az OLT költségét. Így a következő kifejezés adódik:

$$\sqrt{\frac{\text{osztott közeg sávszélessége}}{2,5 \text{ [Gb/s]}}} \cdot \sqrt{\frac{\text{hullámhosszak száma}}{8}}$$

A WDM-PON hálózatban teljesítményosztó helyett AWG található a hullámhosszak szétoztására. Ennek az eszköznek a költségmodelljét [16] forrás alapján készítettem el. Ezen a weboldalon található multiplexerek, amelyek tulajdonképpen AWG-ből állnak, által kezelhető hullámhosszak számát és a hozzájuk tartozó árakat koordinátarendszerben ábrázolva azt tapasztaltam, hogy az árak négyzetesen emelkednek a hullámhosszak számának növelésével. Ez a tapasztalat a várakozásoknak is megfelel, hiszen minden újabb hullámhossz implementálásával több fizikai építőelemre van szükségünk az AWG-ben. Mindemellett precízebben kell megvalósítani a gyártónak az eszközt, mivel a kommunikációra használt optikai sáv sávszélessége állandó és ezáltal egy újabb hullámhossz bevezetésével kevesebb sávszélesség fog egy hullámhosszhoz tartozni. A csatornaszámok növekedésével így a

belső építőelemek minőségileg és mennyiségileg is változnak, így indokolt a négyzetes összefüggés.

4.3.3 OFDM-PON-ok és Hibrid PON-ok költségmodellezése

A hibrid PON hálózatokat alapvetően két csoportra oszthatjuk annak megfelelően, hogy a rendszer tartalmaz-e AWG-t a hullámhosszosztáshoz vagy nem. Amennyiben a hálózat AWG nélküli és csak teljesítményosztót használ a közeg szétosztásához, úgy a TDM-PON-okhoz készített költségmodell kis módosítással megfelelően írja le a hálózati eszközök költségét. Ez a módosítás az ár konstanssal való szorzását jelenti, ami azért szükséges, mert mind az OLT-t, mind az ONU-kat ebben az esetben több hullámhossz használatára kell felkészíteni, és az árak így konstans szorosára emelkedik az eredeti árak. A számításaimban úgy vettem figyelembe, hogy a több hullámhossz kezelése az eszközök árának megduplázódását jelentette. Az optikai teljesítményosztó ára változatlan marad, mivel ugyanaz a típus használható belőle például a TWDM-PON hálózatban és a GPON hálózatban is.

A hibrid PON hálózatok másik csoportját azok a rendszerek alkotják, amelyekben egyszerre található AWG is és optikai osztó is. Ebben az esetben az AWG-től eltekintve, a fizikai rétegbeli viselkedést tekintve a hálózat leírható sok hagyományos időosztásos modell összegeként is, ezért ezt a típust külön nem szükséges modellezni.

Az OFDM-PON-ok hagyományos időosztásos rendszerekhez képesti előnyei a rugalmasabb konfigurálhatóságból származnak. Ennek következtében a TDM-PON rendszerekkel szembeni jobb költséghatékonyság elsősorban a magasabb rétegekben jelentkezhet ezzel a technológiával, a fizikai megvalósítás költségei közel azonosak. Az OFDM-PON hálózati eszközök költségei tehát jól közelítik a TDM-PON-ra kapott eredményeket, így azok külön vizsgálata nem szükséges.

5 Matlab modell készítése és az eredmények értékelése

A korábban ismertetett számításokat és modelleket ezután célszerű olyan matematikai programba bevinnünk, amellyel lehetőség van a sok számítás gyors elvégzésére, az adatok átlátható tárolására és több dimenziós ábrázolására. Ehhez én a Matlab matematikai programot használtam. Előnyös tulajdonsága, hogy támogatja a mátrixokkal való műveleteket, így a változókat sor- és oszlopvektorok, az eredményhalmazokat pedig mátrixok formájában tudjuk a programban tárolni.

5.1 Statisztikus multiplexálás modellezése

Első lépésben a statisztikus multiplexálás modelljét valósítottam meg mátrix műveletek révén. Ehhez egy külön függvényt definiáltam, ami paraméterként kapja meg a nyaláboláshoz szükséges értékeket. A függvényben az ekvivalens kapacitás számításának inverz függvényét valósítottam meg: paraméterként megadva a névleges felhasználószámot (azaz a rendelkezésünkre álló kapacitást, egységnyi felhasználónkénti kapacitást feltételezve), a függvény visszatérési értéke megmutatja, az adott kapacitás mellett, a nyalábolást is figyelembe véve a kiszolgálható felhasználók számát.

A függvényt vektorokkal való számításához készítettem el, tehát ha egy névleges felhasználószámokat tartalmazó sorvektorral hívjuk meg, akkor ennek megfelelően a hozzájuk tartozó multiplexálási nyereséggel növelt felhasználószámokból álló sorvektor lesz a végeredménye. A p adási valószínűség értékét a számítások során saját és ismerőseim internetezési szokásainak ismeretében, valamint iparági szereplőkkel való konzultációnak megfelelően felülről 40%-nak becsültem.

Az ε multiplexálási blokkolási valószínűség értéke meghatározza a hálózati rendelkezésre állási időt. A hagyományos hálózatokban megszokott 99,99%-99,999%-os rendelkezésre állási időkhöz képest számunkra kevesebb is elegendő, mivel jelen esetben a hiba nem a hálózati kapcsolat kiesését jelenti, hanem az összeköttetés kismértékű túlterhelődését. Ez a túlterhelődés a felhasználói oldalon csak a bitsebesség csökkenését okozza, amit egy átlagos felhasználó lehet, hogy észre sem vesz. Ennek megfelelően számításaimat 10^{-3} blokkolási valószínűséggel végeztem, amelyhez 99,9%-os rendelkezésre állás tartozik (ez a felhasználó számára havonta átlagosan kevesebb,

mint 45 percet jelent, amikor nem képes a rendelkezésére álló teljes sáv szélesség kihasználására).

