



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Híradástechnikai Tanszék

Teljesítmény-modellezés és elemzés IP over WDM
hálózatokban
Performance modelling and analysis of IP over WDM networks

Ph.D. disszertáció téziszüzetete

Zsóka Zoltán

Konzulensek

Dr. Jereb László, Dr. Renato Lo Cigno

Budapest, 2006

1. Bevezetés

A napjainkban kialakuló információs társadalom egyik legjelentősebb kihívása a hatékony kommunikációs hálózatok kialakítása. A jelenlegi alkalmazásoknál fontos szerepe van a sokszor hatalmas mennyiségű adat gyors és biztonságos átvitelének. Az elosztott tudásbázist használó folyamatoknál elengedhetetlen a gyakran földrajzilag is távollévő felhasználók közti kommunikáció.

A kommunikációs hálózatok tervezésének és üzemeltetésének egyik elsődleges célja az erőforrások hatékony használata. Éppen ezért fontos a teljesítmény elemzése mindkét említett fázisban. Még jelentősebbé válik az elemzés szerepe, ha hálózat tartalmaz dinamikusan működő, vagyis a pillanatnyi állapotot és igényeket figyelembe vevő elemeket és döntési mechanizmusokat is. Az *általános elvezetési probléma* magában foglal az útvonalválasztás (routing) mellett olyan technológiától függő feladatokat is, mint például a hullámhossz-kiválasztás (RWA) és a forgalom-kötegelés (grooming), amelyek következtében a teljesítmény elemzése rendkívül összetett feladattá válik.

A vezetékes, fix, nem helyi kommunikációra is alkalmazható hálózati architektúrák közül napjainkban legígéretesebbnek az *IP over WDM* megoldások számítanak. Ezekben a hálózatokban egy TCP/IP alapú hálózat működik a statikus vagy dinamikusan hullámhosszosztásos optikai hálózat felett. Ezek elemzéséhez olyan modellt használhatunk melynek felépítése illeszkedik a [1]-ben bemutatott architektúrához. A többrétegű hálózat alsó rétegében akár nagyobb távolságokat áthidaló optikai kapcsolatok építhetők fel, melyekkel nagy kapacitású összeköttetést biztosíthatunk. A felső réteg a felhasználói alkalmazásoknak kínál erőforrásokat és hálózati funkciókat. Az alkalmazásokról feltehetjük, hogy különféle IP alapú átviteli protokollokat használnak. Általános hálózati modellünkben a két rétegre *optikai réteg* illetve *adatforgalmi réteg* néven hivatkozunk.

Az *optikai réteg* felfogható egy dinamikusan kapcsolható optikai gerinchálózatként, pl. ASON, mely optikai linkekből és OXC, OADM vagy ROADM eszközöket modellező, kapcsolási funkciójú csomópontokból épül fel. Egy optikai link akár több száz optikai szál is tartalmazhat, minden szál képes egyszerre több hullámhosszon adatot átvinni, így egy hullámhossz egy nagy kapacitású optikai csatornát valósít meg a linken. A nem szomszédos csomópontok összekötésére *fényutakat* (lightpath) hozhatunk létre, ha azonos kapacitású optikai csatornákat kapcsolunk össze folytonos utakba.

Az *adatforgalmi réteg* legfontosabb erőforrásai a csomópontokban lévő út-

vonásválasztók (router) és a sáv szélességükkel jellemezhető linkek, melyek garantált és best effort jellegű felhasználói forgalom átvitelére egyaránt alkalmasak. Egyes csomópontokban speciális kapcsolók, G-OXC eszközök találhatók, melyek összehangolják a rétegek működését és elvégzik a rétegek közti adatátvitelt. Ezek segítségével több kis sáv szélesség-igényű felhasználói forgalmat foghatunk össze a nagy sáv szélességű optikai csatornában, ami növeli a hálózat hatékonyságát. Ez a forgalom-kötegelés egyik legfontosabb előnye.

A rétegek közti logikai kapcsolatot az aktív *fényutak* és az *adatforgalmi réteg* pont-pont összeköttetéseknek, vagyis az IP linkeknek az egy-egy értelmű összerendelése teremti meg. Így a dinamikusan átconfigurálható WDM réteg az IP réteg topológiáját is dinamikusan változóvá teszi és ez utóbbi csak egyfajta virtuális topológiaként értelmezhető.

A többrétegű hálózati architektúra teljes elemzése igen bonyolult modellezési feladatokhoz vezet. A rétegek együttműködési szintjétől függően az *általános elvezetési probléma* elemzése több funkció együttes vizsgálatát igényli és így megnöveli a problémateret. Ugyanakkor a teljes architektúra modellezésekor az egyes funkciók hatása nehezen különíthető el a teljesítmény-elemzés során, hiszen ezek egyszerre működnek és egymásra is hatással vannak.

