



TÁVKÖZLÉSI ÉS MÉDIAINFORMATIKAI TANSZÉK
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

VÉDELEM ÉS FORGALOMTERELÉS TÖBBRÉTEGŰ HÁLÓZATOKBAN

Ph.D. Tézisfüzet
Hegyi Péter

Témavezető:

Dr. Cinkler Tibor
Távközlési és Médiainformaticai Tanszék

1. Optikai hálózatok áttekintése

Életünk során különböző hálózatok állandó felhasználói vagyunk: minden nap használjuk az úthálózatot, a vasúthálózatot, akárcsak a számítógép és távközlő hálózatokat. A hálózat egyes elemei között az összeköttetések nem egyformák. Két nagyobb forgalmú csomópont között az összeköttetés gyorsabb, nagyobb kapacitású. Ma az optikai eszközökkel létrehozott távközlést tartjuk a legígéretesebbnek, mert segítségével érhető el a legnagyobb sávszélességű adatátvitel. Használata jelenleg gerinchálózatokban elterjedt.

Az optikai távközlés lényege, hogy az információt nem elektronikus jelek továbbítják, hanem fény, melynek átviteli közege alapvetően a fényszál. Egyetlen fényszál számos hullámhossz-csatorna átvitelére ad lehetőséget, amit a hullámhosszosztásos nyalábolás (Wavelength-Division Multiplexing , WDM) technológia tesz lehetővé [ML01].

Az optikai hálózatban lefoglalt útvonalakat fényutaknak (lightpath, λ -path) nevezük. Egy fényút forgalma az elektronikus rétegből érkezik, de a cél csomópont eléréséig az érintett optikai csomópontok számától függetlenül végig az optikai rétegben halad [CMLF00] [RBS+01]. A fényút végén az elektronikus rétegben lehetőség van a forgalmi igények végződtésére, illetve a forgalom egy következő fényúton való továbbítására. Ez lehet akár másik hullámhosszon is, mint a beérkező fényút. Modellemben nem feltételezek optikai hullámhossz-átalakítást, vagy időosztásos multiplexelést (TDM), mert az ezeket megvalósító eszközök még nem biztosítják azt a rugalmasságot, amire a dolgozatomban bemutatott módszerek épülnek. Az elektronikus réteg a fényutakat látszólagos összeköttetésként kezeli.

Egy optikai hálózatot tartalmazó hálózati architektúrában legalul helyezkedik el a WDM-et alkalmazó optikai réteg, melyre közvetlenül valamilyen elektronikus réteg épül (SDH, SONET, ATM, stb.) [Cin03]. A protokoll architektúrában ezek felett általában már az IP réteg található, mely a forgalmi igények forrásának tekinthető. Az elektronikus réteg a WDM rétegbeli fényutak által meghatározott virtuális topológiát használja forgalmi igényeinek elvezetésekor. A forgalmi igényeket több fényút összefűzésével vezethetjük el.

A valóságban előforduló forgalmi igények sávszélességei jellemzően sokkal kisebbek, mint egy hullámhossz-csatorna kapacitása. Ezért a gyakorlatban elterjedt a forgalomkötegelés (grooming) használata. Ez azt jelenti, hogy az elektronikus rétegben több igény forgalmát összefogjuk, és együtt engedjük be a választott fényútba [Cin03].

Az elektronikus réteg teljes mértékben kapcsolt, azaz egy jelzésrendszeren keresztül automatikusan konfigurálható, ezért képes az adott csomópontba azonos fényúton érkező forgalmi igények szétválogatására, majd igény szerinti újrakötegelésére.

A két egymásra épülő réteg viszonya különböző lehet az azokat üzemeltetők (pl.

üzleti) megfontolásai szerint. Társ modell (peer model) esetén a két réteg társként kezeli egymást, minden vezérléshez szükséges információ cseréje engedélyezett. Ezzel szemben az átfedő modell (Overlay model) a két réteget szervernek és kliensnek tekintti: szolgáltatásokat kérnek egymástól egy meghatározott interfész segítségével, de nem tudnak egymásról semmit. A két modell közti átmenetnek tekinthető a javított (augmented) modell. Amennyiben a két réteg egy szolgáltató tulajdona, lehetséges az is, hogy a két réteget egyszerre vezérelje egy közös vezérlősík (integrált modell, integrated model) [SC07].

Dolgozatomban a forgalomterelés (Traffic Engineering) kérdéseivel foglalkozom. A forgalomterelés olyan hálózati műveleteket jelent, melyek segítségével a hálózat megbízhatóan és hatékonyan működhet, az erőforrások optimális felhasználása mellett [VBA⁺04]. Ethernet hálózatokban az erőforrás általában hálózati kapacitást jelent, de optikai hálózatokban figyelni kell az optikai-elektronikai átalakítók helyes felhasználására is.

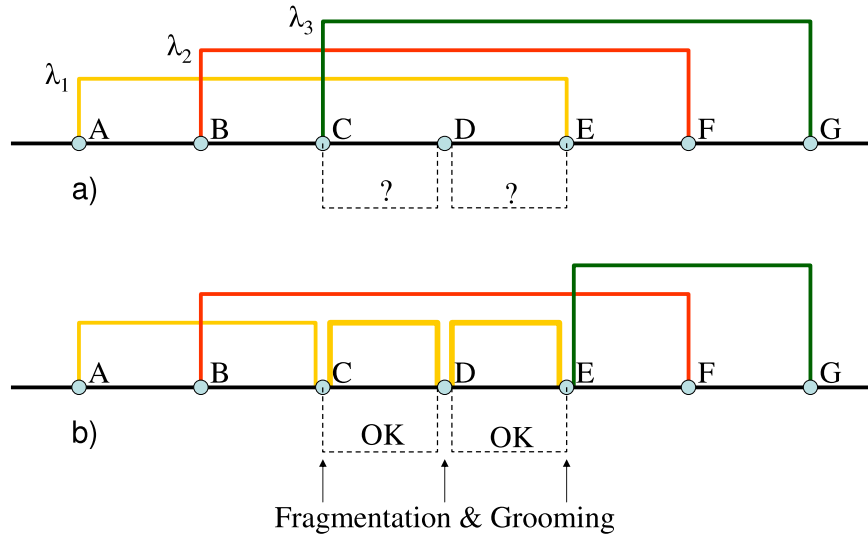
Az egységesített forgalomterelési megközelítés szélesíti az alkalmazhatóságot és rétegeken átívelő optimalizálást tesz lehetővé. Több réteg együttes kezeléséhez azonban megfelelő protokoll, illetve közös vezérlősík (Control Plane) szükséges [HAC⁺07]. A rétegek közti vezérlősík megvalósítására és a több réteg miatt szükségessé vált protokoll-bővítésre az MPLS protokoll kiegészítése tűnt megfelelőnek. Így született meg a Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) protokoll [BDL⁺01], melyet az IETF szabványosított.

A forgalmi igények elvezetésének két alapvetően különböző megközelítése található az irodalomban. Statikus megközelítés esetén a forgalom jellege az egyes hálózati csomópontok között előre ismert. Dinamikus megközelítés esetén az igényekről előre semmit nem tudunk. A feladat ilyenkor az, hogy az éppen érvényes hálózati állapot ismeretében, adott szempontból a lehető legjobban helyezzük el az érkező forgalmi igényt [Hua08].

A forgalom kötegelési probléma WDM hálózatokban általában a következő (gyakran összevont, illetve felcserélt) lépésekből, illetve részfeladatokból áll [ZZM05]:

1. virtuális topológia megtervezése
2. fényutak útvonalának kijelölése
3. fényutak hullámhosszhoz rendelése
4. forgalmi igények elvezetése a fényutakon

A cél általában az, hogy a lehető legkevesebb optikai-elektronikai átalakítót foglalkoztassunk, illetve a legkevesebb hullámhossz felhasználásával vezessük el a forgalmat. Ilyen cél mellett azonban a fenti lépésekből több is önmagában NP teljes.



1. ábra. Fényutak tördelésének hatása: az utolsó igény is beengedhető

Dinamikus esetben a feladat megoldása on-line heurisztikákkal történik, melyeknél kiemelten fontos a fenti célokon túl a megoldás gyors megtalálása is [Hua08].