5.2 Költségfüggvények implementációja

A továbbiakban néhány jelölést vezetek be a leírás tömörsége és áttekinthetősége érdekében:

- bw_shared : az osztott közeg sáv szélessége,
- bw_user : a felhasználónkénti sáv szélesség,
- $users$: az osztott közeget használó felhasználók száma,
- $lambdas$: a rendszerben alkalmazott hullámhosszak száma.

5.2.1 TDM-PON-ok költségfüggvénye

A TDM-PON-ok költségmodelljét is függvényként programoztam le a Matlabban. A függvény bemenő paramétereinek a névleges és a multiplexált felhasználószámokat tartalmazó vektorokat, a felhasználónkénti sáv szélességek vektorát és az eszközök árának konstans szorzótényezőjét választottam.

A korábban 4.3.1 fejezetben bemutatott költségmodell alapján a TDM-PON OLT költségét a következő kifejezés alapján lehet számítani:

$$COST_{OLT}^{TDM} = \sqrt{\frac{bw_shared}{2,5 [Gb/s]}} \cdot e^{\frac{bw_shared}{10^4 [Mb/s]}}$$

Ennek kiszámításához az osztott közeg sáv szélességét a névleges felhasználószám és az egy felhasználóra jutó sáv szélesség vektorok szorzataként állítható elő. A hozzátartozó ONU-k költségét is az osztott közeg sáv szélessége alapján határozhatjuk meg, mivel az ONU működéséhez a neki szánt sáv szélességtől függetlenül támogatnia kell az OLT által használt osztott közeg sáv szélességét, különben nem tudná értelmezni a neki szánt csomagokat. Ennek megfelelően, az ONU-k költségét

$$COST_{ONU}^{TDM} = users \cdot \sqrt{\frac{bw_shared}{2,5 \left[\frac{Gb}{s}\right]}} \cdot e^{\frac{bw_shared}{10^4 \left[\frac{Mb}{s}\right]}}$$

egyenlettel számíthatjuk ki. Az exponenciális szorzótényezőkre mind az OLT-nél, mind az ONU-nál, a nagy sebességű adó-vevő párok nagyon magas ára miatt van szükség. Az osztó költségét a modellnek megfelelően a konstans szorzótényezője és a felhasználószámok szorzataként kapjuk.

$$COST_{SPLITTER}^{TDM} = C_{SPLITTER} \cdot users$$

Az így kapott teljes költségek mátrixot alkotnak a névleges felhasználószámok és az egy felhasználóra jutó sáv szélességek mentén. A függvény visszatérési értéként az így kapott költségekből álló mátrixszal tér vissza, amelyet még le kell osztanunk a felhasználószámmal, az egy főre jutó hálózati költségek számításához.

5.2.2 WDM-PON-ok költségfüggvénye

A WDM-PON-okra vonatkozó költségfüggvényt úgy alakítottam ki, hogy paraméterként megkapja a felhasználószámokat tartalmazó vektort, az egy felhasználóra jutó sáv szélességeket tartalmazó vektort, továbbá az OLT és az ONU-k költségének a konstans szorzótényezőjét. Ezeket sorra C_{OLT} -vel és C_{ONU} -val jelölöm. Az AWG-vel kapcsolatosan nem kell a költségfüggvénynek konstans szorzótényezőt megadni, mert azt egységnyire választottuk.

A korábbi 4.3.2 fejezet alapján az OLT költsége

$$\sqrt{\frac{bw_shared}{2,5 \left[\frac{Gb}{s}\right]}} \cdot \sqrt{\frac{lambdas}{8}}$$

összefüggés alapján szorozódik a konstans C_{OLT} szorzótényezővel. Az ONU-k költsége

$$users \cdot \sqrt{\frac{bw_user}{100 \left[\frac{Mb}{s}\right]}}$$

értékűre adódik a felhasználószámmal való felszorzás után. Az AWG költségét a felhasználószám négyzetre emelésével számoltam ki:

$$COST_{AWG}^{WDM} = users^2.$$

Az OLT és az ONU költségének számításához az egyenletek:

$$COST_{OLT}^{WDM} = C_{OLT} \cdot \sqrt{\frac{bw_shared}{2,5 \left[\frac{Gb}{s}\right]}} \cdot \sqrt{\frac{lambdas}{8}}$$

$$COST_{ONU}^{WDM} = C_{ONU} \cdot users \cdot \sqrt{\frac{bw_user}{100 [Mb/s]}}$$

Így a felhasználószám és az egy előfizetőre jutó sáv szélesség vektorok mentén a teljes rendszer költségek egy mátrixot alkotnak. Ezek után ezt a mátrixot le kell osztanunk a felhasználószámmal és megkapjuk az összehasonlítás alapjául szolgáló egy felhasználóra jutó költségekből álló mátrixot.

5.3 Ábrázolás

Matlabban lehetőség van háromdimenziós függvények ábrázolására. A megvalósításához szükség van két vektorra, amelyek az x és y tengelyeket alkotják és a mátrixra, amelynek értékeit szeretnénk ábrázolni a harmadik tengely mentén. A munkám során ennek megfelelően a névleges felhasználószámokból álló vektor és a felhasználónkénti sáv szélesség vektor alkotja az x és az y tengelyeket, amik mentén ábrázoltattam a felhasználónkénti költségekből álló mátrixot.

Többféle módon is ábrázolhatunk többdimenziós függvényeket a Matlabban. Ezek közül kiemelném, hogy lehetőségünk van szintvonalas ábra készítésére, amely előnyös a dolgozatban szemléltetni kívánt függvények bemutatására. Továbbá célszerű az egy felhasználóra eső költségek mátrixának felhasználónkénti minimumhelyeit megkeresni és ábrázolni ezeket az egy főre jutó sáv szélességek szerint. Ezen görbéket a különböző technológiákról érdemes egy ábrába rajzoltatni, ezáltal összehasonlíthatóvá válnak az eltérő technológiájú hálózatok.