Ahhoz, hogy az egyes problémákat hatékonyabban vizsgálhassuk sokszor célszerű a hálózat vertikális dekompozíciója, mert így az egyes rétegeket elkülönítve is megfigyelhetjük. Ekkor az egymás felett elhelyezkedő rétegek útvonásválasztási funkcióit könnyebben elemezhetjük, hiszen követhető az algoritmusok beállításainak hatása a teljesítményre. A rétegek szétválasztása esetünkben két vizsgálandó hálózati környezetet eredményez: egy fix topológiájú WDM hálózatot az *optikai rétegből* és egy szintén fix topológiájú IP hálózatot az *adatforgalmi rétegből*. Mindkét problémáról sok publikáció született, melyek különböző megoldásokat elemeznek, például [2, 3, 4, 5, C3] illetve [6, 7, 8, J3, C6].

Ugyanakkor az olyan kérdések esetében, mint például a forgalom-kötegelés, amely éppen a rétegek együttműködési lehetőségeit feszegeti, elengedhetetlen az összetett vizsgálat. Ilyenkor az *optikai rétegben* fix topológiát, az *adatforgalmi rétegben* viszont időben változó topológiát tételezünk fel. Az utóbbi években több forgalom-kötegelő algoritmust mutattak be és hasonlítottak össze [9, 10, 11], de ezek szinte kivétel nélkül figyelmen kívül hagyják az Internet forgalom speciális jellemzőit.

2. Kutatási irányok

A fent körvonalazott problémákhoz kapcsolódóan kutatásaim három fő témára csoportosíthatók:

1. Az első cél olyan általános elméleti modell kidolgozása volt, mely hatékonyan használható az *optikai réteg* teljesítményének elemzésére. Ennek során egy módszert fejlesztettem ki, mellyel optikai csatorna igények blokkolási valószínűsége számítható dinamikus WDM hálózatokban. A megoldás más módszereknél rövidebb számítási idő alatt, kielégítő pontosságú eredményeket szolgáltat.
2. A második cél olyan hálózati modell kialakítása volt, mely lehetővé teszi az *adatforgalmi réteg* elvezetési algoritmusainak összehasonlítását. Ehhez az IP hálózat valósághű, de folyamalapú elemzését támogató forgalmi modelleket vezettem be, valamint az ezekkel kapott eredményeket és a levont következtetéseket figyelembe véve új adaptív algoritmusokat is fejlesztettem ki.
3. A harmadik cél a dinamikus forgalom-kötegelést alkalmazó hálózatok vizsgálata volt. Ennek során a rétegek együttműködését is támogató hálózati modellt használtunk az egyes megoldások teljesítményének elemzésére. Először dinamikusan érkező, garantált sávszélesség-igényű igényeket tételeztem fel az *adatforgalmi rétegben* majd elasztikus forgalmat vivő hálózatokat elemeztem.

3. Módszertan

A fenti problémák különbözősége eltérő eszközök alkalmazását teszi szükségessé. A továbbiakban röviden összefoglaljuk a szóbjövő és az alkalmazott módszereket.

Elméleti alapokon nyugvó modellek segítségével könnyebben követhető az általános értelemben vett útvonalválasztási algoritmusok működése és így a döntések hatása is jól elemezhető. A telekommunikációs hálózatok esetében szinte nyilvánvaló a sorbanállás-elmélet eszköztárának felhasználása, hiszen itt nagyszámú, függetlennek feltételezett forrástól dinamikusan érkező igények kiszolgálása történik. A sztochasztikus modellek és a valószínűségszámítás az egyes helyzetek

kiértékelésekor és a teljesítménnyel összefüggő statisztikák készítésekor egyaránt alkalmazható.

Az első kutatási területen, illetve a harmadik terület egy részén kombinatorikai, valószínűségi számítási és sorbanállás-elméleti eredményekre alapozott elméleti modelleket alkalmaztam.

A teoretikus megközelítés ugyanakkor nem minden rendszer vizsgálatára használható. Ennek oka lehet, hogy gyakran lassú, nem elég pontos vagy a kellő pontossághoz túl bonyolult modellt kellene felépíteni. További probléma, hogy a modellek kiterjesztése más problémák vizsgálatára általában nem egyszerű. Alternatívaként alkalmazhatjuk a szimuláció módszerét, amelynél általában az új algoritmusok implementálása sem jelent nagy problémát. Bár a futási idők ebben az esetben is lehetnek nagyok, a mechanizmusok és hatásaik ekkor közvetlenül megfigyelhetők és szabályozhatók.

A szimuláció az elméleti módszerekkel kapott eredmények pontosságának értékelésére is alkalmas. Az értekezés első kutatási területén a szimulációt ebben az értelemben, a kidolgozott elméleti modellek ellenőrzésére használtam. A második és a harmadik kutatási területen az ismert és munkám során kidolgozott megoldásokat egy alkalmas szimulációs eszközben implementáltam és a megoldásokat szimuláció segítségével értékeltem.

4. Új eredmények

4.1. Az optikai réteg vizsgálata

A dinamikusan érkező optikai csatornakéréseket kiszolgáló, dinamikusan konfigurálható WDM hálózat teljesítményét hasonló szempontokból elemezhetjük, mint a hagyományos áramkörkapcsolt hálózatokét. A két hálózat modellezésében azonban jelentős különbségek is vannak. Egyrészt az optikai technológia esetén az útvonalválasztásra jelentősen kihat a csomóponti eszközök esetenként korlátozott hullámhossz-konverziós képessége. Másrészt az igények érkezési folyamatát nem modellezhetjük a PSTN hálózatoknál megszokott Poisson folyamattal, hiszen az optikai csatornák több felhasználó együttes forgalmát szállítják [12].