A legtöbb dinamikus módszer az optikai hálózat speciális, a célt elősegítő leképezésén, gráffal történő modellezésén alapszik. A gráfon futtatott legrövidebb utat kereső algoritmus egy lépésben meghatározza a forgalmi igény számára létrehozandó, illetve foglalandó fényutakat [ML01] [ZMZ03] [OZZ⁺03] [TBZ⁺08] [MT08] [CFZ96].

2. Motiváció

A hálózatban hamar létrejönnek a korai igények alapján bizonyos fényutak. Ez azt jelenti, hogy a kiinduló végpontnál beengedjük a forgalmat az optikai rétegbe, ami bár több csomóponton áthalad, elektronikus rétegbe újra csak a végpontnál kerül. Előfordulhat, hogy egy később érkező igényt már csak úgy tudunk elvezetni, hogy már létező fényutak forgalma mellé kötegeljük forgalmát [ZM02]. Bár nem kellett visszautasítanunk az érkező igényt, a hálózatot az esetlegesen létrejövő kerülőúttal a szükségesnél jobban megterheljük.

Tekintsük a 1/a ábrán látható példát.

A feltételezett hálózat hét csomópontból áll, melyek 3-3 hullámhosszt képesek

kezelni. Tegyük fel, hogy a hálózatban az ábrán látható módon három olyan igény aktív, melyek útvonalai közös fényszálakat használnak: A–E, B–F és C–G. Ekkor a C–D és D–E fényszálak minden hullámhossza foglalt, így egy újonnan érkező C–D, vagy D–E igényt már nem tudunk elvezetni. Egy C–E igény elvezethető lenne, de csak a C–B–A–E útvonalon, ami kerülő, ezért feleslegesen igényli jelentős mennyiségű erőforrás foglalását.

Az ilyen, nem ritkán felmerülő problémán segít, ha engedélyezzük a már létező fényutak felszakítását. Jelen esetben ha az A–E fényutat felszakítjuk a C, illetve a D csomópontban (lásd 1/b ábra), akkor egyrészt a C–D és D–E igények is elvezethetővé válnak, másrészt gazdaságosabban használhatjuk ki a lefoglalt hullámhosszakat: az eredeti C–G fényút forgalma egy szakaszon közösen szállítható az eredeti A–E fényút forgalmával.

A legújabb optikai eszközök segítségével a fent bemutatott fényút-vágáshoz hasonló technikák már elvégezhetőek (pl. [CZY⁺06]). Az ilyen csomópontokat fényutak tördelésére képes csomópontoknak nevezzük (Optical Grooming with lightpath Tailoring capability, OGT). Ahogy a fényutak felépítése és lebontása egyre gyorsabbá válik, úgy válik egyre könnyebben kivitelezhetővé egy létező fényút lebontása és két másikkal való helyettesítése.

Fényutak tördelésével csökken a szükséges kapacitás és a blokkolási arány is. Az irodalomban mégsem találtam olyan forrást, mely a hálózat rugalmasságának ilyen felhasználását alaposan körbejárta volna, a felmerülő kérdések megválaszolásával együtt. Dolgozatommal ezt a hiányt szeretném pótolni.

A vágás helyén a fényút eredeti forgalma felkerül az elektronikus rétegbe. Itt más forgalmakkal kötegelhetjük a szállított forgalmat, és úgy engedjük vissza az optikai rétegbe.

Fontos megválaszolandó kérdés az alkalmazott fényút-vágások optimális száma, mert miközben a régi fényutat elengedjük és az újakat beállítjuk, a forgalom állhat akár néhány másodpercig is. Ezzel késleltetést, esetleg forgalomkiesést is okozhatunk. Törekedni kell tehát a vágások minimális szinten tartására.

A másik véglet, ha csak egy ugrás hosszú fényutakat alkalmazunk (átlátszatlan (opaque) hálózat [RFD⁺99]), ezáltal egyáltalán nem lesz szükség fényutak darabolására. Az optikai-elektronikai átalakítás azonban időt vesz igénybe [YL07], ami megint csak késleltetéshez vezet, ráadásul feleslegesen terheli az elektronikus réteget [MT08]. Azt sem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy az optikai csomópontok legdrágább alkatrészei az optikai-elektronikai átalakítók. Olyan eljárások használata szükséges, melyek a lehető legkevesebbet igényelnek belőlük [ML01][BBC07][PHS⁺06][RN07].

Amennyiben a fényutak tördelését átgondolatlanul alkalmazzuk, a megnövekedett optikai-elektronikai átalakító igény miatt vissza kell utasítanunk forgalmi igényeket. Dolgozatomban ezért külön foglalkozom a helyes üzemeltetés kérdéseivel.

Munkám során létrehoztam egy olyan csomóponti modellt, ami a korszerű, fényutat tördelni képes optikai útválasztónak megfelel. Különböző optimalizálandó célok mellett vizsgáltam ennek teljesítményét szimulált működési környezetben, valamint megmutattam a különbséget az új és a régi modell között.

Minőségi szolgáltatás ma már elképzelhetetlen a forgalom védelme nélkül. Igen elterjedt a megosztott védelem használata. Az optikai eszközök rugalmassága lehetővé teszi, hogy a védelmi útvonalakat a meghibásodás pillanatában állítsuk fel. Ezáltal lehetővé válik az optikai be-, illetve kilépő portok, valamint az optikai-elektronikai átalakítók megosztása is. A védelem erőforrás igénye ezáltal jelentősen csökkenthető. Így egyrészt jóval alacsonyabb költség mellett lehetséges ugyanazon védettség fenntartása, másrészt jóval kevesebb igényt kell visszautasítani erőforrások hiánya miatt. A megosztás kiterjesztésének látványos előnyei ellenére az irodalomban nem találkoztam hasonló megközelítéssel. Dolgozatomban ennek a még körüljáratlan területnek kérdéseit is szeretném megválaszolni.

3. Alkalmazott módszerek

3.1. Hullámhossz-gráfok

Ahogy az 1. fejezetben már szó volt róla, a legtöbb dinamikus körülményekre alkotott módszer az optikai hálózat speciális, a célt elősegítő leképezésén, modellezésén alapszik. Munkámhoz magam is egy ilyen modellt, a hullámhossz-gráfot vettem alapul (wavelength graph) [CCJ98] [CMLF00] [GMCT03].

A hálózatban társ, vagy integrált modell szerinti rétegek közti viszonyt feltételezek, ami azt jelenti, hogy a két réteg számára a másiktól minden információ rendelkezésre áll.

A felhasznált gráf-modell tehát egyaránt leképezi a hálózat fizikai topológiáját és az egyes hálózatelemekben lefoglalható erőforrásokat is. Fontos továbbá, hogy a modell információt hordozzon a hálózati csomópontok aktuális állapotáról, beállításairól.

Egy hálózat hullámhossz-gráf modelljét a valós hálózati topológiából, a hálózati csomópontok típusából és aktuális állapotából származtatjuk. A hálózati összeköttetéseket a kezelt hullámhosszak számának megfelelő gráf-élel modellezzük. A csomópontokat típusuknak megfelelő részgráf reprezentálja a hullámhossz-gráfban.

A hullámhossz-gráfok legnagyobb előnye, hogy elegendő információt tartalmaznak a hálózatról ahhoz, hogy bármely legrövidebb utat kereső algoritmus kivitelezhető útvonalat találjon bennük. Amennyiben megfelelően súlyozzuk a különböző szerepű éleket, a legkisebb súlyú útvonal meg fog felelni egyéb, vele szemben támasztott elvárásoknak is: például a lehető legrövidebb lesz, vagy a lehető legkevesebb számú fényútból áll össze.

3.2. Forgalmi modell és szimuláció

Dinamikus hálózati modell esetén az érkező igények előzetes ismerete nélkül kell a lehető legjobb megoldásra törekedni. Nem alkalmazhatók például olyan módszerek, melyek a forgalom jellegének ismeretében hosszú számítások segítségével keresik az optimális megoldást. Eredményeim alátámasztására ezért elsősorban szimulációs eszközöket használtam.