5.4 Eredmények értékelése

Ebben a fejezetben bemutatom a munkám során született eredményeket és összefoglalom a tapasztalataimat az alkalmazott modellek használatával kapcsolatban.

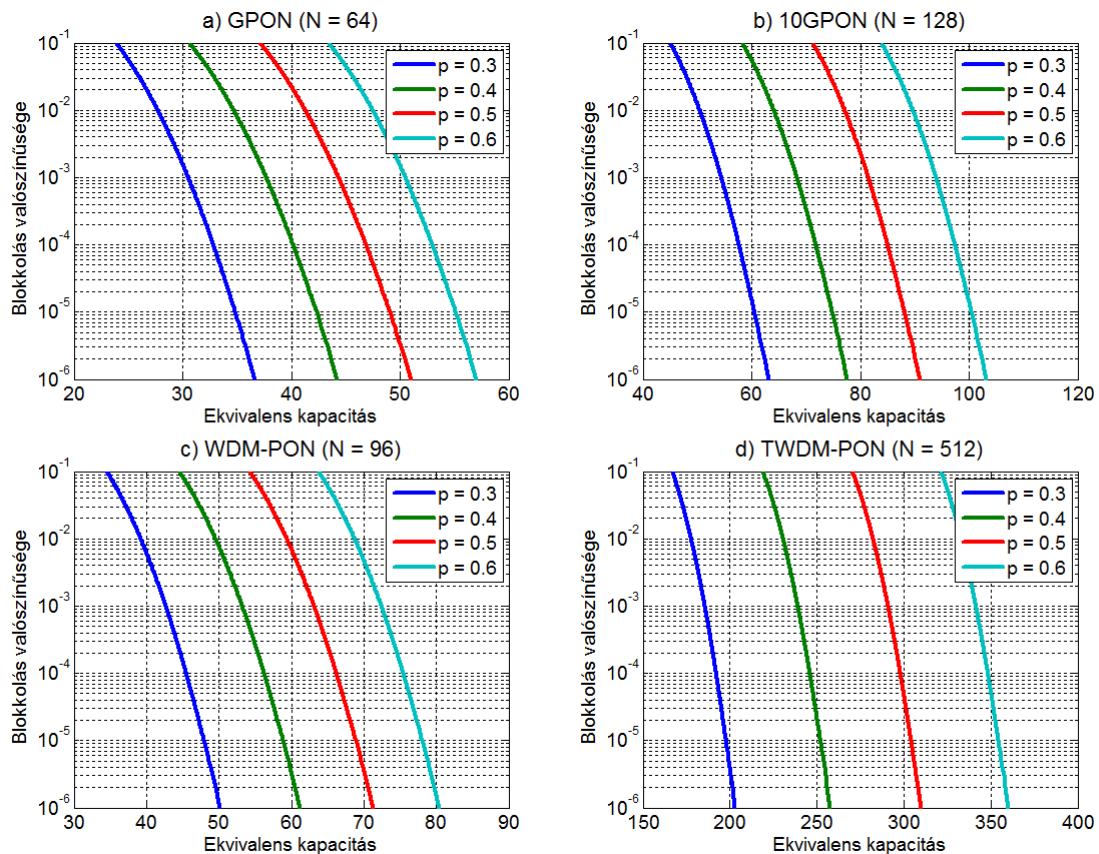
5.4.1 Statisztikus multiplexálás

A statisztikus multiplexálás megvalósításával lehetőség nyílik a hálózat erőforrásainak magasabb szintű kihasználására az éppen hálózati forgalmat nem bonyolító előfizetők szabad sáv szélessége révén. Várakozásainknak megfelelően a szélesebb osztott közeg növeli az elérhető multiplexálási nyereséget. A bemutatott eljárás révén azonban ennél pontosabb képet is nyerhetünk: az alkalmazott forgalommodell révén ennek mértékét is meg tudtam határozni. Az **Hiba! A**

hivatkozási forrás nem található. fejezetben leírt módon meghatároztam az adott körülmények között (teljes sáv szélesség elvárt rendelkezésre állása, ON-OFF forgalom modell paraméterei) elérhető multiplexálási nyereséget.

A multiplexálási nyereség számítását és bemutatását az összetartozó értékek diagramba rajzoltatásával teszem meg.

A 10. ábra a), b), c) és d) része mutatja be a különböző technológiájú és felhasználószámú hálózati forgalmak nyalábolásának ekvivalens kapacitás értékeit a blokkolási valószínűségek függvényében. Mind a négy ábra szerkesztésekor $p = 0,3; 0,4; 0,5$ és $0,6$ forgalmazási valószínűségeket (ld. ON-OFF forgalom modell) használtam a számításhoz.



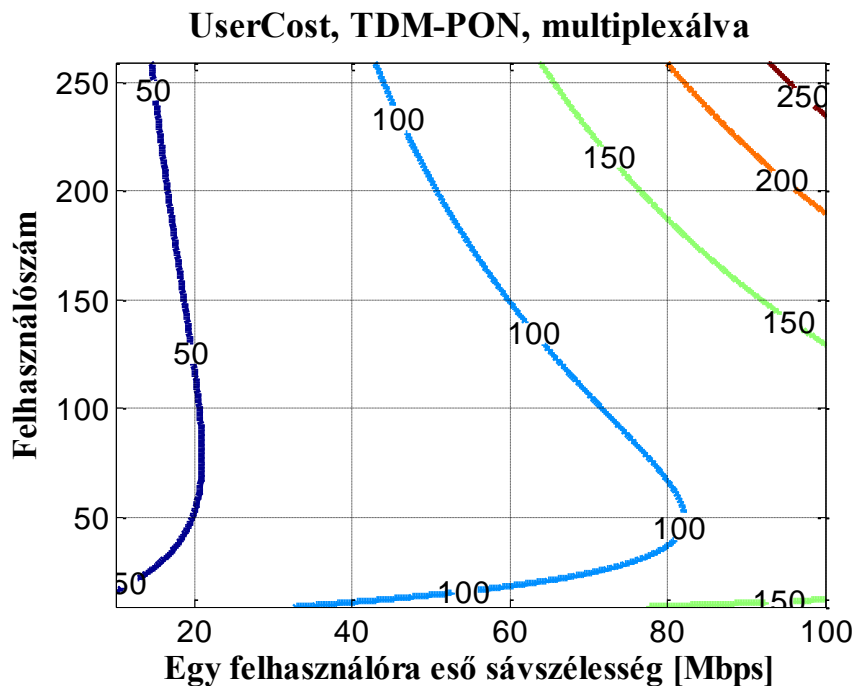
10. ábra: Statisztikus multiplexálás eredményei a) GPON, b) 10GPON, c)WDM-PON, d) TWDM-PON technológiák használatának esetében

