



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TÁVKÖZLÉSI ÉS MÉDIAINFORMATIKAI TANSZÉK

ÚTVONALVÁLASZTÁS OPTIKAI HÁLÓZATOKBAN
A FIZIKAI KORLÁTOK ALAPJÁN

készítette
Zsigmond Szilárd

tézisfüzet

Tudományos vezető:

Dr. Cinkler Tibor

Távközlési és Médiainformaticai Tanszék

Nagysebességű Hálózatok Laboratóriuma
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest
2010

1. Bevezetés

A közelmúltban megjelent újgenerációs szolgáltatások igényei igen komoly problémák elé állították a távközlési szolgáltatókat. A hullámhosszosztásos (WDM) optikai hálózatok sikeresen megoldották a sáv szélesség problémákat a maghálózatokban, azonban a szolgáltatók csak nagy nehézségek árán tudják kezelni az új, előre nem tervezhető igényeket. Igen hamar kiderült, hogy a statikusan konfigurálható pont-pont kapcsolatból felépített optikai hálózatok nem alkalmasak a folyamatosan változó forgalom elvezetésére. Ilyen hálózatokban az átkonfigurálás csak jelentős költségek mellett valósítható meg. Tehát egy olyan hálózatra van szükség, ami a SONET/SDH rugalmasságát nyújtja a WDM sáv szélességek mellett.

A dinamikus WDM optikai hálózatok esetében sem egyszerűbb a probléma kezelése. A folyamatosan növekvő sáv szélesség igények, a gyűrű topológiáról vagy a pont-pont kapcsolatról csillag topológiára való áttérés, illetve a dinamikus optikai kapcsolók tömeges elterjedése, nagyon szigorú feltételeket szab a szolgáltatás-minőségi feltételek (QoS - Quality-of-Service) biztosításának. Figyelembe véve az optikai hálózatok sokrétűségét, különböző optikai szálak, eltérő bitsebesség és modulációs formák, magyarázatot ad, hogy miért ennyire nehéz feladat egy egységes minőségi korlátot megadni az optikai összeköttetésekre, tisztán optikai hálózat esetében [1]. További problémát okoz, hogy az egyes összeköttetések minősége függ a többi összeköttetéstől a fizikai hatások miatt, például az áthallás, optikai erősítők kimeneti jelszintje, illetve szálban fellépő nemlineáris hatások, stb.... Ebben az esetben is, az új előre nem tervezett igények teljesítése sokszor lehetetlen feladat anélkül, hogy módosítanunk kellene a hálózatunkat, ami jelentős költségekkel illetve idővesztéssel jár.

A megoldás a hálózat rétegeinek együttműködésének elősegítésére a fizikai hatások dinamikus monitorozása és kompenzálása (M&C - Monitoring-and-Compensation). Tehát igazából az igazi innováció nem az újrakonfigurálhatóság az optikai hálózatokban, hanem az azt lehetővé tevő eszközök, mint például a hullámhossz alapú M&C. A nagyobb komplexitás és az átkonfigurálhatóság igénye a maghálózatokból a hozzáférői hálózatok felé migrálódik [2].

Távközlő hálózatokban az útvonalválasztás általában mindegyik igényre az útvonal kiválasztását jelenti az adott kezdő és végpont között. Optikai hálózatokban az adott útvonalhoz a hullámhossz hozzárendelést is meg kell valósítani. Ezt az eljárást nevezi a szakirodalom útvonalválasztás és hullámhossz hozzárendelés (RWA - Routing-and-Wavelength-Assignment) problémának [3]. Az irodalomban jelenleg megtalálható RWA megoldásokat két féle képpen lehet osztályozni: (a) figyelembe veszi a fizikai hatásokat a hálózatban és (b) hálózattervezés fizikai hatások nélkül. Annak ellenére, hogy ez napjaink igen kutatott területe, a tisztán optikai hálózatok esetében a fizikai hatások figyelembe vétele az RWA problémakörben még kezdetleges.

A disszertáció célja, hogy adjon egy jó kompromisszumot az RWA probléma megoldására úgy, hogy a lehető legjobban vegye figyelembe az optikai hálózat specifikusságait. Az optikai hálózat teljesítőképességének modellezésére analitikus számolásokat alkalmaztam. A helyességüket numerikus szimulációkkal, illetve ahol lehetett mérésrel ellenőriztem. Ezeket a módszereket beépítettem az általam javasolt RWA módszerekbe. Az eredményeket az alábbi két téziscsoportban foglaltam össze.

Az első téziscsoportban a fizikai hatások modellezésével foglalkozom. Az irodalomban publikált módszerekből kiindulva, ezeket a számolásokat kiterjesztve, vagy éppenséggel korlátozva új számolási módszereket mutatok be, amelyek kielégítik az útvonalválasztó algoritmusok által felállított követelményeket. Minden fizikai hatásra kidolgozok egy-egy számolási módszert, amellyel az adott fizikai hatás, a megfelelő pontosság mellett, kvantitatívan lehet jellemezni, azaz vissza lehet vezetni a vevő oldalon mérhető bithiba arányra.

A második téziscsoportban az RWA probléma megoldását tűztem ki célul a fizikai korlátok figyelembevételével. Mint ismeretes, két fő esetet különböztetünk meg az optikai hálózatok konfigurációjánál, a statikus és a dinamikus konfigurációt. Mindkét módszerre algoritmusokat fejlesztettem ki, amelyek képesek a fizikai hatások figyelembevételére. Ezen új módszerek előnyeit szimulációkkal igazolom.

A disszertációban bemutatott egyes algoritmusok, illetve modellezési eljárások motivációja legtöbb esetben az ipari partnerektől származó kérdések megoldása volt. A javasolt módszerek implementálhatóak az egyes optikai kapcsolókba, ezáltal figyelembe lehet venni a fizikai korlátokat is.

Az elért eredményeket 10 folyóirat cikkben, 10 konferencia cikkben, egy könyvfejezetben és egy nemzetközi szabadalomban tettem közzé.

2. Kutatási célkitűzés

A kutatás hátterét az a feladat adta, hogy az útvonalválasztó algoritmusok nem, vagy csak nagyon leegyszerűsítve, veszik figyelembe az optikai hálózatok teljesítőképességét. Ennek érdekében elmélyedtem a WDM technológiában, illetve az itt fellépő fizikai hatásokban. Ezeket a fizikai hatásokat tanulmányozva, legelső célként egy olyan gyors számolási módszer kifejlesztését tűztem ki célul, amely alkalmas valós időn belüli jelminőség ellenőrzésre, ugyanakkor a pontossága kielégítő.

Továbbiakban a modell pontosságát növelve elmélyedtem az optikai szálakban fellépő nemlineáris hatások számolásában. A modell eredményei, illetve a gyakorlatban fellépő problémák vezettek az optimális jelszint kérdéskörének tisztázására. A cél az volt, hogy a hálózattervezés megkönnyítése érdekében, gyakorlatban jól használható eredményeket mutassak be, amelyek a hálózat fontosabb paramétereinek ismeretében, választ adnak egy optikai erősítő kimenetén az optimális jelszintre.

Az újrakonfigurálható csomópontok (ROADM - Reconfigurable-Optical-Add-and-Drop-Multiplexer) elterjedésével újabb eddig nem tapasztalt problémák, illetve lehetőségek, jelentek meg az optikai hálózatokban. Míg a pont-pont hálózatok esetében egy adott szálon belül a WDM csatornák azonos fizikai paraméterekkel rendelkeztek, addig ROADM elterjedésével, a mostani hálózatokban már ez nem igaz. Tehát míg eddig igen egyszerűen lehetett kezelni az optikai adatsík korlátait, az újrakonfigurálhatóság miatt ez igen bonyolulttá vált. Ez magával vonta az optikai eszközök fejlődését, ezenfelül átalakította az eddig létező útvonalválasztási algoritmusokat. Ezek a kihívások vezettek a fizikai rétegen alapuló dinamikus útvonalválasztás problémakörének megoldására. Itt célként tűztem ki egy olyan algoritmus kifejlesztését, amely a lehető legjobban közelíti a valóságot. Ezek alapján sikerült figyelembe venni a többrétegű hálózatok nyújtotta lehetőségeket amellet, hogy az optikai réteg korlátait is figyelembe tudtam venni.

A technológia megvalósíthatóságát illetve a nemlineáris hatásokban való elmélyedés következtében új célként tűztem ki a jelszint alapú útvonalválasztás megoldását. Ezek alapján sikerült egy új, az eddigi RWA módszereket felülmúló RWA módszert kifejleszteni.

Ezen felül foglalkoztam minden olyan kérdéskörrel, ami a többrétegű hálózatok és a fizikai réteg együttes működését hivatott bemutatni

3. Módszertan

A távközlő hálózatokat gráfokkal modelleztem, és a problémák megoldásához ismert gráfelméleti algoritmust alkalmaztam, Dijkstra algoritmus [4][5]. Az NP-nehéz feladatokat ILP [6] segítségével fogalmaztam meg, és a gyakorlatban CPLEX [7] programcsomagok segítségével oldottam meg. Az algoritmusok kiértékelésére egy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Távközlési és Médiainformatikai Tanszéken fejlesztett hálózati szimulátort használtam [8] illetve az ILP esetében az általunk fejlesztett szimulátort használtam.