Az ilyen hálózatok vizsgálatára az elmúlt években több elméleti modellt is javasoltak, például [13, 14, 15]. Szinte valamennyi az irodalomban fellelhető modell csak a Poisson folyamat szerint érkező igényeket képes kezelni és nem támogatják az ún. többszálás (multifiber) hálózatokat sem, melyekben egy optikai

link több párhuzamos optikai szálát is tartalmazhat. Az utóbbi opciót tartalmazza a [4]-ben bemutatott MLLC modell, de ennek a megoldásnak is vannak hátrányai.

I. TÉZISCSOPORT([C3, C5]) *Dinamikus WDM hálózatok teljesítményének kiértékelésére alkalmas elméleti modellt dolgoztam ki és megvizsgáltam komplexitását és pontosságát.*

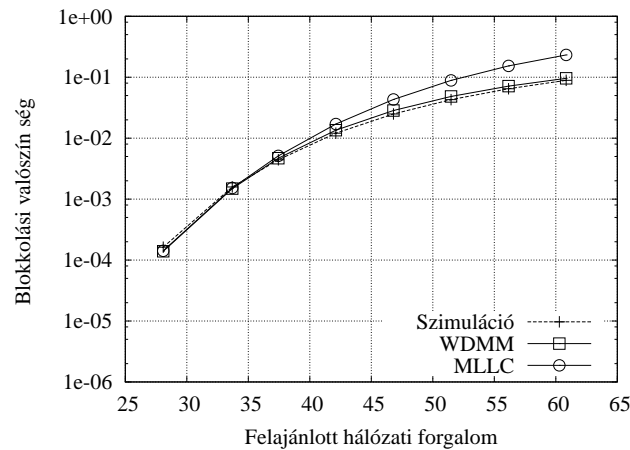
Az [15]-ben javasolt módszer figyelembe veszi a dinamikus optikai hálózatok fent vázolt jellemzőit, vagyis a korlátozott hullámhossz-konverziós képességet és az optikai csatornakérések speciális érkezési folyamatát. Ugyanakkor a többszálás linkeket nem támogatja. Továbbfejlesztve ezt a modellt általánosabb megoldást adtam a problémára [C3].

I.1. TÉZIS *Kifejlesztettem a WDMM (Wavelength Dependent Multifiber Model) modellt dinamikus optikai hálózatok blokkolási valószínűségének számítására. A modell dinamikusan érkező igényeket feltételez, figyelembe veszi a csomópontok korlátozott hullámhossz-konverziós képességét és alkalmas többszálás hálózatok vizsgálatára.*

A megoldás egy iteratív algoritmust alkalmaz a nem blokkolt forgalom mennyiségének visszacsatolásával. A blokkolást az egyes utak foglaltságának elemzésével számítja ki, amelyben figyelembe veszi az egyes hullámhossz-trónkok összekapcsolhatóságát. Hullámhossz-trónknek nevezzük az egy linken található, azonos vagy a csomópontokban egymásra konvertálható hullámhosszokon vezető csatornák halmazát. Ezzel a megközelítéssel a modell képes figyelembe venni teljes vagy korlátozott konverziós képességű, illetve a hullámhossz-konverterek nélküli kapcsolókat is. A számítás az alábbi lépéseken alapul:

1. Bemeneti értékek inicializálása,
2. a linkekre felajánlott forgalom számítása a többi linken elszenvedett blokkolás figyelembevételével,
3. hullámhosszhalmazok foglaltsági valószínűségének számítása egy linkre,
4. az elemzés kiterjesztése teljes utakra, az egymást követő linkek egymásrahatásának figyelembevételével,
5. a hálózati blokkolás kiszámítása az érdekeltségi mátrix alapján,
6. ha elértük a kitűzött pontosságot, akkor állj, különben tovább a 2. lépéstől.

I.2. TÉZIS Megadtam a WDMM számítási bonyolultságát és összehasonlítottam a modellt az MLLC modellel használhatóság, komplexitás és pontosság szempontjából. Megmutattam a WDMM előnyeit különböző jellegű hálózatok esetén.



1. ábra. Blokkolási valószínűség 13 pontos uniform gyűrűben

A WDMM modell számítási bonyolultsága $O(JC^3M) + O(JC^2M^2) + O(J^2M^2)$ minden egyes iterációban, ahol J a linkek száma, C a hullámhosszak száma és M az optikai szálak maximális száma egy linkben. Bár ez a komplexitás nem kicsi, a WDMM gyorsabbnak bizonyult az MLLC megoldásnál, mely az alkalmazott rekurzív számítások miatt $O(HC^5M^3)$ bonyolultságú.