Az ábrák jól mutatják, hogy az előfizetők számának növelésével csökken a kiszolgálásukhoz szükséges egy végpontra eső névleges sáv szélesség értéke. A 10.d) ábrán a legszembevetőbb a multiplexálási nyereség: 512 felhasználó kiszolgálásához

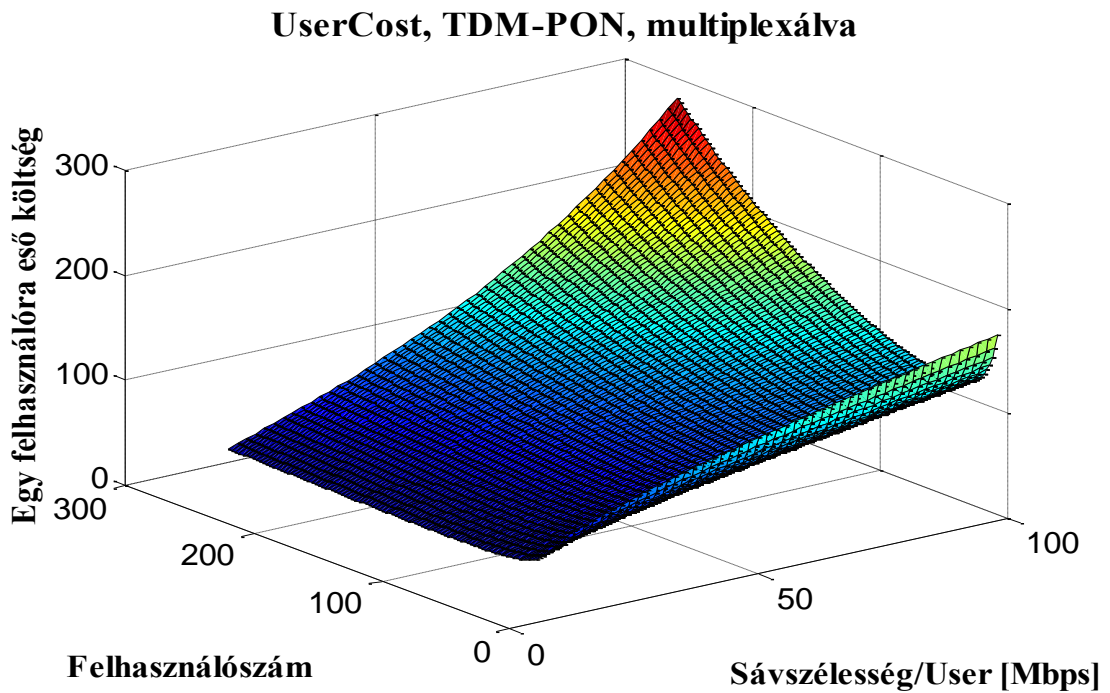
40%-os forgalmazási valószínűség és 0,1%-os blokkolási valószínűség mellett 250 felhasználói kapacitásegységnél is kevesebb sáv szélesség elegendő.

5.4.2 Költségmodellek szemléltetése

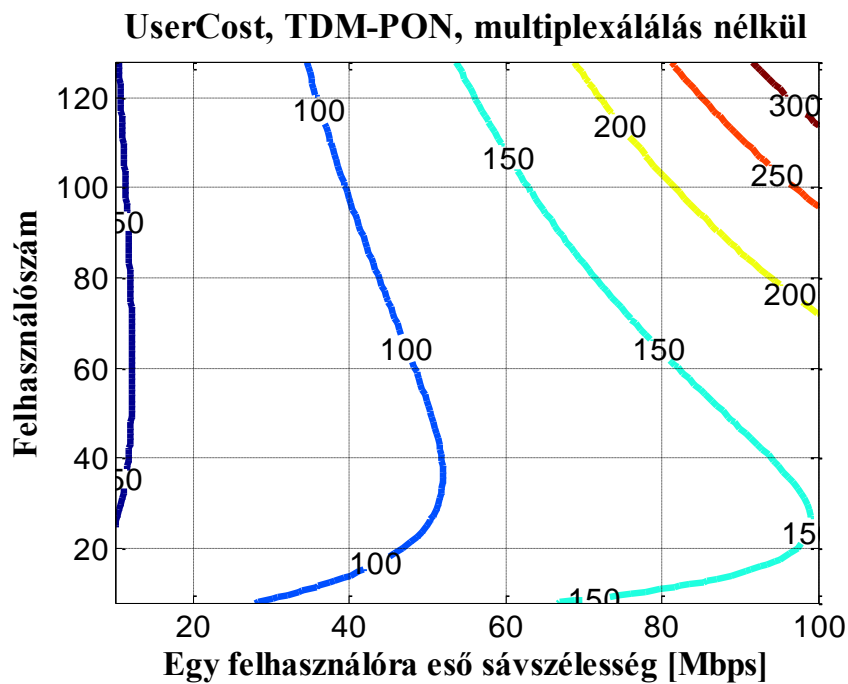
Az elkészített TDM-PON költségfüggvényét mutatja a 11. ábra szintvonalasan és a 12. ábra három dimenziós formában. Az ábrák az egy előfizetőre jutó költségeket mutatják felhasználószám és felhasználóknak szánt sáv szélesség függvényében. A szintvonalak a megegyező költségű pontokat kötik össze, és a hozzájuk rendelt számok az egy felhasználóra jutó költségeket jelölik. Látható, hogy a növekvő felhasználószám és nagy felhasználónkénti sáv szélesség mellett a költség meredeken növekedni kezd, ami az ONU-k számának és az osztott közeg sáv szélességének növekedése miatt várható volt. A 13. ábra a multiplexálás nélküli esetet mutatja, amelyen jól megfigyelhető, hogy bár a költséggörbék természetesen hasonlóak, a multiplexálási nyereség figyelembe vétele észrevehetően befolyásolja az egy végpontra eső költségeket (mivel ebben az esetben a felhasználószámok alacsonyabbak).



11. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, forgalmakat multiplexálva



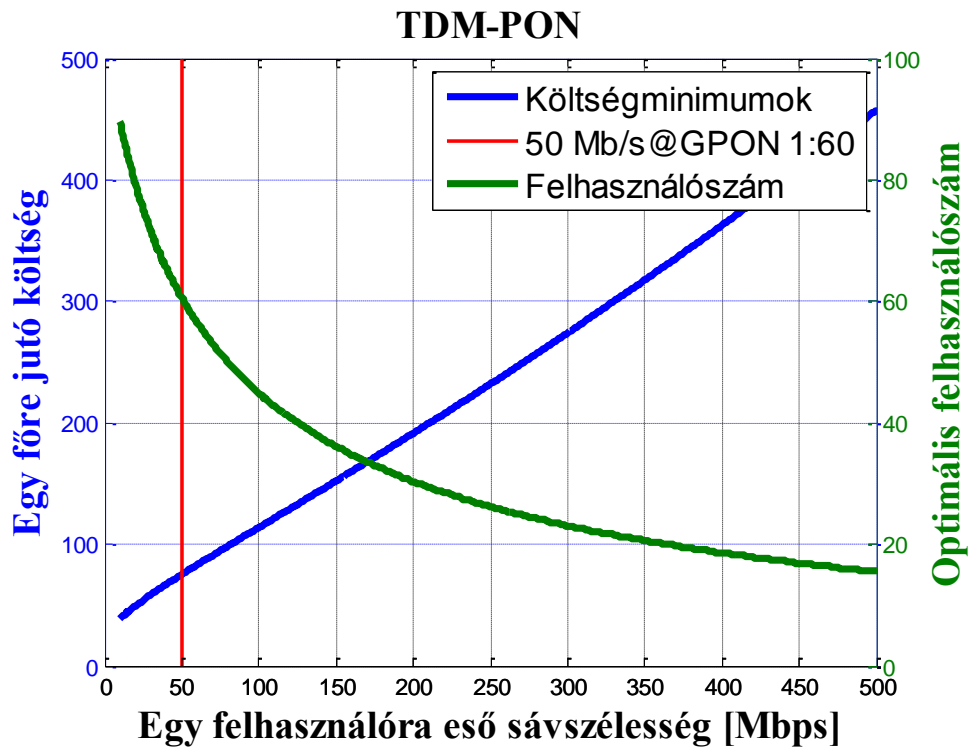
12. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, forgalmakat multiplexálva



13. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, multiplexálás nélkül

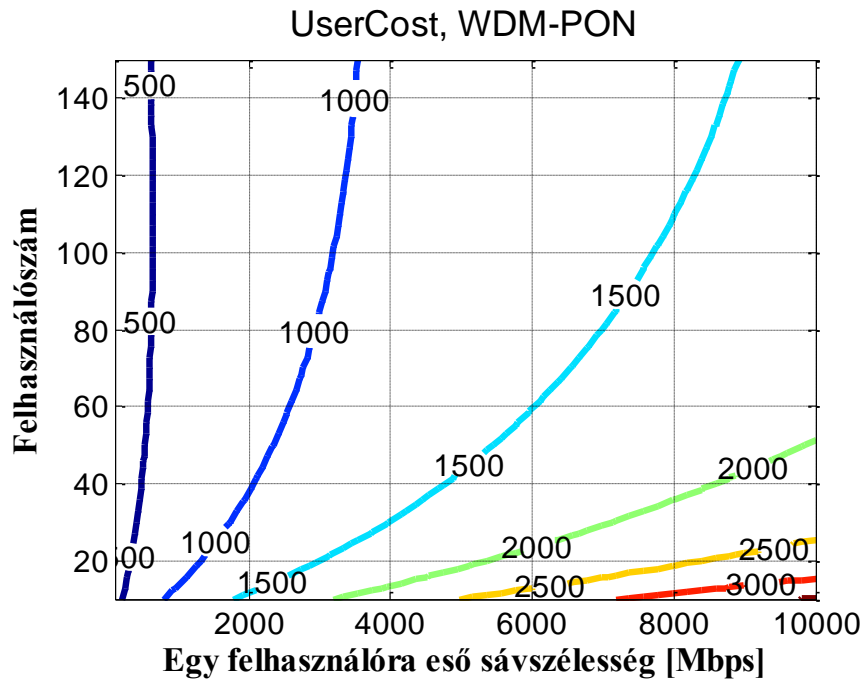
A 14. ábra a költségek minimumértékeit és az optimális felhasználószámokat mutatja be, a sávszélességek függvényében. Látható, hogy az előfizetők száma 20 és 90 közötti a függvény minimumhelyeinél és a várakozásainknak megfelelően (ld. 5.2 fejezet) a sávszélesség növelésével csökken az optimális felhasználószám. Ennek megfelelően érdemes egy TDM-PON hálózat tervezésénél és méretezésénél figyelembe

venni, hogy az előfizetőknek szánt sáv szélesség függvényében mekkora az optimális felhasználószám.