A generált forgalom az irodalomban megszokott módon Poisson folyamatnak megfelelően keletkező, egymás után elvezetendő igényekből állt [TBZ⁺08] [RFD⁺99]. Modellemben a forgalmi igény egy állandó sáv szélességű csatornát, áramkör kapcsolatot jelent, melyet igénylője megadott forrás és cél között egy általa definiált időtartamon keresztül szeretne fenntartani. Sáv szélességük megadott tartományban egyenletes eloszlású, tartási idejük exponenciális eloszlást követ. A hálózat különböző csomópontpárjai között egyenlő valószínűséggel jelentkeznek a forgalmi igények.

A szimuláció során a hálózat periodikusan torlódik, illetve ürül. Ahogy telítődik, egyre több igényt kell visszautasítani, mikor azonban a torlódásban „résztvevő” igények elévülnek, az erőforrások felszabadulnak a hálózatban, a blokkolási arány esik. Ezért a szimulációkat elég hosszan futtattam ahhoz, hogy az eredményül kapott értékek jól reprezentálják a vizsgált paramétert. Továbbá az adódó értékeken túl szerepeltettem az ingadozás által meghatározott tartomány középső 95%-át is.

Ha egy igényt sikerült elvezetni a hullámhossz-gráfon, illetve ha egy-egy igény elévül, akkor a szükséges erőforrásokat le kell foglalni az igény számára, illetve az igény által használt erőforrásokat el kell engedni. Ez egyrészt a hullámhossz-gráf módosítását jelenti a létrejövő, illetve megszűnő fényutaknak megfelelően, másrészt a kapcsolódó adatszerkezetek (szabad kapacitás, szabad átalakítók, forgalmi igény útvonala) karbantartását.

4. Forgalomterelés fényutak tördelésével

1. TÉZIS: *Fényutak tördelésére képes csomóponti modell*

[J1] [J2] [C1] [C2] [C3] [C4] [C5] [C6] [C7] [C8] [C9] [C12]

Több rétegű GMPLS hálózatokban dinamikus gráf-modellt javasoltam a fényutakat tördelni képes optikai csomópont (OGT) modellezésére. A csomóponton áthaladó igények elvezetésére algoritmust és választható szempont szerint optimális útvonalat eredményező súlyfüggvényeket adtam. Szimulációs módszerrel rámutattam a csomópont alkalmazásának előnyeire.

Ahogy a 3.1 fejezetben már szó volt róla, a valós hálózat hullámhossz-gráf modellje függ a hálózati csomópontok típusától. A hálózati csomópontokat funkciójukat, képességeiket helyesen modellező részgráfokkal jelenítjük meg a hullámhossz-gráfban.

A cél az, hogy az igények elvezetésekor alkalmazott legrövidebb utat kereső algoritmus ne találhasson kivitelezhetetlen működést igénylő útvonalat a csomóponton belül, a kivitelezhető működést jelentő útvonalak közül pedig azt adja vissza, amelyik a súlyfüggvénnyel leírt elvárásoknak megfelel.

Az OGT csomópont esetében az elektronikus réteg lehetővé teszi a beérkező fényutak igényeinek szétválogatását, azok végződését, illetve más, a csomópontból induló fényutakba történő újrakötegelését. Szintén az elektronikus réteget tekintjük a forgalmi igények forrásának.

A belépő jelek nem ágazhatnak el, tehát az azonos porton, azonos hullámhosszon érkező jelek csak egy irányban haladhatnak tovább. Ez az irány az elektronikus réteg, vagy egy azonos hullámhosszú kimenő-port lehet.

Biztosítani kell, hogy a legrövidebb utat kereső algoritmus olyan útvonalat is találhasson, mely a már elvezetett, optikai rétegen áthaladó fényutak felszakítását eredményezheti.

Ez utóbbi követelmény miatt a csomópont állapota folyamatosan változik az éppen beállított fényutak függvényében.

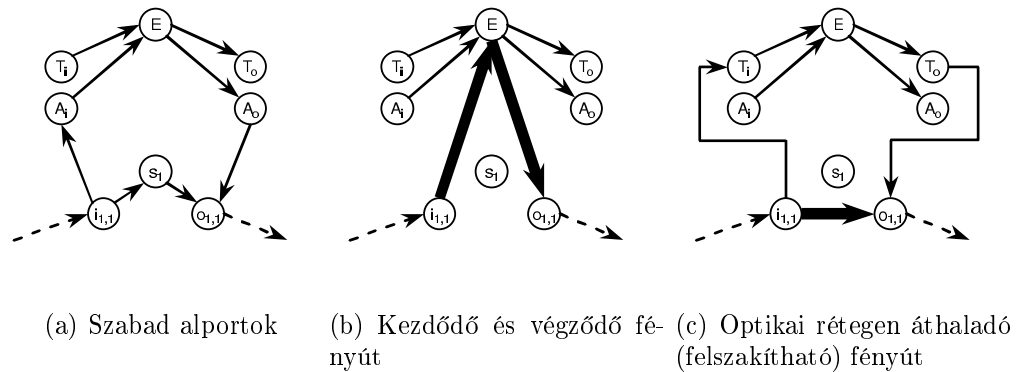
1.1. TÉZIS: *Dinamikus gráf-modell [J1] [J2] [C1] [C3] [C5]*

Forgalmi igények érkezésének, illetve megszűnésének függvényében változó gráf-modellt javasoltam OGT csomópontok modellezésére. A modell tartalmazza a csomópontot modellező gráf összes lehetséges pontját és élét, valamint egy szabályrendszert, mely megadja a csomópont érvényes állapotait. Az állapotátmenetek végrehajtására fényűtelvezető algoritmust adtam, mely a beérkező, illetve megszűnő igények függvényében éleket vesz el, illetve ad hozzá a gráfhoz, valamint a kapcsolódó adatszerkezetet karbantartja.

A gráf-modellben egy-egy gráfpontot feleltetnek meg minden be-, illetve kimenő port minden egyes hullámhosszának. Ezekre a továbbiakban alport néven hivatkozom. Az alportok a továbbított fényutak irányai szerint különböző állapotokban lehetnek. Ezeket a 2. ábra foglalja össze.

Ahhoz, hogy az OGT csomópontot reprezentáló részgráf mindig helyesen tükrözze az alportokon áthaladó fényutakat, szükségünk van egy algoritmusra, mely a megfelelő állapotátmeneteket hajtja végre a gráfon. Követelmény az algoritmussal szemben, hogy felismerje a választott alportok állapotát, és abból kiindulva a forgalmi igény számára a csomóponton belül választott útvonal szerint szükség esetén módosítsa a csomópontot reprezentáló részgráfot és ezen keresztül a modellezett fényút-készletet. Nem szükséges a gráf módosítása, ha a forgalmi igény elvezethető már létező fényutakon, azok meglévő forgalma mellé kötegelve az új igény forgalmát. Szükséges azonban a megfelelő kapcsolódó adatszerkezetek (szabad kapacitás, szabad átalakítók száma, stb.) módosítása. Az algoritmus az értekezés 3.1.3 fejezetében olvasható.

A forgalmi igények számára legrövidebb utat kereső algoritmussal meghatározunk a hullámhossz-gráfban egy útvonalat. A hullámhossz-gráf fent megadott felépítésével



2. ábra. A csomópont különböző állapotai

és szerkesztésével mindig egyértelmű, hogy az adott útvonal mely fényutakon halad át, hol szükséges új fényutat létrehozni, illetve már létezőt felszakítani.

Az útválasztás összetett feladat. A lehetséges útvonalakat több szempont szerint rangsorolhatjuk: például igénybevett fényutak száma alapján, vagy az érintett optikai csomópontok száma alapján. A csomópontok részgráfjaiban a különböző élek jól megfeleltethetők a vizsgálandó szempontoknak, hiszen külön él jelzi például a fényutak végét vagy a felszakítást. A különböző szempontokért felelős élek megfelelő súlyozásával elérhető, hogy a legrövidebb utat kereső algoritmus olyan útvonalat adjon a forgalmi igény számára, mely megadott szempont szerint optimális. Súlyfüggvények használatával a csomóponti modell piaci igényekhez igazítható.

1.2. TÉZIS: *Súlyozás [C5] [C9] [C12]*

Az OGT csomópont gráf modelljét (1.1 altézis) három súlyfüggvénnyel egészítettem ki:

- *legkisebb ugrásszámú útvonalat adó súlyfüggvény*
- *legkevesebb felszakítással járó útvonalat adó súlyfüggvény*
- *elektronikus réteget legkevesebb alkalommal érintő útvonalat adó súlyfüggvény*

Bármely legrövidebb utat kereső algoritmus a fenti szempontok akármelyikét kiválasztva optimális utat talál.