A modell pontosságát reguláris (gyűrű) és nem reguláris (szövevény) topológiákon, uniform és nem uniform érdekeltségi mátrixszal is teszteltük. Az 1. ábrán illusztratív eredményeket láthatunk, melyeket egy tizenhárom csomópontos, minden linkjén 1 optikai szál és abban 24 hullámhosszt tartalmazó gyűrűre kaptunk uniform forgalom mellett.

4.2. Az adatforgalmi réteg teljesítménye

Az IP hálózatokban alkalmazott adaptív elvezetési algoritmusok elemzéséről sok cikk született (pl. [6, 7, 8, 16]). Ugyanakkor szinte minden olyan publikációban, amely folyamatosan modellezi a hálózat forgalmát, a dinamikusan érkező igényekhez állandó és kötött sáv szélességet rendelnek, vagyis a hagyományos, garantált és kapcsolatorientált hálózati modellhez hasonlítanak. Az *adatforgalmi*

réteg esetében viszont ez a fajta megoldás nem követi sem a közös linkeken osztozó folyamatok egymásrahatásából származó, sem a jellemző felhasználói viselkedésből adódó jellemzőket.

Ha elfogadjuk azt a reális feltételezést, hogy az Internet forgalmának jelentős része TCP alapú alkalmazásokból ered, a forgalmat modellezhetjük elasztikus sávszélességű folyamatokkal. A protokoll torlódásvezérlési algoritmusai közvetetten visszacsatolja a hálózati erőforrások terhelését és a folyamatok adaptívan alkalmazkodnak az aktuális helyzethez.

II. TÉZISCSOPORT([J3, C4, C6, C7, C8]) *Az útvonalválasztó mechanizmusok teljesítményének kiértékelésére bevezettem két elasztikus megközelítést használó forgalmi modellt. Formalizáltam az útvonalválasztás problémáját a linkek állapotáról kapott információk elévülésének figyelembevételével, továbbá új algoritmusokat javasoltam a feladat hatékonyabb megoldására.*

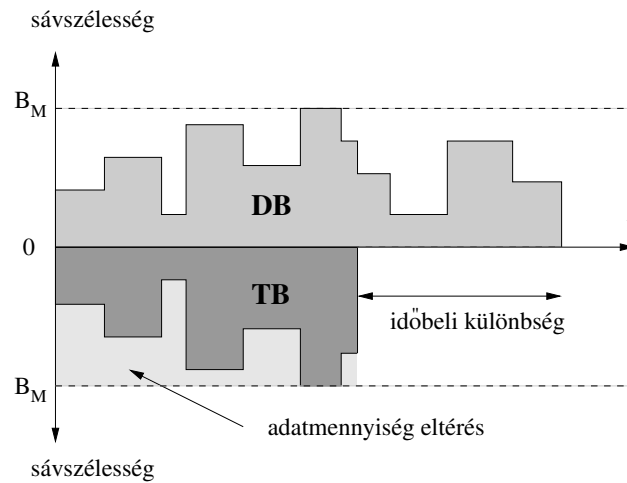
A útvonalválasztó megoldások teljesítményét befolyásolja az IP adatfolyamok elasztikus viselkedése. Különösen igaz ez azokra az algoritmusokra, melyek a hálózat állapotát figyelembe véve döntenek (adaptív, dinamikus vagy QoS routing). Ahhoz, hogy valós képet kapjunk róluk, valósághű forgalmi modellt kell alkalmaznunk, amely az *adatforgalmi réteg* folyamatainak speciális viselkedését követi.

II.1. TÉZIS *Bevezettem az Időalapú (TB) és az Adataalapú (DB) modellt az IP forgalom folyamatszintű vizsgálatára. Meghatároztam a kapcsolódó teljesítményjellemzőket és összehasonlítottam a két modellt. Formalizáltam az útvonalválasztás problémáját és a formalizmust alkalmaztam egyes, az irodalomban megtalálható algoritmusokra.*

Az Időalapú (TB) modellben egy adatfolyamot tartásideje és maximális sávszélessége jellemez. Ez a megközelítés kevésbé hatékony, ha best-effort jellegű, elasztikus forgalmat feltételezünk. Az IP hálózatban az igények kiszolgálása és így az ahhoz szükséges idő is, a hálózat pillanatnyi torlódási viszonyainak megfelelően alakul, ami viszont előre nem számítható ki.

A felhasználó által generált teljes adatmennyiség sikeres átviteléhez szükséges idő több időben változó jellemzőtől függ, közülük is elsősorban a pillanatnyi adatátviteli sebesség alakulásától. Ezért bevezettem az Adataalapú (DB) forgalmi modellt, amelyben a kapcsolat mindaddig aktív, míg a hálózaton a teljes adatmennyiség át nem jut. A modellek közti különbséget illusztrálja a 2. ábra.

Mindkét modellt kiegészítettem a *kiéhezési hatással*, mely modellezi a felhasználó vagy az alkalmazás azon döntését, hogy a gyenge átviteli minőség miatt a kapcsolatot megszakítja. Ehhez egy, a még elfogadható sávszélességet repre-



2. ábra. A *TB* és *DB* forgalmi modellek

zentáló küszöbértéket is be kellett vezetni.