A fizikai hatások modellezésére analitikus számolásokat végeztem. Az eredmények helyességének ellenőrzését legtöbb esetben, a kereskedelemben is kapható VPI Transmission Maker [9] nevezetű szoftver segítségével végeztem el. A nemlineáris hatások modellezésének eredményeit Athens Information Technology kutatócsoportjának eredményeivel hasonlítottam össze. Sok esetben sikerült mérésekkel is alátámasztani a számolási módszereket [T1].

4. Új eredmények

Az új tudományos eredményeimet - doktori értekezésemet követve - két téziscsoportba rendeztem. Az első csoportban a fizikai hatások modellezése került bemutatásra, míg a második csoportban a fizikai hatásokon alapuló útvonalválasztással foglalkozik.

4.1 1. Téziscsoport: Fizikai korlátok és modellezésük optikai WDM hálózatokban.

Az elmúlt tizenöt-húsz évben az optikai technológia nagymértékben elterjedt a távközlési hálózatokban. Különböző technológiák jelentek meg a hálózat egyes szegmenseiben. A hozzáférői hálózatokban rövidtávú, passzív optikai hálózatokat alkalmaznak. Az agregációs hálózatokban DWDM, vagy ritka hullámhosszosztásos (CWDM) technológiát alkalmaznak, tisztán optikai kapcsolást végző csomópontok együttes alkalmazásával. A maghálózatokban illetve a kontinentális távközlésben alacsony zajtényezőjű optikai erősítőket, Raman erősítőket, illetve nagyon precíz diszperziós térképeket használnak. Mindezek a technológiák különböző modulációs formák és sebességek mellett kell hogy működőképesek legyenek. Ennek következtében, egy olyan modell kifejlesztése, amely a hálózat minden szegmensére érvényes, szinte lehetetlen. Az egyetlen megoldás, hogy az egyes technológiákat külön választani és ezen belül definiálni a fő fizikai hatásokat, amelyek a jel minőségére legnagyobb hatással vannak.

A disszertáció a fizikai hatásokon alapuló útvonalválasztással foglalkozik WDM hálózatok esetében, ezáltal a modellezés során az alábbi megkötéseket tettem:

- CWDM vagy DWDM metró vagy maghálózat
- nagy teljesítményű, külső modulátorral rendelkező DFB (distributed feedback lasers) adók
- intenzitás modulált jelek, NRZ (non-return-to-zero) vagy RZ (return-to-zero)
- direkt detektálás PIN vagy APD (avalanche) vevők.
- bit sebesség egészen 10 Gbit/s
- csatorna távolság 50 vagy 100 GHz

Mint ahogy a megkötésekből látszik ezek a korlátozások nem túl szigorúak, jelenleg (2010) a mag és agregációban alkalmazott hálózatok kielégítik ezeket a feltételeket. Ennek ellenére számos gyártónak van 40 Gbit/s fázis modulált terméke. Ebben az esetben a javasolt modellt bővíteni kell.

4.1.1 1.1 altézis: Analitikus módszer a jel Q-faktorának meghatározására

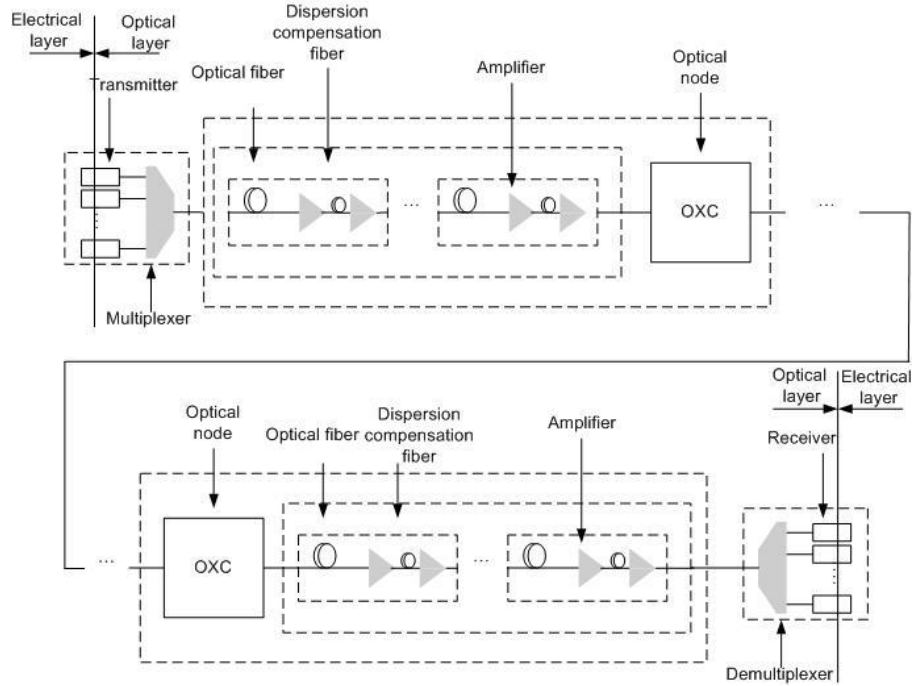
1.1 altézis: "Javasoltam egy analitikus számolási módszert, amely alacsony számítási követelményekkel rendelkezik, ennek ellenére figyelembe veszi a fő fizikai hatásokat egy intenzitás modulált, direkt detektált, 10Gbit/s bitsebességű, hullámhossz multiplexált, tisztán optikai rendszer esetén."

Az 1.1 altézisben a Q-faktorra egy analitikus számolási módszert mutattam be. Számos cikk található az irodalomban, amelyek az optikai hálózatok méretezésével foglalkoznak [10][11][12][13][J7]. A legtöbb módszer az erősítők illetve az áthallásból származó zaj eloszlásának szórását számolja és ebből következtet a vételi oldalon a bithiba arányra [10][14][15]. A disszertációban bemutatott módszer szintén a zaj szórását számolja, ennek ellenére két fontos előnye van a korábban már publikált módszerekhez képest.

Az első különbség az, hogy a modellben figyelembe lehet venni szinte az összes jelentős fizikai hatást, amely fellép WDM optikai hálózatokban, természetesen figyelembe véve a 4.1-es fejezetben ismertetett megkötéseket. A szerző legjobb tudomása szerint ez az első modell, amely egyszerre képes kezelni az erbiummal adalékolt optikai erősítők (EDFA) zaját, csomópontokban keletkezett áthallást, szál nemlinearitást: mint a négy-hullám keverés (FWM), stimulált Raman szórást (SRS) és a kereszt-fázis modulációt (XPM), illetve a polarizációs modus diszperzió (PMD) hatásait a jelminőségre. Az előbb említett hatások korlátozzák leginkább a napjainkban telepített rendszerek jelminőségét.

A másik nagyon fontos előnye a javasolt számolási modellnek, hogy az eredeti problémát képes több alproblémára szétbontani. Tétélezzünk fel egy pont-pont összeköttetést, ahol optikai eszközök egymást követik (szálak, EDFA, csomópont, stb..) a javasolt módszer képes redukálni az eredeti problémát több alszámolásra, ahol az egyes számolások egymástól függetlenül elvégezhetőek. A nagy előnye ennek a módszernek az, hogy képes együttműködni fizikai hatásokon alapuló útvonalválasztó algoritmusokkal.

Egy optikai összeköttetés több optikai elem sorba kapcsolásából épül fel, mint ahogy az 1 ábrán látható. Egy pontos számítási módszer, annak érdekében hogy megbízhatóan ki tudja számolni a jel minőségét, az összes eszközben fellépő fizikai hatást képes kell legyen számolni.



1 ábra: Optikai összeköttetés elemei

A Q-faktor definíciójából kiindulva és egy egyszerű matematikai átalakítással, az 1 egyenlet szerint, kiszámolható a Q-faktor egy eszköz után (Q_{end}) úgy, hogy ismerjük a bemeneti Q-faktort (Q_{start}) és a fellépő fizikai hatásokat. Ezek alapján kiszámolható egy optikai jel jelminősége az alapján, ahogy a hálózaton áthalad.

$$Q_{end} = \frac{\mu_{1end} - \mu_{0end}}{\sigma_{1end} + \sigma_{0end}} = \left(\frac{\mu_{1end} - \mu_{0end}}{\mu_{1start} - \mu_{0start}} \right) \times \left(\frac{\sigma_{1,start} + \sigma_{0,start}}{\sigma_{1,end} + \sigma_{0,end}} \right) \times \left(\frac{\mu_{1start} - \mu_{0start}}{\sigma_{1,start} + \sigma_{0,start}} \right) = 1$$

$$= \left(\frac{\mu_{1end} - \mu_{0end}}{\mu_{1start} - \mu_{0start}} \right) \times \left(\frac{\sigma_{1,start} + \sigma_{0,start}}{\sigma_{1,end} + \sigma_{0,end}} \right) \times Q_{start} = (\text{Eye Penalty}) \times (\text{Noise Penalty}) \times Q_{start}$$

Mint ahogy az 1-es egyenlet mutatja egy rendszer teljes Q-faktora kiszámolható az egyes eszközökön történő jelminőség romlás összegzésével, azaz a zaj (*Noise Penalty*) és a diszperziós hatások (*Eye Penalty*) különválasztásával. A diszperziós hatások a kromatikus diszperzió (CD) illetve polarizációs módus diszperzió (PMD), míg a zaj hatások az optikai erősítők zaja (ASE), illetve az áthallások.