Az 1. táblázatban a COST266 referenciahálózaton 10Gbps kapacitású összeköttetések feltételezve, 0%-os blokkolási arány mellett, 2900 Mbit/s középértékű igények elvezetésekor keletkezett utak adatainak átlagát és konfidencia-intervallumát látjuk. Az eredmények hasonlóak más topológiára és forgalomra is. Az úthosszakat a legrövidebb utakhoz viszonyítva adtam meg, míg a szakítások számát 100 igényre vetítve.

Súlyozás	Úthossz	Fényutak	Átalakítók	Szakítások
legrövidebb út	108.377%	3.599	409	8
	101.35%–115.94%	3.32–3.87	154–664	1–15
minimális elektronikus réteg	129.945%	1.42	255	49
	118.88%–141.00%	1.30–1.53	104–406	36–62
legkevesebb szakítás	131.293%	3.088	405	0.004
	116.96%–145.89%	2.16–4.01	156–654	0–1

1. táblázat. Különböző súlyozások hatása az útvonalakra

A fényutak felszakításának előnyéről már volt szó a 2. fejezetben: segítségével a forgalmi igények nem kényszerülnek kerülőutakra. Rövidülnek az útvonalak, csökken a hálózat terheltsége, ezáltal nő az elvezethető igények száma. Nem feledkezhetünk meg azonban a felszakítás hátrányáról sem. Ez abból fakad, hogy a fényút felszakításának kivitelezése alatt a forgalom áll. Ezért elengedhetetlen az új modell létjogosultságának vizsgálata.

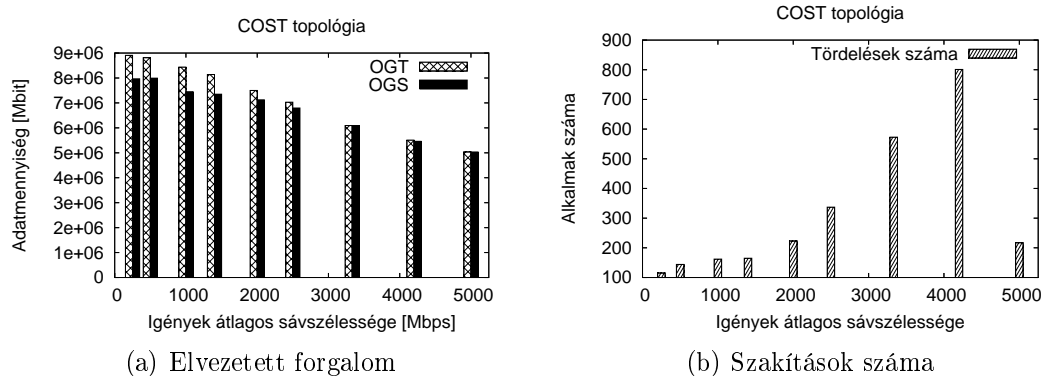
1.3. TÉZIS: *Megtérülés [J1] [J2] [C3] [C4] [C5]*

Szimuláción alapuló módszert javasoltam, mely fényutak vágásainak költségére, illetve az elvezetett forgalomból adódó bevételre alapozva megadja, hogy adott topológián, adott forgalmi jellemzők mellett érdemes-e átállni a fényutak tördelésére képes csomópontra.

A 3. ábrán az előzőekben már ismertetett COST266 hálózaton futtatott szimuláció eredményei láthatók. Különböző átlagos sáv szélességű forgalmakhoz, a szakítások számát minimalizáló súlyfüggvényt feltételezve, szimulációval meghatároztam azt az átlagos tartási időt, amivel a hálózatba érkező igények 1%-a kerül visszautasításra.

A 3/a ábra megmutatja, hogy különböző átlagos sáv szélességű forgalom esetén a fényutak tördelésére képes (OGT) csomópont használatával mennyivel nagyobb forgalmat képes továbbítani a hálózat, mint a fényutak tördelésére nem képes (Optical Grooming Simple - OGS) csomópont használatával. Ahogy az igények átlagos sáv szélessége a csatorna kapacitásához viszonyítva nő, úgy egyre kevesebb igény kötegelhető, ezért a két modell közti különbség fokozatosan eltűnik.

A 3/b ábrán azt látjuk, hogy a szimuláció során hányszor volt szükség a fényutak felszakítására a különböző forgalmak esetén. Kis átlagos sáv szélességű igények esetén a kötegelés mértéke nagy, sok forgalmi igény fér a fényutakba, ezért a hálózat töredezett, nem szükséges sok szakítás. Ahogy nő az igények mérete, úgy fér egy fényútba egyre kevesebb belőlük. Ezek jobban csoportosíthatóak, kevesebb elágazást igényelnek, hosszabb fényutak jöhetnek létre, a szakítások száma ezáltal nő. Mikor az igények átlagos sáv szélessége nagyobb, mint a hullámhosszcsatorna kapacitásának



3. ábra. Forgalmi szint és szakítások száma 1% blokkolás mellett

(10Gbps) fele, akkor olyan kevés igényt lehet egy fényútba kötegelni, hogy a felszakítások száma nagyon kevés. Ezért olyan alacsony az utolsó oszlop.

Egy a fényutak tördelésére képes csomópontokból létrehozott, adaptív optikai réteg alkalmazása feltételezi az integrált, vagy a társ modell használatát. Az adaptivitás ára azonban a fényútkészlet állandó módosításából eredő késleltetés.

Átfedő, vagy statikus modell esetén rögzített fényút készleten dolgozunk. Ennek ára azonban az, hogy a hálózatban több erőforrás foglalása szükséges, illetve a forgalom folyamatos változásából adódó forgalomvesztés nagyobb.

A technológia lehetővé teszi, hogy a két véglet között közeputat találjunk.

1.4. TÉZIS: Rétegek közti viszony [C2] [C6] [C7] [C8]

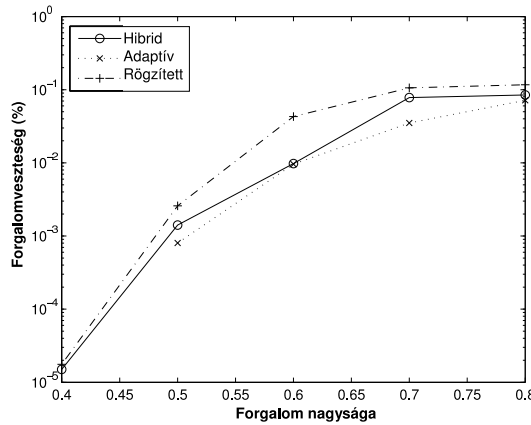
Többretegű hálózatok rétegei közti viszonyt újszerűen meghatározó hibrid üzemeltetési stratégiát javasoltam, mely egyesíti az átfedő és az integrált rétegek közti viszony modellek előnyeit és csökkenti azok hátrányait. Az integrált modell átfedő viszonyt alkalmazva működik ameddig lehetséges, ha azonban ez forgalomvesztést jelentene, integrált viszonyra vált át.

A 4. és az 5. ábrákon a forgalomvesztést, illetve a fényútkészlet módosításainak számát látjuk egy 8 hullámhosszú hálózaton a különböző megközelítések esetén.

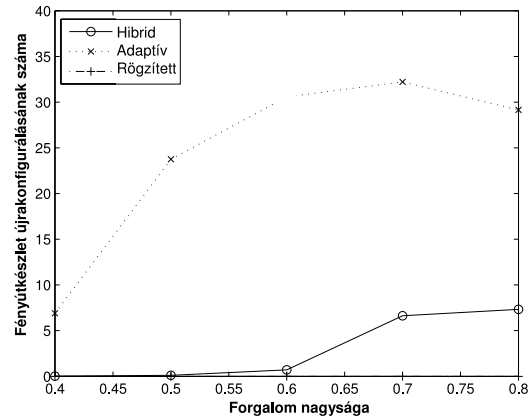
5. Megosztott védelem optikai hálózatban

2. TÉZIS: Optikai erőforrások megosztása [C10] [C11]

Javasoltam a megosztott védelem koncepciójának kiterjesztését optikai-elektronikai átalakítók, valamint az optikai be- és kilépő portok megosztására. Az OGT csomópont esetén a költséghatékony megosztott védelem megvalósításához, valamint a védett igények elvezetéséhez módszereket, súlyfüggvényt és algoritmusokat javasoltam.