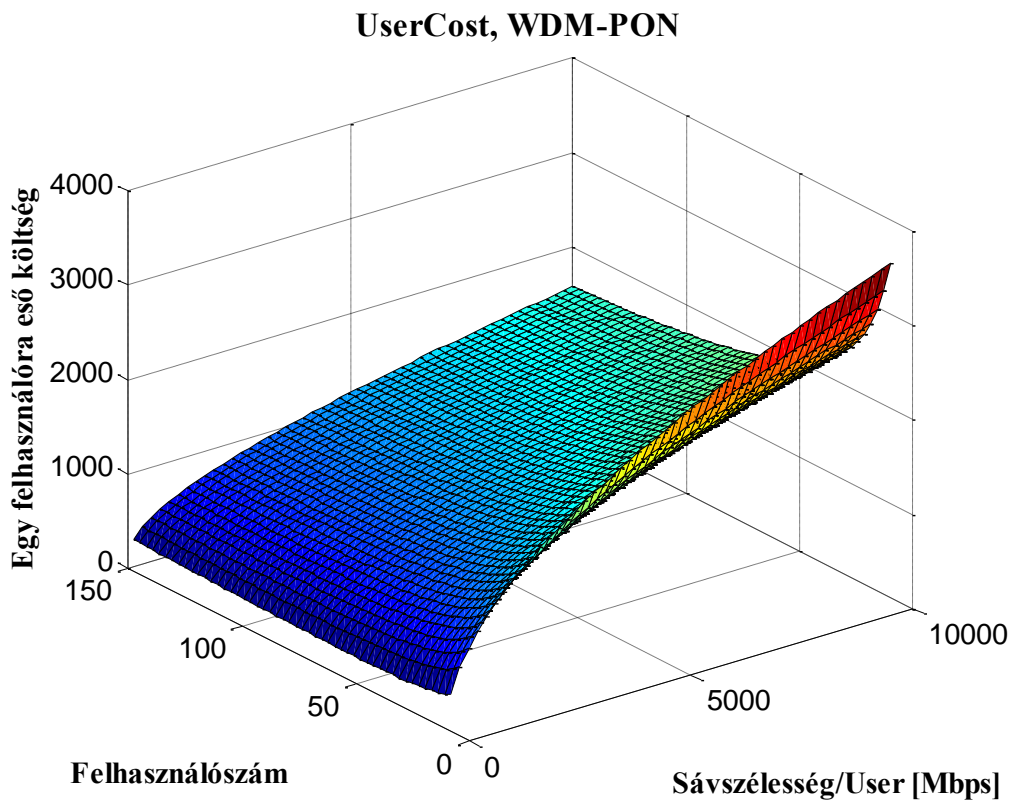


14. ábra: Egy előfizetőre jutó költségek minimumai és az optimális felhasználószámok

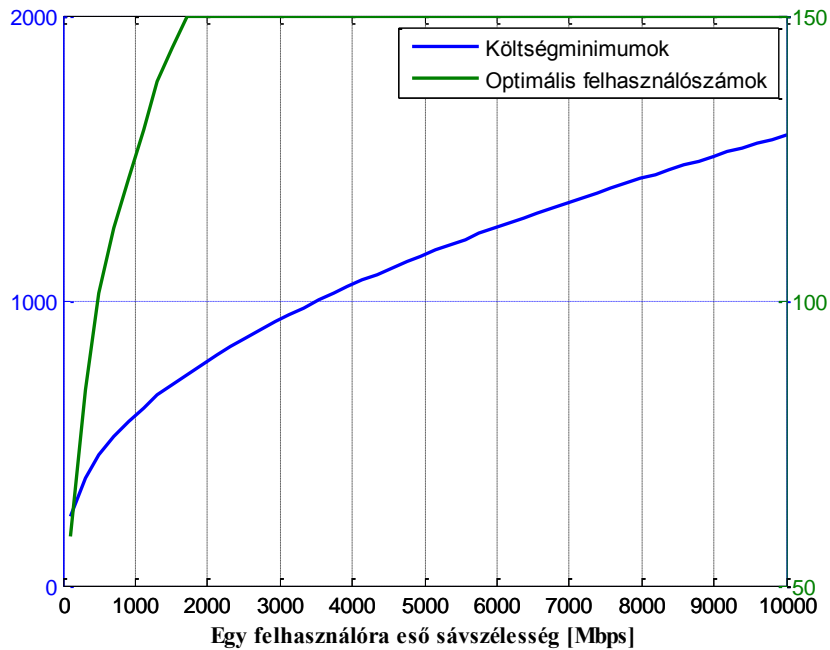
A WDM-PON-ok költségábráját mutatja a 15. ábra és a 16. ábra. A diagram jól mutatja, hogy hullámhosszosztásos hálózatot építeni nem éri meg kevés felhasználóra a költségek gyors emelkedése miatt, ami egybeesik a gyakorlati tapasztalatokkal, mert ilyen esetekben általában pont-pont hálózatot alakítanak ki, így a hálózat egyszerűsíthető és az AWG ára megspórolható. Azt is megfigyelhetjük ezen az ábrán, hogy nagyobb felhasználószámok esetén, az egy felhasználóra jutó sáv szélesség növelése nem emeli meg drasztikusan a költségeket. Ez a jelenség a 17. ábra görbéin is látható, ahol a költségminimumok és a hozzájuk tartozó felhasználószámok vannak megjelenítve a felhasználóra eső sáv szélesség függvényében. A sáv szélesség növelésével a költségek lassan, gyökös összefüggés alapján növekednek 150 felhasználóig. Ez az OLT árának felhasználók közötti szétoszlása miatt van.