A CD napjainkban a metró illetve mag hálózatok esetében kompenzálva van. Mivel a CD-nek hullámhossz függő, a reziduális diszperzió ronthatja a jelminőséget. Ennek ellenére ennek a jelenségnek nincs nagy hatása a jelminőségre, a napjainkban alkalmazott C és L sávú rendszerek esetén, ahol kevesebb mint húsz kompenzációs pont van.

A PMD esetében más a helyzet. Mivel a mai fénytávközlő rendszerekben a PMD-t nem kompenzálják, emiatt még 10Gbit/s bitsebességű rendszerek esetében is jelentős hatása lehet a jelminőségre [J7].

A zaj hatások magába foglalják az EDFA-k zaját (ASE), a csomópontokban keletkezett áthallást (XT), illetve az optikai szálakban a nemlinearitások miatti áthallást. Ebben az esetben feltételezem, hogy az egyes hatások egymástól

függetlenek. Az egyes jelenségeket (ASE, XT, FWM, XPM és SRS) függetlenül kezelem és az együttes hatásukat a Q-faktorra Gauss eloszlásfüggvényű valószínűségi változóként kezelem.

A p-i-n fotódióda vevőmodelljét alkalmazva, illetve figyelembe véve az előző modellezési eljárást, a Q-faktor közelíthető az alábbi képlettel [J1]:

$$Q_i = \mu_{SRSi} \frac{\mu_{1i} - \mu_{0i}}{\sigma_{0 ASEi} + \sqrt{\sigma_{1 ASEi}^2 + (\sigma_{XPMi}^2 + \sigma_{FWMi}^2 + \sigma_{SRSi}^2)}} \quad 2$$

ahol $\sigma_{0 ASEi}$ és $\sigma_{1 ASEi}$ az erősítők spontán emissziója (ASE) által a 0-s és az 1-es jelszintben okozott zaj szórása; σ_{XPMi} , σ_{FWMi} , σ_{SRSi} a keresztfázis-moduláció (XPM - Cross-Phase-Modulation), a négyhullám-keverés (FWM - Four-Wave-Mixing), a stimulált Raman-szórás (SRS - Stimulated-Raman-Scattering) miatti szórás az 1-es jelszintben i . csatornában; μ_{SRSi} pedig a SRS miatt kialakuló jelszint eredeti jelszintre normált értéke.

Az 1-es illetve 2-es képlet együttes alkalmazásával lehetőség van kiszámolni egy optikai összeköttetésre jellemző jelminőséget, figyelembe véve, hogy az összeköttetés tartalmazhat különböző optikai szálakat, erősítőket, csomópontokat. A részletes számolási módszer a különböző fizikai hatásokra megtalálható a disszertációban.

Az 1.1-es altézisben bemutatott számolási módszer egy igen komplex módszer amely több alszámolást is tartalmaz. A módszer validálása sem triviális probléma. Első lépésként a az ASE és a PMD számolását hasonlítottam össze kereskedelemben kapható szoftver VPI Transmission Maker [9] eredményeivel, ahol nagyon hasonló eredményeket kaptam. A nemlineáris hatások esetében ez az összehasonlítást nem lehetett elvégezni, mivel nagyobb (>18dBm) jelszintek esetében a szimulációs szoftver számolási ideje drasztikusan megnövekedett (több hét, hónap). Ebben az esetben összehasonlítottam a szálba csatolható optimális jelszintet (1.2 altézis), amelyet egyrészt a modelltől lehet kiszámítani, másrészt a kereskedelemben kapható EDFA-k kimenő jelszintjei, itt a Cisco illetve a Huawei termékeit vizsgáltam. Ebben az esetben is nagyon jó egyezést találtam. Nemlineárisa hatások esetében szintén összehasonlítottam az eredményeket az OptiSystem [16] kereskedelemben kapható szoftver eredményeivel CWDM rendszerek esetében, ahol a szimulációs idők sokkal alacsonyabbak voltak, mint DWDM rendszerek esetében. Ezek az eredmények a [J4] voltak publikálva. Szintén az ismertett modell számolásait használtuk a [T1]-[T3] projektekben, ahol a számolási eredményeket mérési eredményekkel hasonlítottuk össze. Ebben az esetben is nagyon jó egyezést kaptam.

Konklúzióként levonható, hogy a bemutatott modell pontosan határozza meg egy optikai összeköttetés Q-faktorát, 10 Gbit/s sebességű, OOK moduláció és direkt detektálás esetén, azaz a napjainkban használatos optikai hálózatokban.

4.1.2 1.2 altézis: Optimális szálba csatolható jelteljesítményt számolása WDM optikai hálózatok esetében

1.2 altézis: "Módszert javasoltam különböző hálózati konfigurációk esetében az optimális jelszint meghatározására, intenzitás modulált, direkt detektált, 10Gbit/s bitsebességű, hullámhossz multiplexált, pont-pont összeköttetésű, tisztán optikai rendszer esetében."

Az 1.1-es altézisben egy számolási módszert mutattam be a jelminőség meghatározására optikai hálózatokban. Ez alapján, illetve egy egyszerű hálózati topológiát feltételezve az 1.2 altézisben kiszámoltam a szálba csatolható optimális jelszint pontos értékét. A jelszint növelésével a vételi oldalon javul az optikai jel/zaj viszony, azaz javul a jelminőség. Abban az esetben, ha figyelembe vesszük az optikai szál nemlineáris viselkedését, a jelszint növelésével növekszik a nemlineáris torzítás is. Figyelembe véve a nemlineáris hatásokat, meg lehet határozni egy optikai összeköttetés optimális jelszintjét, ami azt jelenti, hogy egy adott küszöbön belül a nemlineáris torzítást elfogadom. Eredményként az optimális jelszint pontos értékét adom meg, azaz az adószinteket vagy az EDFA kimenő jelszintjeit, különböző hálózati paraméterek függvényében, 10 Gbit/s, WDM, OOK direkt detektált rendszerek esetén.

Az elmúlt években a WDM technológia ugrásszerűen fejlődött. Szinte minden hatást lehet már kompenzálni tisztán optikai úton. Az egyedüli hatás, amit nem lehet teljes mértékben kompenzálni az a zaj. Természetesen léteznek technikák amivel a zaj szintet csökkenteni lehet, mint például a sávszűrés, de a teljes kompenzálására tisztán optikai úton még nem létezik megoldás. Köszönhetően a technológia fejlődésének alacsony zajtényezőjű erősítési technikák jelentek meg, mint például a Raman vagy parametrikus erősítők, vagy alacsony zajtényezőjű EDFA és SOA erősítők. Szintén a technológia fejlődésének köszönhetően a csomópontokban keletkező áthallás jelentősen csökkent és ugyancsak ez a zajcsökkenés figyelhető meg az adólézerek esetében is.

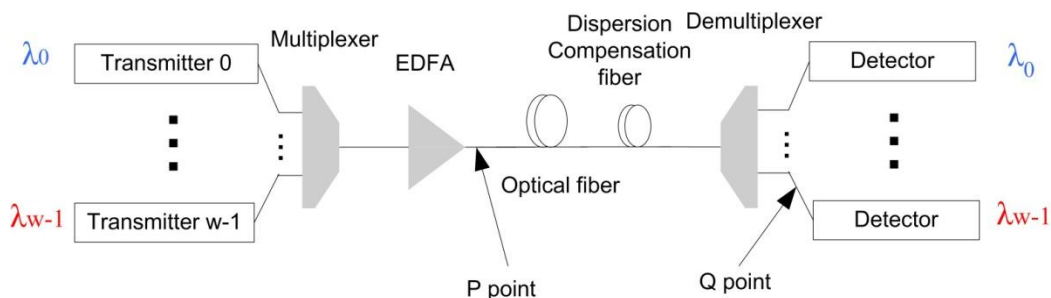
Az egyedüli jelenség, amely mind a mai napig igen komoly korlátot állít az optikai hálózatok méretére, az a nemlineáris hatások. Természetesen léteznek itt is alacsony nemlineáris indexű szálak, de a gazdaságilag kivitelezhetetlen, hogy az összes telepített szálát lecserélni ilyen típusú szálra. Az egyedüli lehetőség maximalizálni a szálba csatolt optikai jelszintet, ennek következtében maximalizálni az optikai hálózat kiterjedését. Természetesen a nemlineáris hatások nagymértékben függenek a bitsebességtől. Megnövelve a bitsebességet 2,5 Gbit/s-ról 10 vagy 40 Gbit/s-ra a maximálisan megengedett optikai teljesítmény csökken, emiatt csökken a hálózat kiterjedése is.

Napjainkban a hálózattervezőknek igen szigorú szabályok írják elő a szálba csatolható maximális jelszintet annak érdekében, hogy elkerüljék a szál nemlineáris tartományát. A nemlineáris hatások megfelelő modellezése jelentősen megkönnyítené

a hálózat tervezést. A 1.2 tételben javasolt módszert használva, lehetőség van meghatározni, azt a jelszint intervallumot, ahol a nemlineáris torzításokat még toleráljuk. Ezáltal lehetőség van maximalizálni az optikai jelszintet, azaz a hálózatunk méretét, vagy minimalizálni a hálózatban szükséges optikai erősítőket. Meg kell említeni, hogy léteznek más megoldások is a nemlineáris hatások csökkentésére, mint például más modulációs formák vagy diszperziós térképek alkalmazása [17][18][19]. A legjobb megoldást ezek együttes alkalmazásával lehet elérni.