4. ábra. Forgalomvesztés 8 hullámhossz mellett a 3 különböző megközelítés esetén



5. ábra. A fényút-készlet módosításának száma 8 hullámhossz mellett a 3 különböző megközelítés esetén

Egy hálózatban az összeköttetések megszakadhatnak, a hálózati csomópontok meghibásodhatnak. Ahhoz, hogy a szolgáltató megbízható, hibatűrő szolgáltatást nyújthasson, védelemre van szüksége. Érkekezésben forgalmi igények megosztott útvonal-védelmével foglalkozom. Ez azt jelenti, hogy nem az egyes fényutakat védem, hanem az igény teljes útvonalát. A védelmi útvonal tehát, hasonlóan az üzemihez, áthaladhat létező fényutakon, felszakíthatja azokat, de igényelhet újat is. A védelmi útvonalak számára szükséges erőforrások megoszthatók olyan igények között, melyek üzemi útvonalukban nem használnak közös erőforrást.

A legkézenfekvőbb megosztható erőforrás az összeköttetéseken foglalandó kapacitás. Optikai hálózatokban azonban megoszthatók védelmi szempontból az optikai be-, illetve kimenő portok, valamint az optikai csomópontok legdrágább alkatrészei, az optikai-elektronikai átalakítók is.

Az alportok megosztása azt jelenti, hogy a rajtuk áthaladó védelmi útvonalak különböző csomóponton belüli irányokban haladhatnak tovább a belépő alportokból, illetve különböző csomóponton belüli irányokból érkehetnek a kilépő alportokba. Ez úgy valósítható meg, hogy a megosztott alportok kapcsolódási irányát csak akkor állítjuk be, amikor a hálózatban olyan erőforrás hibásodik meg, melynek védelmi útvonala áthalad az alporton. Így nem oszthatók meg olyan alportok, amelyeken forgalmi igények üzemi útvonala halad keresztül, mert ezek az alportok nem maradhatnak beállítatlanul.

Szükséges továbbá a védelmi útvonalak irányait úgy meghatározni, hogy a hálózatban bekövetkező egyetlen várt hiba esetén, annak helyétől függetlenül, alportonként legfeljebb egy irány váljon aktívvá.

Az üzemi útvonalakhoz hasonlóan optikai-elektronikai átalakító szükséges minden

egyes védelmi fényút kezdetéhez és végéhez is. A védelem számára azonban nem szükséges annyi átalakító, amennyi védelmi fényút az adott csomópontban kezdődik, illetve végződik. A legtöbbször egy hiba bekövetkeztekor a csomópontban kezdődő, illetve végződő védelmi fényutaknak csak egy része aktiválódik. Ezért a különböző hullámhosszakot kezelő átalakítókból elegendő csak annyit foglalnunk – hasonlóan a megosztott kapacitáshoz –, amennyi a különböző meghibásodások esetén legfeljebb szükséges. Ennek feltétele, hogy az alportokhoz hasonlóan, az átalakítókat is csak akkor irányítsuk, amikor a hiba bekövetkezik, és az aktiválandó védelmi fényutak ismertté váltak. Ez az optikai-elektronikai átalakítók megosztása.

2.1. TÉZIS: *Megosztás kiterjesztése [C10] [C11]*

Javasoltam az optikai-elektronikai átalakítók, valamint az optikai be- és kilépő portok megosztását OGT csomópontokban, és egyúttal módszert javasoltam a megoszthatóság eldöntésére. A javaslat lényege: 1) a kizárólag védelmi igényeket továbbító portokat szabadon kell hagyni a hiba bekövetkeztéig; 2) a megosztott védelem számára a védett hibák által meghatározott portbeállítások esetén szükséges optikai-elektronikai átalakítók számának maximumát kell lefoglalni.

A forgalmi igények védelmi útvonalára tehát más kényszerek érvényesek, mint az üzemi útvonalakra. Egy csak védelmi útvonalakban szereplő alport esetében megengedhető, hogy rajta eltérő irányú fényutak haladjanak keresztül. Ezért a forgalmi igényeket elvezető algoritmust módosítani kell. Nem elegendő a gráf állapotát figyelni, csak védelmi útvonalakban szereplő alportok esetében az áthaladó forgalmi igények üzemi erőforrásait is vizsgálni kell. Ha olyan igény védelmi útvonalának áthaladását tervezzük egy alporton keresztül, mely üzemi útvonalában ott védett igényekkel közös erőforrást használ, de védelmi útvonalai iránya különböző, akkor a védelmet szállító fényutakat fel kell szakítani, az igények forgalmát az elektronikus rétegen kell átvezetni a védelmi útvonal aktiválásakor.

2.2. TÉZIS: *Fényutakat elvezető algoritmus bővítése [C10] [C11]*

Az 1.1 altézisben javasolt igényelvezető algoritmust kiegészítettem a kizárólag védelmi igényeket továbbító, megosztott portok esetében teendő lépésekkel. A kiegészítés tekinthető a felszakítási szabályok általánosításának. Így az 1.1 altézisben bemutatott gráf-modellen a megosztott védelem alkalmazhatóvá válik.

Az altézishez az értekezésben bemutatott 4.2.1 és 4.2.3 algoritmus kapcsolódik.

Az algoritmusban szükség van az adott csomópontban védett, közös erőforrást használó forgalmi igények összegyűjtésére, hogy a közös erőforrás kiesésekor a fényutak ne aktiválódhassanak szabálytalanul, több irányban. Az érintett igények fényútjait felszakítjuk, forgalmuk aktiválás esetén áthalad a csomópont elektronikus rétegén. A közös üzemi erőforrással érintett igények csoportjának meghatározása azonban nem könnyű feladat. Tegyük fel, hogy a vizsgált alporton áthalad egy olyan igény védelmi útvonala, amelyik üzemi útvonalában megtalálható az 1-es erőforrás, és egy olyan

igény védelmi útvonala is, amelyik üzemi útvonala áthalad az 1-es és 2-es erőforrásokon. Ha egyiket felszakítjuk, fel kell szakítani a másikat is a közös 1-es erőforrás miatt, hiszen annak kiesése mind a két védelmi útvonalat aktiválja. Tegyük fel, hogy az újonnan érkezett igény üzemi útvonala használja a 2-es erőforrást. Ekkor mind a három forgalmi igény fényútját fel kell szakítanunk. Az ilyen, és ennél bonyolultabb esetek áttekintéséhez rekurzív algoritmus szükséges.

Egy-egy igény elévülése után lehetőség nyílik a megmaradt fényutak összekötésére. Erre azért van szükség, hogy a foglalt optikai-elektronikai átalakítók száma a lehető legalacsonyabb legyen. Védelem nélküli esetben elég volt megvizsgálni, hogy vannak-e olyan bejövő és kimenő alport-párok, melyek azonos hullámhosszhoz tartoznak, és a rajtuk végződő, illetve kezdődő fényutak ugyanazon forgalmi igényeket továbbítják. A többirányúság engedélyezésével azonban ez a lépés bonyolultabb.

2.3. TÉZIS: *Fényutak felszakítása és összefűzése [C10] [C11]*

Algoritmust javasoltam annak eldöntésére, hogy a megosztott védelemmel védett többretegű hálózatokban mely fényutakat kell felszakítani, illetve összefűzni az igények elvezetése, illetve megszűnése során. Az algoritmus működésének alapja az igények csoportosítása az optikai rétegben meghatározott irányaik szerint.

Az altézishez az értekezésben bemutatott 4.2.2 és 4.2.4 algoritmus kapcsolódik.