A p_s kiéhezési valószínűség lesz a T átlagos sávszélesség mellett a másik legfontosabb teljesítmény-jellemző. Az utóbbit úgy értelmezzük, mint az egyes nem megszakított kapcsolatoknál mérhető átlagos sávszélesség értékek átlagát az összes ilyen folyamra. Gyakran mint folyamonkénti vagy átlagos átvitel (per-flow/average throughput) hivatkozunk rá. Az adat alapú esetben definiálhatjuk a D_f kiterjedési szorzót is, mely a folyam tényleges és minimális kiszolgálási idejének hányadosa. Ez utóbbi a folyam maximális sávszélességéből vezethető le.

Az útvonalválasztó algoritmusok, mint például *WS* [17], *MD* [6] vagy *LD* [18] összehasonlító elemzésekor használhatjuk az átlagos átvitelben mérhető η relatív nyereséget. Ezt az adott algoritmusnál és a *legrövidebb út (FSP)* algoritmusnál elért T hányadosaként kapjuk.

II.2. TÉZIS *Kiterjesztettem a hálózati modellt úgy, hogy az algoritmusok nem feltétlenül friss linkinformációk alapján döntenek és elemeztem ennek hatását a teljesítményre.*

Minden elosztott útvonalválasztási megoldásnál szükség van a linkekről szóló információk terjesztésére, hogy kiszámíthassuk a szóba jövő utakat és azok költségét. Egy ilyen algoritmus akkor a leghatékonyabb, ha az erőforrások aktuális állapota alapján dönthet. Ezeket az információkat mérési hibák torzíthatják és ráadásul hamar elavulnak, így a pontatlan adatok hibás döntések sorozatát okozhatják az adaptív útvonalválasztásnál.

A hálózati modellt egy időzítő-alapú információ frissítési protokoll [16] modelljével egészítettem ki és az elvezetési algoritmusokat ennek megfelelően újraimplementáltam. Vizsgálataim elsősorban a teljesítmény csökkenésére irányultak, melyet a nagy frissítési időközök okoztak.

Ennek során több algoritmust elemeztem szimulációval. Azt tapasztaltam, hogy, mint az várható volt, a frissítési frekvencia csökkenésével az átlagos sáv szélesség is csökken. Ha a t_u frissítési periódus idő összevethető mértékű a folyamat tartásidejével, akkor a QoS megoldások alacsony terhelésnél jellemző nyeresége teljesen eltűnik. Másrészt a kiéhezési valószínűséget t_u alig befolyásolja, csak nagy értékeknél látható eltérés.

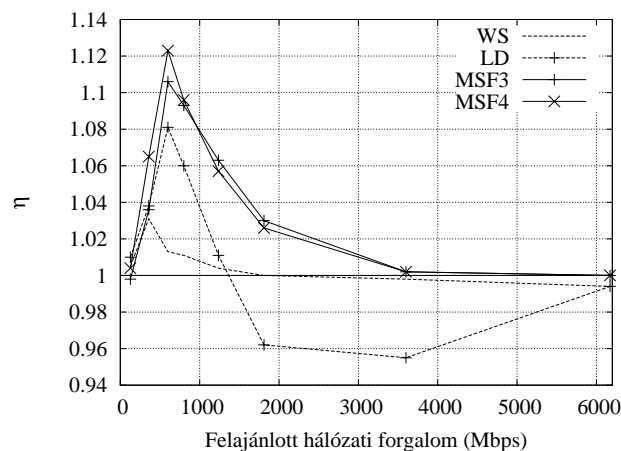
II.3. TÉZIS *Kifejlesztettem egy több mérték alapján szűrő (MSF) útvonalválasztási stratégiát. Egyes ilyen algoritmusok ellenállnak a ritka frissítések teljesítmény-csökkentő hatásának.*

Figyelembe véve a fenti eredményeket megállapíthatjuk, hogy egy új algoritmus kifejlesztésekor arra kell törekedni, hogy a megoldás ellenálljon az elévült információk negatív hatásainak. Fontos megvalósítási szempont, hogy az út kiválasztásához szükséges számítások ne legyenek túl bonyolultak. Az általam kifejlesztett algoritmusok több lépésben szűkítik le a lehetséges utak halmazát, minden lépésben más költséget vesznek figyelembe és az utak halmazának mindig csak a „jobbik” felét tartják meg.

A lépések számát és az alkalmazott mértékeket variálva négy algoritmust vezettem be megfelelően formalizálva. Megvizsgáltam a teljesítményüket különböző frissítési időközök esetében és összehasonlítottam őket korábban javasolt algoritmusokkal.

A 3. ábra olyan eredményeket mutat be, melyeket egy szövevényes topológiát vizsgálva kaptam. A megjelenített MSF algoritmusok csak a rövidebb és kevésbé terhelt linkekből álló utak halmazából választanak és láthatóan ellenállnak a csökkentő hatásnak. Akárcsak az LD algoritmus, az MSF3 és MSF4 is alkalmazza a terhelésfüggő (load dependent) mechanizmust [18], vagyis a hálózatban tapasztalt torlódás itt is hatással van a döntésre. Ezeknél a megoldásoknál nem csökken le nagyon az átlagos sáv szélesség és - szemben az LD és WS módszerekkel - nem teljesítenek rosszabbul, mint az FSP algoritmus.