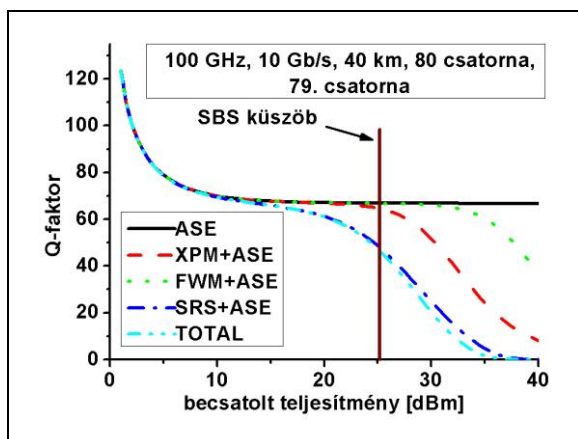
Az 1.1 altételben ismertetett számolási módszert használva lehetőség adódik kiszámolni az optimális jelszintet egy tipikus hálózat esetén. A nagy előnye a módszernek az, hogy a hálózat tervezők ezáltal pontos értéket kapnak az optimális jelszint értékére. Az eredményeket összehasonlítottam a Brilluoin küszöbvel. A Brilluoin küszöb határozza meg az egy csatornába csatolható maximális jelszintet.

A 2. ábrán az alkalmazott hálózati topológia látható. A cél az volt, hogy a P pontban, az EDFA után, növeltem a jelszintet és a vételi oldalon, a Q pontban, kiszámoltam a jel minőségét. Ezáltal, ki lehet számolni egy pont-pont WDM összeköttetés optimális jelszintjét.

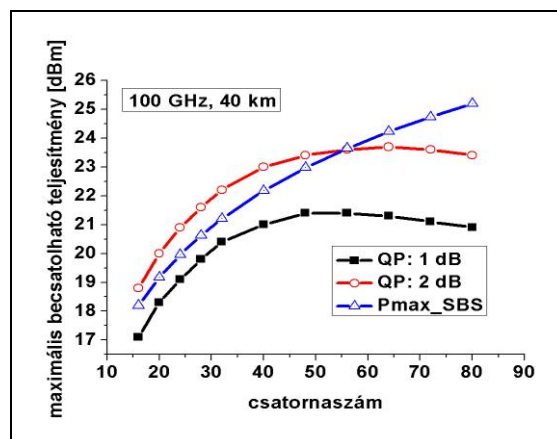


2. ábra: Az optimális jelszint meghatározásánál alkalmazott hálózati topológia

Az eredmények kiterjeszthetők erősítő láncokra is, hiszen az optimális jelszint értéke nem változik, csak a jelminőség romlik. Az összes nemlineáris hatás esetében a jelminőséget összehasonlítottam azzal az esettel mikor csak az ASE zajt vesszük figyelembe. Mint ahogy várható volt, növelve az erősítő erősítését az ASE zaj növekszik, amely egy csökkenő OSNR-hez vezet. Ennek köszönhető a csökkenő jelminőség. Ez látható a 3. ábrán a folytonos vonal ASE-val jelölve. Az ábrán a Q-faktor jelszint függése látható. Az egyes $***+ASE$ görbék az adott nemlineáris hatásra és az ASE együttes hatására utal. A *TOTAL*-al jelölt görbe, amikor az összes hatást figyelembe vesszük.



3. ábra A Q-faktor függése a jelszinttől 64 csatornás rendszer illetve 100 GHz-es csatornatávolság esetén



4. ábra Optimális jelszint 100 GHz-es csatorna táv és 40 km szál esetén

Annak érdekében, hogy meghatározzam az optimális jelszintet, bevezettem a nemlineáris hatások miatti Q-faktor csökkenést. A Q-faktor csökkenést az alábbiak alapján határozható meg:

$$QP = \frac{Q_{ASE}}{Q_{TOTAL}}$$

3

Ahol a Q_{ASE} a Q-faktor amikor csak az ASE hatását veszem figyelembe és a Q_{TOTAL} amikor az összes fizikai hatást figyelembe veszem. A Q-faktor csökkenést két küszöb értéket határoztam meg QP_{dB} , 1 illetve 2 dB-t. Ezek tipikus értékek melyeket még tolerálni lehet egy hálózat tervezésénél. Az eredmények a 4. ábrán láthatóak. Viszonyításképp az ábrán feltüntettem a Brilluoin küszöb értékét is. Az eredményeket az alábbiak alapján határoztam meg:

- Kiszámoltam az ASE és a nemlineáris hatások által meghatározott Q-faktort, mint ahogy az előző fejezetben ismertettem, különböző csatorna számokra.
- A legrosszabb jelminőségű csatornát vettem és erre kiszámoltam az 1 és 2 dB QP_{dB} -hez tartozó jelszintet.

Az 1.2 altézisben a nemlineáris hatások jelszint függését mutattam be. Analitikus számolási módszerekkel kiszámoltam különböző hálózati topológiák esetén az optimális jelszint értékét. Megadtam az egyes hálózati paraméterek esetén a legjobban korlátozó nemlineáris hatást. Az eredmények hasznosak hálózattervezőknek, hogy kiegészítsék jelszint tervezésüket. Az eredményeket itt publikáltam:[J1][J4][J8][J9]

4.2 II. téziscsoport: Fizikai korlátok figyelembevétele WDM optika hálózatokban útvonalválasztásnál

A megnövekedett adatforgalom a motivációja egy hatékonyabb, flexibilisebb, intelligensebb optikai hálózati architektúra kifejlesztésének. Ebben az irányban a WDM hálózatok feletti IP az egyik legígéretesebb technológia, amely ki tudja elégíteni ezt a folyamatosan növekvő sávszélesség igényt. Más szempontból viszont egy ipari konszenzus van afelől, hogy a GMPLS (generalized multi-protocol label switching) [20] protokoll alkalmas, hogy a jövő hálózataiban kulcsszerepet játsszon, különösképpen az automatikusan kapcsolt optikai hálózatok esetében (ASON) [21]. Ennek ellenére a WDM hálózatok nyújtotta kapacitás várhatóan nem lesz teljes mértékben kihasználva [22]. Ez annak köszönhető, hogy az optikai hálózatokban opto-elektro-opto átalakításokat kell végrehajtani (OEO), amely a jól ismert elektronikus szűk keresztmetszethez vezet. Ennek ellenére a nem tisztán optikai hálózatoknak vannak előnyei is. Ezek közül a legfontosabb a hullámhossz konverzió, kötegelés vagy éppenséggel az elektronikus jelregenerálás. Ugyanakkor jelentős hátrányokkal is bírnak. A komplex struktúra, moduláció és adatsebesség függőség, megnövekedett üzemeltetési költség és nem optimális WDM kapacitás kihasználtság említhető hátrányaik között. Következésképp a jövő optikai hálózatai várhatóan túllépnek ezeken a problémákon és teljes mértékben kihasználják a WDM technológia adta lehetőségeket. Ezt várhatóan a tisztán optikai kapcsolók (újrakonfigurálható optikai add/drop multiplexer –ROADM- vagy optikai rendezők –OXC-) bevezetése fogja megvalósítani. A tisztán optikai kapcsolás bevezetése várhatóan lecsökkenti a drága OEO adó/vevők számát a hálózatban. Ezzel természetesen együtt jár az elektromos rétegbeli jelalak regenerálás elvesztése is. Ennek következtében az optikai jel minősége romlik a fizikai hatások miatt (csillapítás diszperzió, nemlinearitások...).

Több kiváló cikk foglalkozik az RWA probléma megoldásával [10] [23][24][25][26][27][28]. Ezen cikkek egy ideális gráfelméleti problémát oldanak meg és nem, vagy csak nagyon leegyszerűsített mértékben, veszik figyelembe az optikai hálózat specifikusságát. Számos cikk foglalkozik azonban az RWA probléma kiterjesztésével úgy, hogy figyelembe veszünk más korlátokat is [10][29][30][31].

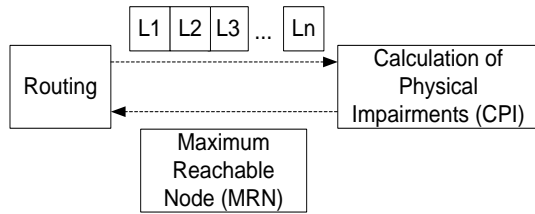
Ebben a fejezetben olyan intelligens útvonalválasztási algoritmusokat mutatok be, amely képes figyelembe venni az útvonalválasztás mellett egyéb fizikai paramétereket (korlátokat), annak érdekében, hogy minden esetben a jelminőség biztosítva legyen. Ilyen típusú útvonalválasztó algoritmusokat az irodalomban fizikai hatásokon alapuló útvonalválasztó algoritmusnak (IA-RWA vagy PICR) hívják.