Megosztott védelem esetén a hálózat összeköttetésekének súlyozásakor abból indulunk ki, hogy az összeköttetéseken az igény védelméhez adott üzemi útvonal mellett mennyi többlet-kapacitást szükséges foglalni. Ilyen módon azt az útvonalat részesítjük előnyben, amelyiken az igény védelme a legkisebb ráfordítással megoldható. Ez a szemlélet általánosítható, és így alkalmazható nem csak a foglalandó kapacitás minimalizálására, hanem a szükséges optikai-elektronikai átalakítók számának minimalizálására is. Értelemszerűen akkor szükséges a legkevesebb átalakítót foglalni a védelem számára, ha a lehető legkevesebb útvonal halad át az elektronikus rétegen. Ezért az optikai-elektronikai átalakítás magasabb költségű. Az elektronikus rétegbe azonban nem csak akkor kerülhet az igények forgalma, ha érkezéskor arra vezetjük, hanem akkor is, ha más igények miatt egy-egy fényút felszakításra kerül. Ezért ahogy a védelem nélküli esetben, úgy most is kerülni kell a felszakításokat. Ez bonyolult kérdés olyan optikai portokban, melyeken csak védelmi útvonalak haladnak át, mert a gráf állapotából a felszakítás ténye nem feltétlenül derül ki, figyelembe kell venni az áthaladó igények üzemi erőforrásait is. Ha olyan alportban kerül sor felszakításra, amelyen csak védelmi útvonalak haladnak keresztül, akkor bár a felszakító (akár bemenő, akár kimenő) oldalon továbbra is egy átalakító szükséges, az ellentétes oldalon annyi, ahány irányba a felszakított útvonalak elágaznak. Ilyenkor tehát a felszakítások különböznek abban, hogy hány átalakító szükséges a végrehajtásukhoz. A védelmi útvonalakat olyan portokon célszerű vezetni, melyeken való áthaladás a legkevesebb irányba haladó védelmi fényutak felszakítását igényli.

Súlyozás	Védelmi				Hálózati terheltség
	Fényutak		Utak hossza	Átalakítók száma	
	hossza	száma igényenként			
kapacitás alapú	1.235 1.072–1.399	8.266 6.536–9.996	9.349 8.469–10.229	588 165–1010	8.05% 2.345–13.76%
csomóponti	1.662 1.447–1.877	4.464 4.003–4.925	7.192 6.942–7.442	113 74–152	8.885% 2.775–14.995%

2. táblázat. A portmegosztást előnyben részesítő súlyozás hatása

2.4. TÉZIS: *Súlyozás*

Súlyfüggvényt javasoltam a védelem számára foglalt optikai-elektronikai átalakítók számának minimalizálására. A függvény az általánosított felszakítási szabályok figyelembevételével a minimális felszakítással járó útvonalat részesíti előnyben.

A 2. táblázatban megtekinthetjük a különbséget két olyan szimuláció eredményei között, melyek közül az egyik futtatása során a 2.4 altézis súlyozását használtam, míg a másik esetben a megosztott védelem használatakor elterjedt, védelmi-kapacitást minimalizáló súlyfüggvényt. Látható, hogy a most bevezetett súlyozás alkalmazásakor az elektronikus réteg használata és a foglalt átalakítók száma alacsonyabb, a fényút-készlet kevésbé töredezett.

Útvonalvédelem során két egymástól független útvonalat kell kijelölni az igény számára. Az optikai hálózatot modellező hullámhossz-gráfban a függetlenség azonban speciális értelmet nyer. A különböző hullámhosszak a hullámhossz-gráfban külön élekként jelennek meg. Útvonalpár keresésekor előfordulhat, hogy a gráfban független útvonalpár ugyanazon a fizikai erőforráson halad keresztül, melynek meghibásodása így mindkét útvonalat érinti. Ezért a hullámhossz-gráfot közös kockázatú csoportokra (Shared Risk Group, SRG) kell osztani [RPS⁺00] [TR04] [RBS⁺01]. Ezek a gráf éleinek olyan csoportjai, melyek egy fizikai eszközt (összeköttetés, hálózati csomópont) modelleznek. Két út függetlensége a hullámhossz-gráfban azt jelenti, hogy nem haladnak át közös SRG-n. Az útválasztás során alkalmazott eljárásokat erre fel kell készíteni.

Suurballe algoritmusa [ST84] a megadott forrás és célcsoomópont között több élfüggetlen útvonalat ad meg. Az útvonalak keresése során azonban ugyanazt a súlyozást alkalmazza mindkét út keresésekor.

Ahhoz, hogy az üzemi és védelmi útvonalakat eltérő súlyozás alkalmazásával kereshessük, érdemes legrövidebb utat kereső algoritmust használni. Mivel azonban útkereséskor csak a keresett út optimalitását tartjuk szem előtt, nagyon könnyen előfordulhat, hogy a talált útvonalak keresztezik egymást.

Súlyozás	Védelmi				
	Fényutak		Utak	Átalakítók	Szakítások
	hossza	száma igényenként	hossza	száma	száma
azonos	3.078	3.246	7.158	261	149
	1.732–4.424	2.117–4.375	6.81–7.506	109–413	109–190
eltérő	1.997	3.743	7.252	151	34
	1.841–2.154	3.332–4.154	6.883–7.621	80–223	10–58

3. táblázat. Eltérő és azonos súlyozású útpár-keresés összehasonlítása

2.5. TÉZIS: *Útpár keresése [C10] [C11]*

Heurisztikát javasoltam üzemi és védelmi útvonalpár keresésére hullámhossz-gráfokban, mely az irodalomból ismert Dijkstra és Suurballe algoritmusokra épít. Dijkstra algoritmusának iteratív meghívásával különböző súlyozást lehet alkalmazni az üzemi és védelmi útvonalak elvezetése során. Az algoritmus azonban mohó, elképzelhető, hogy nem találja meg a hálózatban létező útpárt. Ilyen esetekre kiegészítettem Suurballe egy súlyozást alkalmazó algoritmusát, hogy az hullámhossz-gráfokon is alkalmazható legyen.

A módszert az értekezés 4.4.1 algoritmusá mutatja be. A lényege, hogy a második útvonalat az első útvonal elemeinek jelentősen megnövelt súlya mellett keresi. Ha a büntetett első útvonalnak és a második útvonalnak közös szakasza van, akkor az első útvonal kettévágja a topológiát, míg a második valószínűleg nem (ellenpélda mutatható). A második útvonal SRG-inek gráfból történő eltávolítása után talált út élfüggetlen lesz a másodikként meghatározott útvonaltól. Amennyiben az élek eltávolítása után nincs út a forrás és cél pontok között, a módszer Suurballe algoritmusával próbálkozik tovább, melynek futtatásához elő kell állítania egy a fizikai elemekből készített irányított gráfot. Az irányított gráfon talált útvonalak elemeinek megfelelő hullámhossz-gráf részleten Dijkstra algoritmusá jelöli ki a használandó hullámhosszakot, illetve csomóponti átmeneteket. Ha a talált útvonal nem kivitelezhető, a felelős hullámhossz-gráfbeli elemek ideiglenes eltávolítása után a módszer előlről kezdődik és ismétlődik addig, míg útvonalpár található a redukálódó gráfban.

A 3. táblázatban megtekinthető a különböző útválasztási eljárásokat alkalmazó szimulációk összehasonlítása. Ha eltérő módon súlyozzuk a védelmi és üzemi útvonalakat, akkor a védelmi utakat kevesebb alkalommal szakítjuk fel, és kevesebb optikai-elektronikai átalakítóra van szükségünk.

Az algoritmusok mindegyikében felhasználtam, hogy a csomóponton áthaladó összes igény üzemi útvonala ismert. Erre szükségünk is van, hiszen enélkül nem tudnánk megállapítani, hogy mely igények oszthatnak meg erőforrásokat és melyek nem.

Ahhoz azonban, hogy ez az információ minden csomópontban naprakészen rendelkezésre álljon, nagy mennyiségű információ terjesztésére van szükség. Ha az információ rendelkezésre is áll, alkalmanként olyan nagy mennyiségű lehet, hogy a számítások jelentősen lelassulnak. Nem ismeretlen ez a probléma az irodalomban sem. Egy Full Information Restoration (FIR) nevű hatékony algoritmust mutat be [LWKD02].