II.4. TÉZIS *Kifejlesztettem a hálózati gráf redukció (NGR) módszerét, melynek célja a hálózat túlterhelt erőforrásainak elkerülése az útvonalválasztás során. Vizsgálataim megmutatták, hogy az algoritmusok jobban teljesítenek, ha ezt a technikát alkalmazzuk.*



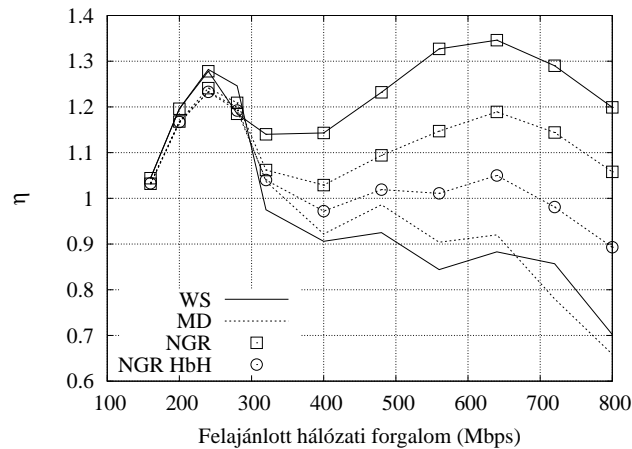
3. ábra. Az η relatív nyereség 100 másodperces frissítési periódusidőnél

Az *LD* esetében is alkalmazott terhelésfüggő mechanizmus az útvonalválasztást a hálózat terhelésétől teszi függővé: túlterhelt esetben a QoS algoritmus helyett egyszerű *FSP*-t használunk. Ugyanakkor a túlterhelés felismerése nem egyszerű feladat, hiszen általában a tényleges felajánlott forgalmat még központosított megoldások esetén sem lehet jól becsülni.

Ezeknek a problémáknak a leküzdésére olyan módszert javasoltam, mely egészen más szemszögből közelíti meg a kérdést. A hagyományos adaptív algoritmusok trükkös $c^\gamma(\cdot)$ költségek sorozatát használják fel a megfelelő út kiválasztásához. Az *NGR*-nél viszont ahelyett, hogy újabb okos metrikákat keresnénk, maradunk az eredeti, jól teljesítő algoritmusoknál. A jelentős változtatás csak annyiból áll, hogy az út keresését egy redukált topológián végezzük, amiből hiányoznak azok a linkek, ahol a folyamatok torlódásától kell tartani. Ehhez elegendő összevetni a link terhelését egy adott, topológiafüggetlen küszöbértékkel.

Ennek az egyszerű változtatásnak azonban megvan az a hátránya, hogy a tényleges megvalósítása akadályokba ütközhet. Sajnos egyes algoritmusok esetében az *NGR* alkalmazása kizárja a csomópontonkénti implementációt, vagyis a globálisan választott út nem illeszkedik a lokális döntésekkel választottra. Ez utóbbi az *NGR* hop-by-hop változata, melyre *NGR HbH* néven hivatkozunk.

Az *NGR* módszer teljesítményét összehasonlítottuk a hagyományos QoS algoritmusokéval. Az elemzést állandó és változó forgalmi mátrix esetére is elvégeztük véletlenszerűen előállított topológiájú hálózatban.



4. ábra. A η relatív nyereség alakulása állandó forgalomnál

A 4. ábrán bemutatott eredmények alapján néhány alapvető megállapítást tehetünk. Alacsony hálózati terhelésnél a QoS algoritmusok a megszokott előnyöket mutatják az *FSP*-vel szemben. Míg azonban a hagyományos *MD* és *WS* megoldások nyeresége elfogy a felajánlott forgalom növekedésével, az *NGR* algoritmus mindig jobban teljesít az *FSP*-nél. Érdekes eredmény, hogy ha az *NGR HbH* technikát alkalmazzuk, a teljesítmény az eredeti és a globális *NGR*-t használó algoritmusok teljesítménye közé esik. Ebből arra következtethetünk, hogy a lokális döntések némileg csökkentik a módszer hatékonyságát.

4.3. A dinamikus forgalom-kötegelés vizsgálata

Az IP over WDM hálózatokat könnyebben elemezhetjük, ha rétegekre bontva modellezzük őket. Ugyanakkor vizsgálnunk kell az *adatforgalmi réteg* és az *optikai réteg* közti együttműködést is, mely a két réteg erőforrásainak minél hatékonyabb kihasználását segíti elő.

A *forgalom-kötegelést* (grooming) széles körben használják a statikus optikai hálózatokban, ahol ezzel biztosítják az optikai csatorna felosztását a jóval kisebb sáv szélességű forgalmat generáló felhasználók közt. Az utóbbi években az automatikusan kapcsolt optikai hálózatokhoz kapcsolódóan az irodalomban megjelentek a dinamikus megoldások és azok elemzései [9, 10, 11, 19]. A dinamikus kötegelés problémája egyrészt szorosan kapcsolódik az *adatforgalmi réteg* útvo-

nalválasztásához is, hiszen ennek során dől el, hogy melyik optikai csatornákon visszük át a forgalmat. Másrészt az elvezető algoritmusok teljesítménye is növelhető, ha a virtuális topológia, vagyis a felépített *fényutak* halmaza jól illeszkedik a forgalmi viszonyokhoz.