4.2.1 2.1 altézis: Dinamikus IA-RWA algoritmus

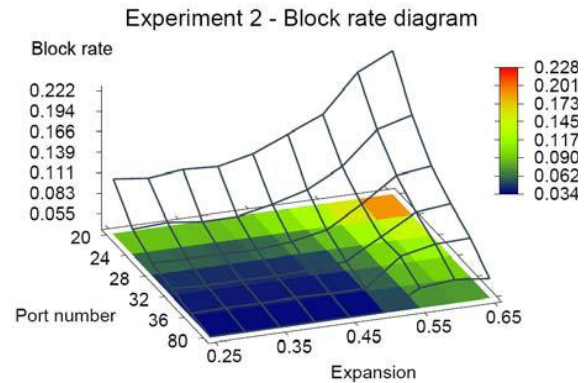
2.1 altézis: "Javasoltam egy dinamikus IA-RWA algoritmust, amely képes figyelembe venni az optikai réteg fizikai korlátait, többretegű hálózati modell esetén."

Mind az agregációs optikai hálózatokban (MON) mind a mag hálózatokban (LHON) a jelminőség nagymértékben függ a fizikai hatásoktól. Ennek következtében az útvonalválasztás során ezeket a hatásokat is figyelembe kell venni. Tisztán optikai 3R regenerálás híján, az összeköttetés jelminősége határozza meg a tisztán optikai összeköttetés megvalósíthatóságát. Feltételezhetem tehát, hogy a jel regenerálása csak az elektromos közegben valósítható meg. Abban az esetben, hogy egy összeköttetés jelét átalakítom az elektromos rétegbe, a regeneráláson kívül más lehetőség is adódik számunkra, mint például hullámhossz konverzió, kötegelés. Megmutatom, hogy a fizikai réteg korlátait az 1.1 altézis alapján figyelembe véve, és az elektromos réteg lehetőségeit is kihasználva, igen nagy hatással vannak a fizikai hatásokon alapuló RWA megoldásokra. Ebben az altézisben egy ilyen algoritmusra adok egy megoldást. Az újdonság a javasolt algoritmusban az, hogy IA-RWA algoritmus és ugyanakkor képes többretegű hálózatokat figyelembe venni. A módszer több új elemet is tartalmaz [B1][C4][C6], melyeket a szerző tudomása szerint eddig még senki nem vizsgált, nem publikált.

A módszer működése az alábbiak alapján történik. Az útvonalválasztó modul kiválaszt egy útvonalat az általa alkalmazott útvonal keresési módszerrel. Jelen esetben egy legrövidebb útkereső Dijkstra algoritmus [4][5]. Ezek után a kiválasztott útvonal adatait elküldi a fizikai hatásokat számoló modulnak. Ez a modul hivatott eldönteni, hogy az adott összeköttetés megvalósítható-e vagy sem. Az 1.1-es altézisben bemutatott számolási módszer analitikus mivolta miatt [C5], rendkívül gyorsan képes kiszámolni egy útvonal jelminőségét, azaz képes dinamikus útvonalválasztási algoritmusokkal együttműködni. Továbbá fontos megemlíteni, hogy a fizikai hatásokat számoló modul nem azt adja vissza, hogy az útvonal megvalósítható-e vagy sem, hanem az adott útvonalon a maximálisan elérhető csomópontot (MRN - Maximum-Reachable-Node) ahol a jelminőség még kielégítő volt [C6]. Az 5. ábra az említett algoritmus folyamatábrája látható. Ezek alapján, ha az MRN a végső csomópont, akkor az útvonalat ki lehet építeni, az igényelvezetés megtörtént. Ha az MRN a kezdő csomópont, akkor az igény blokkolódik. Természetesen ez valós hálózatok esetében nem történhet meg, hiszen nem építenek olyan hálózatot, ahol egy linken nem lehet kapcsolatot kiépíteni. Ha az MRN egy közbelső csomópont, akkor az igény elvezetése megtörténik a kezdő és az MRN csomópont között és egy új útvonalválasztás indul el az MRN és a végcsomópont között. Ez iteratívan addig megy, míg az előző két eset egyike fel nem áll.



5. ábra: Algoritmus működése



6. ábra: Blokkolási arány függése a hálózati paramétereiktől

Jelen eredmények a COST 266 BT [32] hálózatra számoltam ki, 10 Gbit/s linkkapacitással. A generált forgalom Poisson-születési folyamat, illetve geometriai eloszlású tartásidővel lettek generálva. A kezdő és végpontok egyenletes eloszlással lettek sorsolva, természetesen kivéve azokat az igényeket ahol a kezdő és végpont megegyezik. A sáv szélesség eloszlása egy igényre vonatkozóan egy binomiális eloszlást követ 10, 1000, 5000 Mbit/s átlagértékkel. A tartási idő geometriai eloszlás volt, az átlagot úgy határoztam meg, hogy nulla blokkolás legyen 80% hálózati kihasználtság mellett.

Első lépésként definiáltam a három legfontosabb hálózati paramétert, amit vizsgálni szerettem volna:

Az első ilyen paraméter a hálózat skálázása. Ennek a paraméternek nagy hatása van a jel minőségre, azaz a fizikai hatások miatti blokkolásra. A szimulációim során az összehasonlíthatóság miatt, 25-65% között változtattam a skálázási paramétert.

A másik nagyon fontos paraméter az igények sáv szélessége. Ez a paraméter nagy hatással van a forgalomkötegelésre. Feltételeztem, hogy a WDM hálózatomban 16 hullámhosszas illetve átlagosan 60% a kihasználtság. Az egyes csatornák 10 Gbit-es adatforgalomra vannak tervezve. Három forgalmi igényhalmazt generáltam, 10Mbit/s, 1Gbit/s, 5Gbit/s átlagos sáv szélességgel. Ezek az értékek egy nagyon alacsony egy közepes és egy magas átlagos sáv szélesség igényt reprezentálnak. Mindegyik igény halmaz 200 000 igényt tartalmaz. Az összehasonlíthatóság miatt hogy biztosítani tudjam a 60% kihasználhatóságot természetesen az átlagos tartási időt változtatnom kellett.

Az utolsó fontos paraméter az opto-elektro-opto (O/E/O) konverterek száma a csomópontokban. Feltételeztem, hogy minden csomópont a hálózatban, optikai rendező (OXC).

A 6. ábrán látható egy tipikus blokkolási arány függése a hálózati paramétereiktől. Mint ahogy várható volt, ha a hálózat kiterjedését növeljük, növekszik a blokkolási arány is hiszen a fizikai hatások korlátozzák az összeköttetéseket. Ha kevés O/E/O

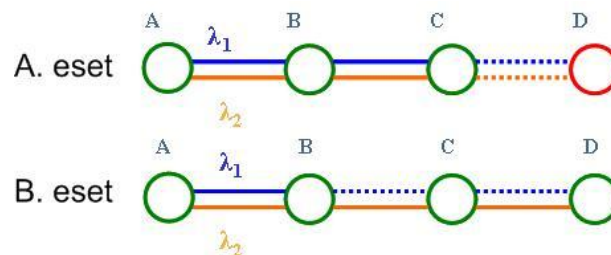
konvertert használunk, akkor szintén növekszik a blokkolási arány, hiszen nem fogunk tudni elegendő hullámhosszat konvertálni, illetve kötegelni. Nagyon fontos következtetést lehet levonni az O/E/O regenerátorok száma és a blokkolási arány görbéjéből. Ebből kiindulva, meghatározva egy elfogadható blokkolási arányt, következtethetünk a hálózatban szükséges O/E/O regenerátorok számára.

4.2.2 2.2 altézis: Adaptív konfigurálási módszer

"Javasoltam egy adaptív konfigurálási módszert metró WDM hálózatokban, aminek következtében a jelszinteket az OSNR függvényében állítom be. Megmutattam, hogy a javasolt módszer minden esetben jobb vagy azonos konfigurálhatósághoz vezet mint a hagyományos módszerek."

Ebben az altézisben egy merőben új módszert javaslok az RWA probléma megoldására [P1][J5][C8]. A módszer lényege, hogy a vezérlők a csomópontokban található vezérelhető optikai csillapítókön keresztül (VOA - Variable-Optical-Attenuator) szabályozza az egyes optikai csatornák teljesítményét úgy, hogy a vételi oldalon még megfelelő optikai jelzaj viszonyt kapjunk. Szintén megmutattam, hogy a napjainkban használatos optikai hálózatokban a módszer implementálható.

Tekintsük a 7. ábrán az A. esetet. Az A csomópontból a D csomópontba akarunk egy fénysugarat kiépíteni. Az egyszerűség kedvéért legyen két hullámhossz a hálózatban. Tegyük fel, hogy a fizikai hatások miatt csak a C csomópontig tudunk eljutni, ott jelregenerálásra van szükség. Az általunk alkalmazott módszer használatával (B. eset) növeljük meg a λ_2 hullámhossz teljesítményét annyival, hogy még kielégítő jelminőséget kapjunk a D csomópontban. Ezáltal képesek vagyunk az említett hullámhosszon egy tisztán optikai összeköttetést létrehozni az A-D csomópontok között.