Az algoritmus összeköttetésenként két tömb folyamatos naprakészen tartásán alapul. A tömbökben a hálózat többi összeköttetéséhez rendelünk értékeket. Ez azonban hullámhossz-gráfokon nem lehetséges ilyen formában. Ennek oka, hogy a bemutatott algoritmus olyan gráfokra készült, ahol egy összeköttetést egy él modellez, a hullámhossz-gráfokon pedig egy összeköttetést élek csoportja (SRG) modellez. Ezért a meghibásodások sem éleket, hanem élek csoportját érintik. Ennek megfelelően kell a karbantartott adatszerkezetet módosítani.

2.6. TÉZIS: *Információ-terjesztés*

Az irodalomból ismert, megosztott védelemhez használt Full Information Routing (FIR) nevű információterjesztési módszer módosítását javasoltam annak érdekében, hogy az hullámhossz-gráfokban is felhasználható legyen. A módosítás alapja, hogy míg az eredeti algoritmus egyszeri élek meghibásodását feltételezi, többretegű hálózatokban élcsoportok együttes meghibásodására kell felkészülni.

6. Az eredmények alkalmazhatósága

Vezetékes kommunikációs hálózatok telepítési költségének mindig jelentős hányadát teszi ki a szakaszok kiépítése. Ezért fontos, hogy a már létező szakaszokat minél hatékonyabban kihasználjuk. A munkám során alkotott algoritmusok, eljárások, megközelítések mindegyikének célja a már megépített optikai hálózatok jobb kihasználása a fejlődő csomóponti technológiák lehetőségeinek alkalmazásával. Azáltal, hogy a fényutak tördelésével rövidebb utat kell megtennie az igényeknek, jelentősen csökken a feleslegesen foglalt kapacitás a hálózatban, ami nagyobb forgalom elvezetését teszi lehetővé. Dolgozatomban azt is megmutattam, hogyan érdemes üzemeltetni a hálózatot, ha más erőforrások (például az igen drága optikai-elektronikai átalakítók) jelentik a szűk keresztmetszetet, más takarékosági, vagy egyéb szempontokat kell figyelembe venni.

Az új modell alkalmazhatóságával, előnyeivel kapcsolatban számos vizsgálatot végeztem. Foglalkoztam a hálózat áteresztő-képességével különböző forgalmak és modellek esetén. Munkám során azonban azt is tapasztaltam, hogy az áteresztőképesség függ a hálózat topológiájától is. A vizsgált szempontok esetében nem az adódó sorrend változik, hanem az eredmények közötti különbségek nagysága. Határozottan hátráltatja például a kötegelés hatásfokát egy-egy a hálózatban található szűk keresztmetszet, olyan szakaszok, amik egyedül, vagy kevesen kötnek össze két, vagy több

nagyobb hálózatrészt. Nagy eséllyel találhatók a hálózatban szűk keresztmetszetek, ha a csomópontok fokszámai nem egyformák, hanem vannak nagy és kis fokszámú pontok is.

Kutatásaim során elemeztem az OGT modell dinamikus viselkedését is. A kapott eredmények azt mutatják, hogy az OGT modell esetében a sorrend-függésből eredő blokkolás-ingadozás jóval kisebb mértékű, mint a fényutakat tördelni nem képes modell (OGS) esetében. Ez az észrevétel különösen tervezéskor nagyon fontos, hiszen ha a legmagasabb elért blokkolás figyelembevételével méretezzük a forgalmat, akkor a nagyobb ingadozás miatt az OGS esetben csak kisebb forgalom átvitelét garantálhatjuk.

Az OGT csomópontokból álló hálózat sokkal gyorsabban reagál a forgalmi körülmények megváltozására, mint a fényutak tördelésére nem képes hálózat. Ez azt jelenti, hogy a forgalom-szint emelkedésekor kisebb túllövással és hamarabb állandósul a blokkolási arány [C5].

A fényút-készlet fagyasztásával, illetve felengedésével jól szimulálható az intézői sík (Management Plane, MP) segítségével, operátor által irányított hálózat rugalmatlansága. A fagyasztott állapot a rögzített fényút-készleten történő üzemeltetésnek, a felolvasztott állapot a ritka újrakonfigurálásoknak felel meg. Az így modellezett rugalmatlan rétegeközi viszony a várakozásoknak megfelelően igen rosszul reagál a forgalom szintjének növekedésére, de felolvasztáskor a blokkolás lecsökken a rugalmasan üzemeltetett hálózat blokkolásának szintjére. Rugalmatlan hálózatban hosszabb útvonalakat kapunk, hiszen az igények legtöbbször kerülő úton érhetik el céljukat [C7].

Az OGT modell pártatlanságának (fairness) vizsgálata során megállapítottam, hogy kevésbé különbözteti meg hátrányosan a nagyobb sávszélességű, illetve távolabbi végpontú igényeket, mint az OGS modell [C4].

Az OGT modellt alapul véve további kutatások indultak. Bővítették például a jel gyengülésének figyelembevételével, készült hozzá a hálózat terhelését figyelembevevő adaptív súlyozás [C9], illetve algoritmus, mely az alkalmazott optikai-elektronikai átalakítók számát minimalizálja OGS és OGT csomópontokat tartalmazó vegyes hálózaton [C12].

A szimulátor fejlesztése során számos részt többször újraírtam. A programozás során szerzett tapasztalataimat egy tervezési útmutatóban (design pattern) foglaltam össze.

Hivatkozások

Hivatkozott irodalom

- [BBC07] Jean-Claude Bermond, Laurent Braud, and David Coudert. Traffic grooming on the path. *Theoretical Computer Science*, 384(2-3):139–151, 2007.
- [BDL⁺01] A. Banerjee, L. Drake, L. Lang, B. Turner, D. Awduche, L. Berger, K. Kompella, and Y. Rekhter. Generalized multiprotocol label switching: An overview of signalling enhancements and recovery techniques. *IEEE Communications Magazine*, 39(7):144–151, July 2001.
- [CCJ98] T. Cinkler, R. Castro, and S. Johansson. Configuration and re-configuration of WDM networks. In *Proceedings of NOC'98, European Conference on Networks and Optical Communications, Manchester, UK*, June 1998.
- [CFZ96] I. Chlamtac, A. Faragó, and T. Zhang. Lightpath (wavelength) routing in large wdm networks. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 14(5):909 – 913, June 1996.
- [Cin03] T. Cinkler. Traffic and λ grooming. *IEEE Network*, 17(2):16–21, March/April 2003.
- [CMLF00] T. Cinkler, D. Marx, C.P. Larsen, and D. Fogaras. Heuristic algorithms for joint configuration of the optical and electronic layer in multi-hop wavelength routing networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv*, pages 1000–1009, March 2000.
- [CZY⁺06] Saradhi C.V., Luying Zhou, Chai Teck Yoong, Shao Xu, Veerayah K., Wang Yixin, and Lu Chao. iopen: integrated optical ethernet network for efficient dynamically reconfigurable service provisioning. In *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. OFC 2006*, March 5-10 2006.
- [GMCT03] Cs. Gáspár, G. Makács, T. Cinkler, and J. Tapolcai. Wavelength routing with grooming and protection. In *Proceedings of IFIP ONDM 2003, Optical Network Design and Modelling, Budapest, Hungary*, February 2003.
- [HAC⁺07] Antonis Hadjiantonis, Mohamed A. Ali, Haidar Chamas, William Bjorkman, Stuart Elby, Ahmad Khalil, Georgios Ellinas, and Nasir Ghani. Evolution to a converged layer 1, 2 in a global-scale, native ethernet over wdm-based optical networking architecture. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25:1048 – 1058, June 2007.
- [Hua08] Shu Huang. *Traffic Grooming for Optical Networks*, chapter Computational Complexity. Springer, 2008.