15. ábra: Egy előfizetőre jutó költség WDM-PON rendszerben



16. ábra: Egy előfizetőre jutó költség WDM-PON rendszerben



17. ábra: WDM-PON rendszerek költségminimumai és az optimális felhasználószámok

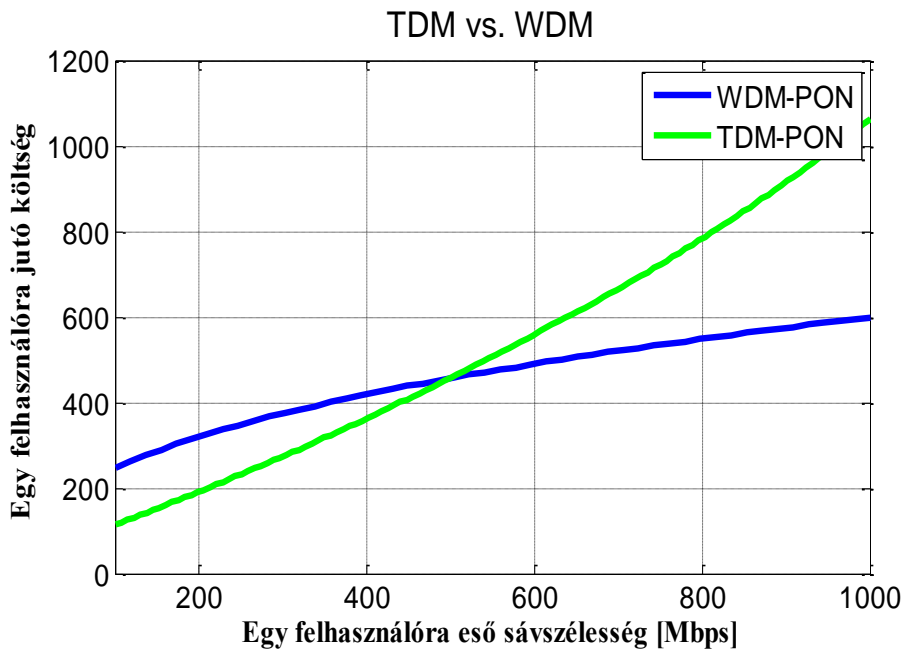
5.5 Összehasonlítás

Az alkalmazott és implementált költségmodellek használatával már lehetőségünk van az osztott közeg hozzáférési módjában különböző optikai hálózatok összehasonlítására. Dolgozatomban az idő- és hullámhosszosztásos hálózatokat hasonlítottam össze egymással.

A különféle TDM és WDM-PON rendszereket elsődlegesen az egy felhasználóra eső fajlagos költségek révén hasonlítjuk össze: ez talán a legfontosabb mérőszám, amely egy szolgáltató számára a technológiai döntést meghatározhatja. A 18. ábra ezt az összehasonlítást segíti: a vízszintes tengelyen a felhasználó számára nyújtott szolgáltatás elsődleges mércéjeként a garantált sáv szélességet mutatja. A függőleges tengely, illetve a TDM és WDM görbék egyes pontjai pedig azt a minimális költséget jelölik, amely az egy végpontra eső adott sáv szélesség mellett elérhető - optimális paraméter-beállítás, azaz az osztott közeghez tartozó sáv szélesség és felhasználószám mellett.

Vegyük észre, hogy a két görbe metszi egymást, 500 Mb/s egy felhasználóra jutó sáv szélesség értéknél. Ez azt jelenti, hogy a TDM-PON hálózati technológiákat e sáv szélesség határig érdemes használni, onnantól a hullámhosszosztásos rendszerek jelentenek jövedelmezőbb megoldást. A kapott eredmény egybeesik a várakozásaimmal,

mivel a TDM-PON hálózatok esetén az osztott közeg sávszélességét jelentősen növeli az előfizetőkénti sávszélesség növekedése, amely nagysebességű és drága adóvevőket igényel az OLT-ben és az ONU-ban is. A WDM-PON technológia esetében ezzel szemben az ONU adóvevő sebességének csak a felhasználónak szánt sávszélességet kell támogatnia, így várható, hogy a sávszélesség növelésével egy pont után már nem éri meg TDM-PON technológiát telepíteni.



18. ábra: TDM-PON és WDM-PON összehasonlítása a költségminimumaik segítségével

Az így kapott optimális 500 Mb/s-os érték a felhasználónkénti sávszélességre teljesen reális, célszerűen 10GPON hálózattal megvalósítható. A 10GPON technológia osztott közegén kiszolgálható 10 Gb/s-os sávszélességű kapacitással 20 db felhasználót tudnánk kiszolgálni multiplexálás nélkül. Multiplexálva a 20 felhasználó hálózati forgalmát (amennyiben 40%-os valószínűséggel forgalmazznak, 0,1%-os blokkolási valószínűség mellett), az ekvivalens kapacitás 30 felhasználónyi kapacitásegységre adódik. Ebből következik, hogy a TDM-PON alapú hálózatok közül költséghatékony és nagy átviteli sebességű választást jelent egy olyan 10GPON hálózat, amely 30 előfizetőhöz van csatlakoztatva és minden egyes előfizetőhöz 500 Mb/s-os kapacitás van rendelve. A WDM-PON hálózattal is megvalósítható ez a metszéspont, azonban ez kevésbé lenne célszerű, mert jelentősen nagyobb átviteli sebességek is könnyen elérhetőek ezzel a technológiával.

6 Összegzés, kitekintés

A munkám során a cél egy olyan módszer kidolgozása volt, amely alkalmas az eltérő optikai hozzáférési hálózati technológiák fajlagos költségeinek összehasonlítására. Ennek első lépéseként megvizsgáltam a napjainkban is elérhető és szabványosított optikai hozzáférési hálózati technológiákat, illetve megvizsgáltam a jelenleg aktív kutatási területnek számítót, a jövőben várhatóan elterjedő architektúrákat.