7. ábra A javasolt algoritmus működése

Napjainkban az optikai csatornák jelszintje azonosak egy szálon belül. Ez a pont-pont optikai összeköttetések tulajdonságából ered. Természetesen ez technológiai egyszerűsítést is magában foglal. A másik előny, hogy azonos jelszintek alkalmazása mellett a legkisebbek a nemlineáris torzítások. Az ötlet az, hogy azonos jelszintek helyett különböző jelszinteket használjunk optikai szálakban annak függvényében, hogy milyenek a vételi oldalon a jel/zaj viszony előírásai. Tehát hosszú

összeköttetéseknel növeljük meg a jelszintet, míg rövidebb összeköttetéseknel csökkentjük azt.

Valamelyest hasonló ötleten lett implementálva az Alcatel-Lucent termékében is [33]. A fő különbség az Alcatel-Lucent terméke és a javasolt ötlet között az, hogy a [33]-ban csak a minimális jelszintet biztosítják pont-pont összeköttetések esetén és nem optimalizálják a jelszinteket a többi csatornával együtt. A hasonlóság az, hogy mind a két esetben különböző jelszintek vannak egy szálon belül.

Az optikai szálakban fellépő lineáris hatások, illetve diszperziós hatások, nem függenek a jelszinttől, ennek ellenére mivel a nemlineáris hatások nagymértékben függenek az alkalmazott diszperziós térképtől, emiatt a diszperzió egy szűk keresztmetszete a javasolt modell alkalmazhatóságának. Metró WDM hálózatok esetén a kis távolságoknak köszönhetően nem alkalmaznak diszperziós térképet. Emiatt a javasolt módszer metró WDM hálózatok esetében alkalmazható. Maghálózatok, illetve kontinentális távközlés esetén, nagyon szigorú tervezési szabályok vannak a jelszintekre illetve a diszperziós térképekre. Ezért ebben az esetben a módszer nem alkalmazható. Másik fontos kérdés a nemlineáris hatások. A szálba csatolt jelszintet az XPM illetve az SRS korlátozza, nem pedig a Brillouin-szórás [J1]. Ez azt jelenti, hogy az optikai jelteljesítményekre felső korlátot a szálba csatolható össz-jelteljesítmény ad, nem pedig az egyes hullámhosszak egyedi teljesítménye. Ennek következtében megnövelhetjük egy-egy csatorna jelteljesítményét egészen a Brillouin küszöbig, ugyanakkor az ugyanazon szálban haladó többi csatorna jelteljesítményét csökkentenünk kell.

4.2.3 2.3 altézis: Heurisztikus RWA módszer az adaptív konfigurálásra

"Javasoltam egy heurisztikus útvonal választási módszert az adaptív jelszint alapú konfigurálásra. Az algoritmus a bemenő paraméterek függvényében, képes visszaadni a globális optimum megoldását, vagy a legegyszerűbb legrövidebb út megoldását, ezáltal biztosítva a módszer skálázhatóságát."

Ebben az altézisben egy új algoritmust és annak előnyeit mutattam be. Az algoritmus képes kezelni az adaptív konfigurálásból adódó különböző jelszinteket [P1][J5][C8] és ugyanakkor képesek vagyunk összehasonlítani a hagyományos és a javasolt konfigurálási módszer teljesítőképességét. A 2.2-es altézis egy konfigurálási módszert javasol a jelszintekre annak érdekében, hogy a vevő oldalon az OSNR kritériumokat teljesítsük. Ugyanakkor azt is bemutatja, hogy mik a korlátai és a hálózat mely részén használható a módszer. A 2.3-as altézis az útvonalválasztásra fókuszál. Ez az altézis egy RWA módszert ad meg, amely képes adaptívan kezelni a jelszinteket.

Az elmúlt években több publikáció volt mely a különböző jelszintek alkalmazását említi. A [31]-ben egy játékelméleten alapuló OSNR modell van bemutatva, ahol az

egy csatornák jelszintjei jelentik a játékosokat és az optimalizálás a teljes OSNR-re vonatkozik. Egy elosztott iteratív algoritmust is javasoltak a cikk keretein belül, amely megoldja az említett problémát. Ebben a publikációban a fókusz az volt, hogy egy egyensúlyi megoldást adjanak a teljes hálózat OSNR-jére. Mint ahogy már korábban említve volt, a legújabb Alcatel-Lucent WDM termékben [33] is különböző jelszinteket lehet konfigurálni. Mint ahogy látszik, a különböző jelszintek alkalmazása egy optikai szálban kivitelezhető. Ezenkívül, a szerzőnek tudomása van olyan hiba nélkül működő hálózatról, ahol a jelszintek nem azonosak, habár ebben az esetben ez nem direkt volt így megvalósítva.

A szerző legjobb tudomása szerint a jelszintek és az útvonalválasztás együtt optimalizálása először a [C8] lett bemutatva, majd kiegészítve a [J5], illetve szabadalmaztatva a [P1]. Az összes eddig említett módszer külön kezeli az útvonalválasztást és a jelszinteket.

A 2.3-as altézisben bemutatott útvonalválasztó algoritmus egy egészértékű lineáris programozás (ILP) alapú módszer. Mint ahogy a nevében is benne van ez egy lineáris programozási módszer, ebből következően az egyik legnagyobb probléma az volt, hogy egy lineáris kapcsolatot bizonyítsak a csatorna jelszintje és a maximálisan megtehető távolság között.

A másik probléma az volt, hogy a feladat NP-nehez bonyolultsági osztályba tartozik. Ezért a kidolgozott algoritmus rosszul skálázódik, tipikusan nyolc hullámhossz a megoldás határa. Annak érdekében, hogy ezt kiterjesszem egy előszűrést alkalmaztam, ezáltal csökkenteni tudtam az ILP változók számát. Az úgy oldottam meg, hogy az ILP megoldása előtt egy perprocesszálist hajtottam végre.

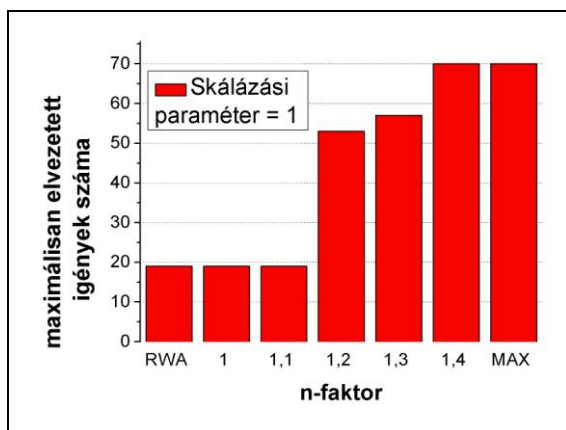
Az algoritmusnak a következő lépései vannak:

- minden igényre kiszámolja a legrövidebb utat
- meghatározzuk egy előre definiált *maximális eltérést*
- minden igényre és minden élre kiszámolja, hogyha az az igény áthaladna azon az élen, akkor mekkora lenne a megtett út
- ha az út nagyobb, mint a legrövidebb út plusz a *maximális eltérés*, akkor azt az élet kihagyja az ILP felírásból

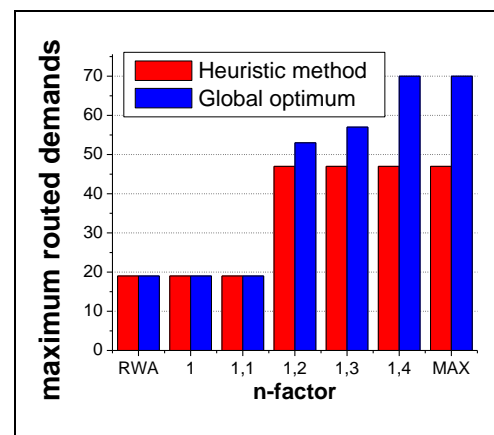
A bemutatott heurisztikus módszernek több előnye van. Egyrészt ha a *maximális eltérés* végtelen, akkor visszakapjuk a globális optimum megoldását. Másrészt viszont, ha a *maximális eltérés* értéke nulla, akkor viszont a probléma redukálódik a legrövidebb út keresésre. Természetesen, változtatva a *maximális eltérés* értékét a probléma skálázhatóságát is tudjuk változtatni.

Nagyon nehéz bemutatni a javasolt módszer előnyeit, hiszen minden esetben jobb, vagy legalább azonos megoldáshoz fog vezetni, mint a hagyományos RWA megoldás. Ennek oka az optimalizáció során fellépő plusz egy szabadságfok, a jelszintek

állíthatósága. Összehasonlítottam a javasolt algoritmust és a hagyományos azonos jelszinten működő RWA algoritmust, 8. ábra. Ebben az esetben a *maximális eltérés* értéke végtelen. Az y tengelyen a maximálisan elvezetett igények száma található, míg az x tengelyen az alkalmazott útvonalválasztási módszer látható. Az RWA felirat a hagyományos útvonalválasztással kapott eredményt jelenti. Az $n = 1$ megoldás hasonló az RWA megoldáshoz azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben megengedünk az átlagtól kisebb jelszinteket, míg az RWA esetén mindegyik jelszint azonos. Természetesen az átlagnál nagyobb jelszintet ebben az esetben sem engedünk meg. Az $n > 1$ esetben az egyes csatornák nagyobbak lehetnek, mint az átlag jelteljesítmény. A „MAX”-al jelölt megoldás, azt az esetet mutatja, mikor a fizikai hatásoktól eltekintünk és csupán az RWA problémát oldjuk meg. A *skálázási paraméter* azt jelenti, hogy az eredeti szálhosszakat megnöveltük a skálázási paraméter arányával annak érdekében, hogy a fizikai hatások dominánsabbak legyenek. A 8. ábrán a skálázási paraméter 1 volt, azaz az eredeti szálhosszakat használtam (a földrajzi távolságok 25% voltak csökkentve hogy reális metró-WDM hálózati paramétereket kapjak, mint ahogy a disszertációban részletezve van).