- [LWKD02] Guangzhi Li, Dongmei Wang, Charles Kalmanek, and Robert Doverspike. Efficient distributed path selection for shared restoration connections. *IEEE Infocom*, 1:140–149, 2002.
- [ML01] E. Modiano and P.J. Lin. Traffic grooming in WDM networks. *IEEE Communications Magazine*, 39(7):124–129, July 2001.
- [MT08] G. Mohan and E. Cheng Tien. QoS routing in GMPLS-capable integrated IP/WDM networks with router cost constraints. *Computer Communications*, 31(1):19 – 34, January 2008.
- [OZZ⁺03] Canhui Ou, Keyao Zhu, Hui Zang, Laxman H. Sahasrabudde, and Biswanath Mukherjee. Traffic grooming for survivable WDM networks – shared protection. *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, 21(9):1367–1382, November 2003.
- [PHS⁺06] M. Perényi, P. Hegyi, J. Szigeti, T. Cinkler, and Gy. Sallai. Joint grooming capability and wavelength number optimization. In *Proceedings of World Telecommunications Congress 2006, Budapest, Hungary*, May 1-3 2006.
- [RBS⁺01] Ramu Ramamurthy, Zbigniew Bogdanowicz, Shahrokh Samieian, Debanjan Saha, Bala Rajagopalan, Sudipta Sengupta, Sid Chaudhuri, and Krishna Bala. Capacity performance of dynamic provisioning in optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 19:40 – 48, January 2001.
- [RFD⁺99] B. Ramamurthy, H. Feng, D. Datta, J. P. Heritage, and B. Mukherjee. Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks. In *Technical Digest of Optical Fiber Communication (OFC '99), San Diego, CA*, Feb 1999.
- [RN07] Kuntal Roy and Mrinal K. Naskar. Genetic evolutionary algorithm for static traffic grooming to sonet over WDM optical networks. *Computer Communications*, 30(17):3392–3402, 2007.
- [RPS⁺00] B. Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. S. Ramamoorthy, and K. Bala. IP over optical networks: Architectural aspects. *IEEE Communications Magazine*, 38(9):94–102, September 2000.
- [SC07] J. Szigeti and T. Cinkler. Rule-based advertisement and maintenance of network state information in optical-bearred heterogeneous networks. In *Proceedings of IFIP ONDM 2007, Optical Network Design and Modelling, Athens, Greece*, pages 279–288, May 2007.
- [ST84] J. W. Suurballe and R. E. Tarjan. A quick method for finding shortest pair of disjoint paths. *Networks*, 14(2):325 – 336, 1984.

- [TBZ⁺08] Massimo Tornatore, Andrea Baruffaldi, Hongyue Zhu, Biswanath Mukherjee, and Achille Pattavine. Holding-time-aware dynamic traffic grooming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26:28 – 35, April 2008.
- [TR04] Ajay Todimala and Byrav Ramamurthy. Imsh: an iterative heuristic for srlg diverse routing in WDM mesh networks. In *Proceedings of 13th International Conference on Computer Communications and Networks, ICCCN 2004.*, pages 199 – 204, October 11-13 2004.
- [VBA⁺04] M. Vigoureux, B. Berde, L. Andersson, T. Cinkler, L. Levrau, D. Colle, J.F. Palacios, and M. Jager. Multi-layer traffic engineering for GMPLS-enabled networks. *IEEE Communications Magazine*, July 2004.
- [YL07] Hong-Hsu Yen and Steven S. W. Lee. QoS aware traffic grooming and integrated routing on IP over WDM networks. *Photonic Network Communications*, 14(1):1–10, 2007.
- [ZM02] K. Zhu and B. Mukherjee. Traffic grooming in an optical WDM mesh network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122 – 133, January 2002.
- [ZZM03] K. Zhu, H. Zhu, and B. Mukherjee. Traffic engineering in multigranularity heterogeneous optical WDM mesh networks through dynamic traffic grooming. *IEEE Network*, 17(2):8–15, March/April 2003.
- [ZZM05] Keyau Zhu, Hongyue Zhu, and Biswanath Mukherjee. *Traffic grooming in optical WDM mesh networks*. Springer, 2005.

Publikációim

Folyóiratokban megjelent cikkek

- [J1] G. Geleji, M. Asztalos, T. Cinkler, and P. Hegyi, „A hullámhossz-utak de-fragmentálódásának hatása forgalomkötegeléses WDM optikai hálózatokban,” *Híradástechnika*, vol. LXI, pp. 54–59, Feb. 2006.
- [J2] T. Cinkler and P. Hegyi, „Automated adaptive on-line multi-layer traffic engineering through „tailoring” wavelength-paths in the fragment graph,” *Optical Switching and Networking*, 2009.
- [J3] P. Hegyi, M. Maliosz, Á. Ladányi, and T. Cinkler, „Virtual private/overlay network design with traffic concentration and shared protection,” *Journal of Network and Systems Management*, vol. 13, pp. 119–138, Mar. 2005.

Konferenciákon megjelent cikkek

- [C1] J. Jimenez, O. Gonzalez, B. Puype, T. Cinkler, P. Hegyi, R. Munoz, R. Martinez, F. Galán, and R. Morro, „Multilayer traffic engineering experimental demonstrator in the nobel-ii project,” in *Proc., BroadBand Europe Conference*, Dec. 2007.
- [C2] A. Kern, I. Moldován, P. Hegyi, and T. Cinkler, „Ethernet over wdm: Optimization for resilience and scalability,” in *Proc., 6th Int. Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, (La Rochelle, France), Oct. 2007. accepted.
- [C3] T. Cinkler, G. Geleji, M. Asztalos, P. Hegyi, A. Kern, and J. Szigeti, „Lambda-path fragmentation and de-fragmentation through dynamic grooming,” in *Proc., 7th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON)*, vol. 2, pp. 1–4, July 2005.
- [C4] T. Cinkler, P. Hegyi, G. Geleji, and J. Szigeti, „Fairness issues of amlte: Adaptive multi-layer traffic engineering with grooming,” in *Proc., 9th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 63–66, July 2007.
- [C5] T. Cinkler, P. Hegyi, M. Asztalos, G. Geleji, A. Kern, and J. Szigeti, „Multi-layer traffic engineering through adaptive lambda-path fragmentation and de-fragmentation: The grooming-graph and shadow-capacities,” in *Proc., IFIP Networking Conference*, vol. 3976 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 715–726, May 2006.
- [C6] P. Hegyi, N. Sengezer, E. Karasan, and T. Cinkler, „Traffic engineering in case of interconnected and integrated layers,” in *Proc., 13th Int. Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*, Sept. 2008.
- [C7] T. Cinkler, P. Hegyi, G. Geleji, and J. Szigeti, „Multi-layer traffic engineering: Should only the upper-most layer be switched?,” in *Proc., 10th Conf. on Optical Network Design and Modelling (ONDM)*, no. b2, May 2006.
- [C8] T. Cinkler, P. Hegyi, G. Geleji, and J. Szigeti, „Configured vs switched underlying wavelength system for traffic engineering with grooming,” in *Proc., 15th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Nov. 2006.
- [C9] Á. Ladányi, T. Cinkler, P. Hegyi, and J. Szigeti, „Sd-mlte: State-dependent multi-layer traffic engineering,” in *Proc., 6th Workshop in G/MPLS Networks (WGN6)*, Apr. 2007.
- [C10] T. Cinkler, P. Hegyi, G. Geleji, and J. Szigeti, „Protection for adaptive multi-layer traffic engineering,” in *Proc., 6th Int. Workshop on Design and Reliable Communication Networks (DRCN)*, (La Rochelle, France), Oct. 2007.

- [C11] T. Cinkler, P. Hegyi, G. Geleji, J. Szigeti, and Á. Ladányi, „Adaptive multi-layer traffic engineering with shared risk group protection,” in *Proc., IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, May 2008.
- [C12] M. Perényi, P. Hegyi, J. Szigeti, T. Cinkler, and G. Sallai, „Joint grooming capability and wavelength number optimization with protection,” in *Proc., World Telecommunications Congress (WTC)*, (Budapest, Hungary), May 2006.

További publikációk

- [C13] P. Hegyi, M. Maliosz, Á. Ladányi, and T. Cinkler, „Heuristic algorithms for shared protection of virtual private networks,” in *Proc., 9th EUNICE Open European Summer School and IFIP Workshop on Next Generation Networks (EUNICE)*, Sept. 2003.
- [C14] P. Hegyi, M. Maliosz, Á. Ladányi, and T. Cinkler, „Shared protection of virtual private networks with heuristic methods,” in *Proc., Polish-Hungarian-Czech Workshop (PHC)*, (Prague, Czech Republic), Sept. 2003.
- [C15] P. Hegyi, M. Maliosz, Á. Ladányi, and T. Cinkler, „Shared protection of virtual private networks with traffic concentration,” in *Proc., 4th Int. Workshop on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, pp. 448–454, Oct. 2003.