III. TÉZISCSOPORT([J1, J2, C1, C2]) *Kiterjesztettem a hálózati modellt és a dinamikus forgalom-kötegelés problémakörét vizsgáltam IP over WDM hálózatokban.*

Először olyan eseteket elemeztem, ahol feltételeztem, hogy CBR típusú folyamatok alkotják az *adatforgalmi réteg* forgalmát. Bizonyos feltételek mellett az *optikai réteg* vizsgálatára kidolgozott modellt ki lehet terjeszteni a garantált sávszélességű igények vizsgálatára.

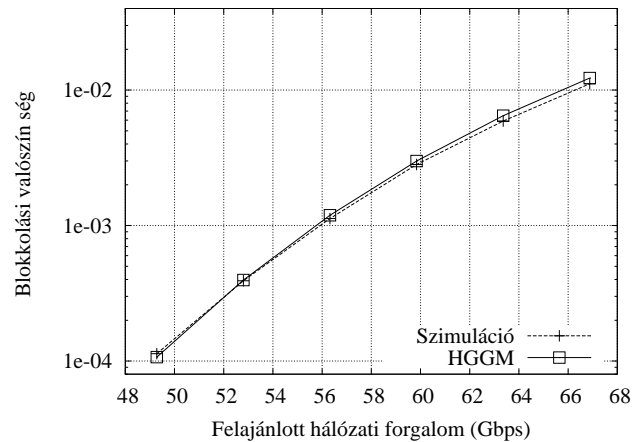
III.1. TÉZIS *Kidolgoztam a HGGM elméleti modellt, mely a blokkolás számítására alkalmas garantált sávszélességű forgalmat szállító, dinamikus forgalom-kötegelést támogató IP over WDM hálózatokban.*

Ha az optikai csatornákat megoszthatjuk időosztásos multiplexálás (TDM) segítségével, akkor a hullámhossz kapacitásánál kisebb kapacitású *subwave csatornákat* definiálhatunk. Az időrések átrendezésével ezek a csatornák is átkapcsolhatóak lehetnek. Tétélezzük fel, hogy a hálózat csomópontjai homogének a hullámhossz-konverziós és az időrés-átrendezési képesség szempontjából. Ekkor bevezethetjük a *subwave csatorna*-trónk fogalmát, mint egy link olyan *subwave csatornáinak* egy halmazát, melyek a csomópontokban egymásba kapcsolhatók. A csomópontok képességeitől függően több ilyen trónk lehet egy optikai linken.

Ebben a környezetben kapcsolatorientált adatátvitelt teszünk fel az *adatforgalmi rétegben*. Minden felhasználói igény egy végpont-végpont *subwave csatornán* viszi át adatait. Az alkalmazott grooming *peer* architektúrájú, ami azt jelenti, hogy az *általános elvezetési probléma* megoldása során hozott döntésekhez mindkét réteg információi rendelkezésre állnak.

A fenti feltételezések mellett a dinamikus és többszálás WDM hálózatok elemzésére alkalmazott WDM modell kiterjesztettem HGGM modellé. A korábban bevezetett hullámhossz-trónkok és a *subwave csatorna*-trónkok koncepciójának hasonlóságai miatt a modell kiterjesztése néhány paraméter átértelmezésével elvégezhető. A HGGM segítségével garantált sávszélességű felhasználó igények blokkolási valószínűsége számítható ki olyan dinamikus, többszálás IP over WDM hálózatokban, melyek támogatják a TDM-alapú *subwave csatornákat* és a *peer* architektúrájú forgalom-kötegelést.

A számítás pontosságát az I.2 tézishez hasonlóan reguláris és nem reguláris



5. ábra. A blokkolási valószínűség alakulása a CWEN hálózatban

topológiájú hálózatokban teszteltem különböző forgalmi mátrixokkal. Nem okozott meglepetést, hogy a vizsgálatok során hasonló következtetésekre jutottam, mint a WDM esetén. Az 5. ábra illusztrálja a kiterjesztett modell pontosságát. Az eredményeket egy szövevényes topológia elemzésekor kaptuk, amelyben 32 *subwave csatorna*-trónk volt a linkeken.

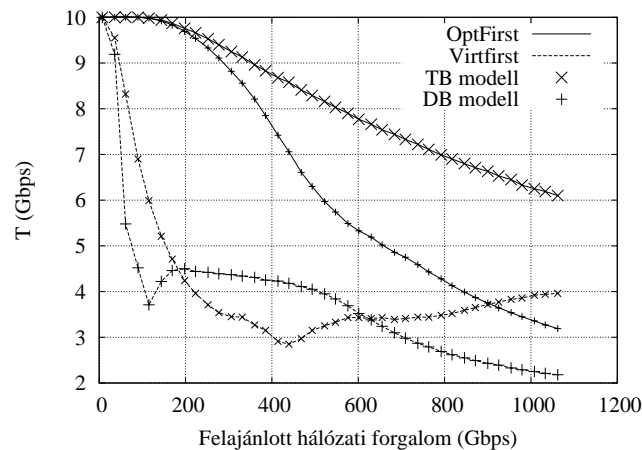
III.2. TÉZIS Alkalmaztam és összehasonlítottam a TB és DB forgalmi modelleket IP over WDM hálózatokban. Meghatároztam a vizsgálatban alkalmazható teljesítmény-jellemzőket és segítségével overlay architektúrájú, dinamikus forgalom-kötegelési megoldásokat elemeztem.