8. ábra: Maximálisan elvezetett igények száma az n-faktor függvényében



9. ábra: Heurisztikus és globális optimumot adó módszer összehasonlítása

A 9. ábrán a heurisztikus és a globális optimumot adó módszert hasonlítom össze abban az esetben mikor a *maximális eltérés* nagysága nulla, nyolc hullámhossz esetén. Mint ahogy látható, alacsony n-faktor értékek esetén a két módszer ugyanúgy teljesít, viszont amint növeljük a változtathatóságát a jelszinteknek, a különbség is növekszik. A fő konklúzió az, hogyha megengedjük a jelszintek változtathatóságát, akkor sokkal több igényt lehet elvezetni egy tisztán optikai hálózatban.

5. Gyakorlati hasznosítás

Az 1. téziscsoportban javasolt számítási módszert már többször alkalmaztam létező hálózatok méretezésére. Ezek a számolások rendkívüli jelentőséggel bírnak és a gyorsaságuknak köszönhetően alkalmasak előzetes becslést adni egy adott rendszer kiépíthetőségéről [T1].

Az 1.1-es altézisben ismertetett módszer kiválóan alkalmas tisztán optikai hálózatok jelminőségének meghatározására. Sok esetben alkalmaztam az említett számítási módszert a hálózatban meglévő eszközök szükségességének eldöntésére [T1]-[T3].

Az 1.2-es altézis célkitűzése egy eleve gyakorlati problémát fogalmaz meg. Mennyi legyen a jelteljesítmény értéke a közbelső erősítési pontok kimenetén. Ennek a megválaszolására kiválóan alkalmas volt az általam alkotott analitikus modell. Az eredmények bemutatása is igen gyakorlat orientált, hiszen az adott hálózat legfontosabb paramétereinek ismerete alapján meghatározhatjuk a jelteljesítmény értékét.

A 2. téziscsoportban bemutatott algoritmusok jelentősége a közeljövőben fog bebizonyosodni, amikor a pont-pont linkhálózatokat felváltja egy tisztán optikai hálózat. A 2.1-es altézis egy ilyen hálózat feletti RWA módszert ismertet.

A 2.2-es altézis egy olyan módszert fogalmaz meg, amely az eddig ismert konfigurációs módszereknél minden esetben jobb konfigurálhatósághoz vezet. Gyakorlati hasznát mi sem bizonyítja jobban, mint hogy az Ericsson benyújtotta mint szabadalom [P1].

A 2.3-as altézis a 2.2-es altézis ötlete alapján, egy olyan módszert fogalmaz meg, amely képes a nagyobb, több hullámhosszas hálózatok esetében is megoldást nyújtani. Mivel a probléma rendkívül bonyolult, fontos volt a skálázhatóság biztosítása, amelyet a javasolt heurisztikus módszer teljesít.

A kutatómunkám során mindig próbáltam olyan célkitűzéseket tenni, amelyeknél a gyakorlati megvalósíthatóság illetve hasznosság fontos volt. Remélem, a disszertációm jól tükrözi ezt.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek szakmai vezetését: Dr. Cinkler Tibornak, hogy megismertette velem ezt a szép kutatási területet, kitartóan és alaposan irányította kutatási munkám. Szeretnék köszönetet mondani Paksy Gézának, akitől rengeteget tanultam, mind emberi mind tudományos tekintetben. Megtiszteltetésnek érzem, hogy velem dolgozhattam együtt.

Kutatási munkámat az Ericsson és a Nagysebességű Hálózatok Laboratóriuma (HSN*Lab*) közötti együttműködés keretében végeztem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Hálás vagyok Dr. Szabó Róbertnek és Dr. Henk Tamásnak folyamatos támogatásukért.

7. Hivatkozások

- [1] K. L. Chen, H. M. Cheung, K. C. Chan, "From optical performance monitoring to optical network management: research progress and challenges (Invited)", ICOCN 2004
- [2] M. Saleh, J. M. Simmons, "Evolution toward the next-generation core optical network", IEEE/OSA. J. Lightwave Technology. 24(9), 3303–3321, 2006. doi:10.1109/JLT.2006.880608
- [3] H. Zang, J.P. Jue, B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks.", SPIE/Baltzer Opt. Netw. Mag. 1(1), 47–60, 2000
- [4] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs", Numer. Math., vol. 1, pp. 269–271, 1959.
- [5] U. Meyer, "Single-source shortest-paths on arbitrary directed graphs in linear average-case time", in SODA: ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pp. 797–806, 2001.
- [6] L. A. Wolsey, "Integer Programming.", Wiley-Interscience, 1998.
- [7] "CPLEX.", <http://www.ilog.com/products/cplex/>.
- [8] J. Szigeti, P. Hegyi, et al. "IDRSIM (Intra-Domain Routing Simulator)", Department of Telecommunications and Media Informatics, Budapest University of Technology and Economics, 2004–2007
- [9] "VPI Transmission Maker" <http://www.vpisystems.com/>
- [10] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage, B. Mukherjee, "Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks", IEEE/OSA J. Lightwave Tech., vol. 17, no. 10, Oct. 1999, pp. 1713–23.
- [11] I. Neokosmidis et al., "New techniques for the suppression of the fourwave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems", IEEE/OSA J. Lightw. Technol., vol. 23, no. 3, pp. 1137–1144, Mar. 2005
- [12] A. Cartaxo, "Impact of modulation frequency on cross-phase modulation effect in intensity modulation–direct detection WDM systems", IEEE Photon. Technol. Lett., 10(9):1268–1270, 1998
- [13] K. Inoue, K. Nakanishi, K. Oda, H. Toba, "Crosstalk and Power penalty due to fiber four-wave mixing in multichannel transmission", IEEE J. Lightwave Technol., 12(8):1423–1439, 1994
- [14] Y. Huang, J. P. Heritage, B. Mukherjee, "Connection Provisioning With Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks With High-

- Speed Channels”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, col. 23, no. 3, pp. 982-993, March 2005.
- [15] R. Cardillo, V. Curri, M. Mellia, ”Considering transmission impairments in wavelength. routed networks”, in Proc. of the 9th Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM), Milan (Italy), 2005
- [16] OptiSystem <http://www.optiwave.com/>
- [17] R. A. Saunders, B. L. Patel, H. J. Harvey and A. Robinson, “Impact of crossphase modulation for WDM systems over positive and negative dispersion NZDSF and methods for its suppression”, Electron. Lett., 32, (24), (1996), pp. 2206-2207.
- [18] H. J. Thiele, R. I. Killey and P. Bayvel, “Influence of transmission distance on XPM-induced intensity distortion in dispersion-managed, amplified fibre links”, Electron. Lett., 35, (5), 1999, pp. 408-409
- [19] I. Neokosmidis *et al.*, “New techniques for the suppression of the fourwave mixing-induced distortion in nonzero dispersion fiber WDM systems”, IEEE/OSA *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 1137–1144, Mar. 2005
- [20] E. Mannie *Ed.*, “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture“, RFC 3945, Oct. 2004.
- [21] Recommendation G.8080/Y.1304, “Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)“, ITU-T, Tech. Rep., Nov. 2001.
- [22] Z. Zhang, *et al.*, “Lightpath routing for intelligent optical networks“, IEEE Network, vol. 15, no. 4, July-Aug. 2001
- [23] A. Djupsjöbacka, G. Jacobsen, B. Tromborg ”Dynamic Stimulated Brillouin Scattering Analysis”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 18, no. 3, March 2000
- [24] G. Wilfong, P. Winkler, ”Ring routing and wavelength translation”, in SODA: ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 1998.
- [25] N. Wauters, P. Demister, ”Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-Connected Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 5 pp. 881-892, June 1996.
- [26] D. Banerjee, B. Mukherjee, ”A practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14 no. 5 pp. 903-908, June. 1996
- [27] Y. Liu, D. Tipper, P. Siripongwutikorn, ”Approximating optimal spare capacity allocation by successive survivable routing,” in IEEE INFOCOM, (Anchorage, Alaska), pp. 699–708, 2001.