A dolgozatban bemutattam egy hatékony módszert a hálózati végpontok forgalmának multiplexálásával (nyalábolásával) elérhető megtakarítás becslésére, melynek révén nagy mértékben javítható a hálózat kihasználtsága, és csökkenthető annak költségei.

A továbbiakban bemutatásra kerültek a költségalapú összehasonlításhoz nélkülözhetetlen költségmodellek. Ezek kialakításakor fontos szempont volt, hogy segítségével egyaránt jól becsülhetőek legyenek a jelenleg is elérhető hálózatépítéshez szükséges eszközök árai és a ma még nem használt topológiák és konfigurációk költségei is.

Az implementáció során meghatároztam az egy felhasználóra eső költségeket a felhasználószám és a sáv szélesség függvényében TDM-PON és WDM-PON hálózatok esetére is. Ez alapján megkaptam az összehasonlításhoz szükséges minimális felhasználónkénti költségeket mindkét rendszerre és képes voltam az összehasonlításuk elvégzésére. A jelenlegi technológiai korlátok mellett 500 Mb/s-ra adódott az a sáv szélesség, amelytől kezdve érdemes a TDM-PON hálózatok használatáról WDM-PON hálózatok használatára áttérni.

További munkám során tervezem a statisztikus multiplexálás leírására használt modellt, és a költségfüggvények további fejlesztését. A hálózati modellezés és multiplexálás során lehetőség van más eloszlások használatára, illetve bonyolultabb hálózati modellek alkalmazására is, amelyek lehetnek nem ON-OFF jellegűek is. A költségmodellek pontosságát nagymértékben javítaná a pontos adatok beszerzése, melyre egy gyártóval vagy szolgáltatóval való együttműködés keretén belül nyílna lehetőség. Emellett a jelenlegi modell fizikai rétegbeli alkalmazhatósága mellett a

magasabb rétegek (szolgáltatások) költségeit bevonva még általánosabban használható eszköz fejlesztését tervezem.

Irodalomjegyzék

- [1] Vetter, Peter. "Next generation optical access technologies." *European Conference and Exhibition on Optical Communication*. Optical Society of America, 2012.
- [2] Recommendation ITU-T G.984.1 (2008), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics.
- [3] Recommendation ITU-T G.984.2 (2003), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification.
- [4] Recommendation ITU-T G.984.3 (2008), Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification.
- [5] Recommendation ITU-T G.987.1 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements.
- [6] Recommendation ITU-T G.987.2 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification.
- [7] Recommendation ITU-T G.987.3 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification.
- [8] OASE Project, *Survey of Next-Generation Optical Access System Concepts*, 29.10. 2010.
- [9] Lee, Sang-Mook, et al. "Dense WDM-PON based on wavelength-locked Fabry-Pérot laser diodes." *Photonics Technology Letters, IEEE* 17.7 (2005): 1579-1581.
- [10] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, "Time and wavelength division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next generation PON stage 2 (NG-PON2)," *IEEE J. of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 4, February 15, 2013.
- [11] Dimitrios Stiliadis, "Packet-switched networks," J.G. Proakis, *Wiley Encyclopedia of Telecommunications., Vol. 4*, John Wiley & sons Inc., New Jersey, 2003.

- [12] Thomas M. Chen, " Network Traffic Modeling," Chapter in *The Handbook of Computer Networks*, Hossein Bidgoli (ed.), Wiley, 2007.
- [13] Megyesi, Péter, and Sándor Molnár. "Analysis of Elephant Users in Broadband Network Traffic." *Advances in Communication Networking*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 37-45.
- [14] Marsaglia, George. "Evaluating the normal distribution." *Journal of Statistical Software* 11.4 (2004): 1-7.
- [15] Gary, Michael R., and David S. Johnson. "*Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness.*" (1979).
- [16] <https://www.oquest.com/cat/1337>, Multiplexers / Demultiplexers prices, with 8, 24, 32, 40 channels, 2013.

Ábrajegyzék

1. ábra: TDM-PON felépítése [1]	9
2. ábra: WDM-PON felépítése [1]	11
3. ábra: CO-OFDM megvalósítási lehetőségei: a) közvetlen fel- és lekonvertálással, b) köztes frekvenciás konvertálással [8]	16
4. ábra: DDO-OFDM a) adóegység és b) vevőegység blokkvázlata [8]	17
5. ábra: TWDM-PON rendszer felépítése [10]	18
6. ábra: Binomiális és normális eloszlás összehasonlítása	24
7. ábra: Ekvivalens kapacitás értékei $N=64$ felhasználó esetén	25
8. ábra: Ládapakolási feladat illusztrálása	27
9. ábra: Multiplexálási nyereség bemutatása	28
10. ábra: Statisztikus multiplexálás eredményei a) GPON, b) 10GPON, c) WDM-PON, d) TWDM-PON technológiák használatának esetében	35
11. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, forgalmakat multiplexálva	36
12. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, forgalmakat multiplexálva	37
13. ábra: Egy előfizetőre jutó költség TDM-PON rendszerben, multiplexálás nélkül	37
14. ábra: Egy előfizetőre jutó költségek minimumai és az optimális felhasználószámok	38
15. ábra: Egy előfizetőre jutó költség WDM-PON rendszerben	39
16. ábra: Egy előfizetőre jutó költség WDM-PON rendszerben	39
17. ábra: WDM-PON rendszerek költségminimumai és az optimális felhasználószámok	40
18. ábra: TDM-PON és WDM-PON összehasonlítása a költségminimumaik segítségével	41

Köszönetnyilvánítás

Szeretném hálás köszönetemet kifejezni konzulenseimnek, amiért hozzáértésükkel, tapasztalatukkal és rengeteg tanácsukkal segítették munkámat. Köszönettel tartozom családomnak és közeli barátaimnak is, akik tanulmányaim során végig segítettek és támogattak.