- [28] L. Gargano, U. Vaccaro, "Routing in all-optical networks: Algorithmic and graph-theoretic problems", *Numbers, Information and Complexity*, pp. 555–578, February 2000.
- [29] I. Tomkos et al., "Performance Engineering of Metropolitan Area Optical Networks through Impairment Constraint Routing", *OptiComm*, August 2004.
- [30] M. Ali, D. Elie-Dit-Cosaque, L. Tancevski, "Enhancements to Multi-Protocol Lambda Switching (MPIS) to Accommodate Transmission Impairments", *GLOBECOM '01*, vol. 1, 2001, pp. 70–75.
- [31] L. Pavel, "OSNR optimization via end-to-end power control: A central cost approach", *IEEE INFOCOM*, pp. 1095–1105, 2005
- [32] "COST 266 reference network basic topology (BT) "
- [33] Alcatel-Lucent 1626 Light Manager <http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal>
- [34] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", *IEEE Transaction on Networking*, vol. 3 no. 5 pp. 489-500, Oct. 1995.
- [35] J. Tapolcai, "Routing algorithms in survivable telecommunication networks", PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2004.
- [36] W. Zeiler, F. Di Pasquale, P. Bayvel, J.E. Midwinter, "Modeling of Four-Wave Mixing and Gain Peaking in Amplified WDM Optical Communication Systems and Networks", *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, 14(9):1933-1942, 1996
- [37] K.-P. Ho, "Statistical Properties of Stimulated Raman Crosstalk in WDM Systems", *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, 18(7):915-921, 2000
- [38] "Cisco 15454 ROADM module"
http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/optical/ps5724/ps2006/ps5320/product_data_sheet0900aecd803fc52f.html
- [39] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 2nd ed. New York: Academic, 1995
- [40] T. Antony, A. Gumaste, "WDM Network Design", Cisco Press Feb 7, 2003

8. Publikációk (34)

Könyvfejezet (1,5)

- [B1] I. Tomkos, Sz. Zsigmond et al, "Towards Digital Optical Networks" Chapter 1. Springer ISSN: 0302-9743(Print) 1611-3349 (Online) Volume:5412/2009, DOI:10.1007/978-3-642-01524-3 (6/4=1,5)

Külföldi szabadalom (1)

[P1] Sz. Zsigmond, M. Perényi, T. Cinkler "Signal Power Based Routing In WDM All-Optical Networks" European Patent Office, PCT/EP2008/056579, submitted by Ericsson (2/2=1)

Nemzetközi bírált folyóiratcikkek (10,4)

[J1] D. Mazroa, Sz. Zsigmond, T. Cinkler, "Determining the Maximum Signal Power in 10 Gbit/s WDM Optical Networks", Photonic Network Communications Vol. 18 Issues 1, 2009, pp 77. (6/2=3)

[J2] . Teixeira · L. Costa · G. Franzl · S. Azodolmolky · I. Tomkos · K. Vlachos · S. Zsigmond · T. Cinkler · G. Tosi-Beleffi · P. Gravey · T. Loukina · J. A. Lázaro · C. Vazquez · J. Montalvo · E. Le Rouzicet "An integrated view on monitoring and compensation for dynamic optical networks: from management to physical layer", Photonic Network Communications Accepted 2008 waiting for publication (6/15=0,4)

[J3] Á. Szabó, Sz. Zsigmond, T. Cinkler, "Impact of Physical Effects onto the Optimal Signal Power in CWDM Optical Networks", Mediterranean Journal of Electronics and Communications (MEDJEC) under acceptance (6/2=3)

[J4] Á. Szabó, Sz. Zsigmond, "Determining the Optimal Signal Power Based on Physical Effects in CWDM Optical Networks", Híradástechnika, vol. LXIII., 2008/7, pp. 55-59, (4/2=2)

[J5] Sz. Zsigmond, M. Perényi, T. Cinkler, "OSNR Based Routing in WDM Optical Networks", Híradástechnika, vol. LXIII., 2008/7 pp. 47-54, (4/2=2)

Magyar nyelvű folyóiratcikkek:(6)

[J6] Sz. Zsigmond, B. Megyer, T. Cinkler, "Optikai virtuális magánhálózatok kialakítása a fizikai szint korlátainak figyelembevételével", Magyar Távközlés Jun. 2004 XV/2, (2/2=1)

[J7] Sz. Zsigmond "Polarizációs Módus Diszperzió és kompenzálási lehetőségei WDM hálózatokban ", Híradástechnika, vol. LXI., pp. 11-16, 2006 (2/1=2)

[J8] D. Mazroa, Sz. Zsigmond, "Maximális optikai jelszint meghatározása DWDM rendszerekben", Híradástechnika, vol. LXII., pp. 26-34, 2007 (2/2=1)

[J9] Á. Szabó, Sz. Zsigmond, "Optikai jelszint meghatározása CWDM optikai hálózatokban a fizikai hatások figyelembevételével", Híradástechnika, vol. LXIII., pp. 43-48, 2008 (2/2=1)

[J10] Sz. Zsigmond, M. Perényi, T. Cinkler, "Jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás WDM hálózatokban", Híradástechnika, vol. LXIII., pp. 35-42, 2008 (2/2=1)

Nemzetközi konferencián elhangzott meghívott előadás(2,5)

[C1] T. Cinkler, Sz. Zsigmond, M. Perényi, "Traffic Grooming and Power Level Tuning for Physical Impairment Constrained Routing", ICTON 2008 June 22-26 2008-Athens Greece (3/2=1,5)

[C2] T. Cinkler, Sz. Zsigmond, M. Perényi D. Gál, "Physical aspects of end-to-end optical routing", IWOOC 2008: 3rd International Workshop on OPS & OCDMA. Shanghai, Kína, 2008.10.23-2008.10.25. (3/3=1)

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások (12,1)

[C3] Sz. Zsigmond B. Megyer T. Cinkler "Design of Optical VPNs with Simulating Physical Limitations", Eunice Short Paper 2004 Tampere Finland, Session 2 - Lower Layer Issues (3/2=1,5)

[C4] Sz. Zsigmond B. Megyer, Sz. Ákos, T. Cinkler "Design of Traffic Grooming Optical VPNs Obeying Physical Limitations", The Second IEEE and IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks WOCN 2005 marc. 6-8 Dubai (3/3=1)

[C5] Sz. Zsigmond, A. Szodenyi, B. Megyer, T. Cinkler, A. Tzanakaki, I. Tomkos "A New Method for Considering Physical Impairments in Multilayer Routing", COST291/GBOU ONNA workshop on Design of Next Generation Optical Networks: from the physical up to the network level perspective Gent, Belgium, February 6, 2006 (3/5=0,6)

[C6] Sz. Zsigmond, G. Németh, T. Cinkler "Mutual Impact of Physical Impairments and Grooming in Multilayer Networks", ONDM 2007 Greece (3/2=1,5)

[C7] Sz. Zsigmond, M. Perényi, T. Cinkler "Cross-Layer Optimization of OSNR-Constrained RWA in WDM Optical Networks", COST 291 workshop on The role of optical networking in the future Internet Vilanova i la Geltrú, Catalonia, Spain, March 11, 2008 (3/2=1,5)

[C8] Sz. Zsigmond, M. Perényi, T. Cinkler "ILP formulation of Signal Power Based Routing for Single and Multilayer Optical Networks", BROADNETS 2008 September 8-11 2008 London (3/2=1,5)

[C9] Á. Szabó, Sz. Zsigmond, T. Cinkler "Optimal Signal Power Based on Physical Effects in CWDM Optical Networks", 6th CSNDSP - 23-25 July 2008, Graz University of Technology, Graz, Austria (3/2=1,5)

[C10] Sz. Zsigmond, H. Furukawa, N. Wada, T. Miyazaki "Modulation Formats Comparison in a Prototype 640Gbit/s/port Optical Packet Switching System" 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2009) No: WB3, 13-17 July 2009, Hong Kong (4/2=1)

[C11] Sz. Zsigmond, H. Furukawa, N. Wada, T. Miyazaki "Scalability Study of a Prototype 640Gbit/s/port Optical Packet Switch for Network Applications" 35th European Conference on Optical Communication (ECOC 2009) 20-24 September 2009, Wien Austria (4/2=1,5)

[C12] Sz. Zsigmond, H. Furukawa, N. Wada "Scalability Study of SOA Based Optical Switch for Optical Packet Networks" International Conference in Photonics in Switching (PS 2009) 15-19 September 2009, Pisa Italy (3/2=1,5)

[C13] H. Furukawa, Sz. Zsigmond, N. Wada "Network scalability of 640 Gbit/s/port Wide-colored Optical Packet Switch" 4th International Workshop on OPS and OCDMA (IWOOC 2009) 17-18 November 2009, Tokyo Japan (3/2=1,5)

Magyar nyelvű konferencia előadás (0,5)

[C14] Sz. Zsigmond "10 Gbit/s sebességű optikai átvitel fizikai korlátainak modellezése", 15. Távközlési és Informatikai Hálózatok Szeminárium és Kiállítás 2006. október 11-12-13. EGER (1/2=0,5)

Nem publikációértékű munkák

[T1] társszerző: "A DWDM gerinchálózatokban használható nagysebességű jelek alkalmazhatóságának elméleti és gyakorlati méréseken alapuló", Készült a PKI Távközlésfejlesztési Intézet megbízásából BME-TMIT által teljesítve, 2006.

[T2] társszerző: "Optikai crossconnect-ek (OXC) alkalmazása a transzportálózatokban", Készült a PKI Távközlésfejlesztési Intézet megbízásából BME-TMIT által teljesítve, 2005.

[T3] társszerző: "SFP és XFP modulok alkalmazásai feltételeinek vizsgálata számítógépes szimulációval", Készült a PKI Távközlésfejlesztési Intézet megbízásából BME-TMIT által teljesítve, 2007.