Érdekesebb probléma a rétegek közti együttműködés vizsgálata akkor, ha az *adatforgalmi réteg* modellje figyelembe veszi az IP forgalom jellemzőit. Bár az IP over WDM hálózatok forgalom-kötegelő módszereivel sok szerző foglalkozott, elemzéseikben egyszerűen figyelmen kívül hagyják a TCP/IP forgalom elasztikus jellegét. E hiányosság felismerésével az overlay architektúrájú, dinamikus megoldásokat a TB és DB forgalmi modellek felhasználásával vizsgáltam.

A hálózat IP rétegében a két útvonalválasztót összekapcsoló utat logikai vagy virtuális útnak nevezünk, hiszen ez virtuális linkek sorozataként jön létre. Egy virtuális linket egy az *optikai rétegben* felépített *fényút* valósít meg. Ha figyelembe vesszük a jelenlegi hálózati struktúrákat, akkor elmondható, hogy a forgalom-kötegelés esetében a leginkább valószínű architektúra az *overlay*, melynél a *adatforgalmi réteg* útvonalválasztó mechanizmusa teljesen elkülönül az *optikai réteg*

ben használt RWA-tól. Ilyenkor a kötegelés egyetlen, de korántsem egyszerű feladata annak eldöntése lesz, hogy egy érkező adatfolyamot az IP szinten vezetünk-e el felhasználva az aktuális virtuális topológiát, vagy új virtuális linkeket kell felépítenünk.

Az elasztikus forgalmi modellekhez illesztettem és implementáltam a *Optical-level First (OptFirst)* és *Virtual-topology First (VirtFirst)* forgalom-kötegelési megoldásokat, melyeket CBR forgalom esetére vezettek be [20]-ban. Definiáltam a th_o nyitási küszöb paramétert, mely az utóbbi algoritmus megfelelő működéséhez szükséges. Mind az *optikai*, mind az *adatforgalmi rétegben* meghatároztam a forgalom-kötegelési eljárások elemzésére alkalmas teljesítmény-jellemzőket: T folyamankénti átlagos átvitel, p_s kiéhezési valószínűség, N_l az IP hopok átlagos száma az egyes folyamoknál, N_{l_o} az optikai hopok átlagos száma az egyes *fényutak*nál, L_o az optikai linkeken használt csatornák átlagos száma és R_o a virtuális linkek felépítési rátájának és a felhasználói folyamok érkezési rátájának hányadosa.



6. ábra. Különböző algoritmusokkal kapott átlagos sávszélesség a *DB* és *TB* modellek esetén

Ezeket a jellemzőket reguláris (gyűrű, tórusz) és irreguláris (szövevényes) topológiájú hálózatokban elemeztem. Illusztrációként a 6. ábra a T folyamankénti átvitel alakulását mutatja szövevényes hálózat esetén. Egyrészt a két forgalmi modellel kapott eredmény különbsége itt is szembeszökő mindkét forgalom-kötegelő módszer esetén. Másrészt az *OptFirst* és *VirtFirst* megoldások alapjaiban eltérően

kezelik a virtuális topológia erőforrásait és ezért nagy minőségi eltérést tapasztalnak a felhasználók is. Ugyanakkor ne felejtjük el, hogy az ügyben teljes képet csak akkor kapunk, ha figyelembe vesszük a többi jellemzőt is, pl. a p_s -t.

5. Az eredmények alkalmazása

A telekommunikációs hálózatok teljesítményének elemzése egyrészt elősegíti az alkalmazott mechanizmusok működésének mélyebb megértését, másrészt előkészítheti és kiegészítheti a hálózat tervezést illetve az új, hatékonyabban működő algoritmusok kifejlesztését.

A disszertációban bemutatott eredmények az IP over WDM hálózatok *optikai és adatforgalmi rétegének* modellezési és elemzési kérdéseivel foglalkoznak. Az I. téziscsoportban bemutatott elméleti modellel a dinamikusan konfigurálható WDM hálózatokban érkező igények blokkolási valószínűségét lehet számítani. A II. és III. téziscsoport modelljei és algoritmusai a GANCLES szimulációs eszközben [C1] kerültek implementálásra.

Hivatkozások

- [1] B. Rajagopalan, J. Luciani, and D. Awduche. RFC 3717: IP over optical networks: A framework, March 2004.
- [2] L. Li and A. K. Somani. Blocking performance analysis of fixed-paths least-congestion routing in multifiber wdm networks. In *Proc. of SPIE Photonics East'99*, pages 56–67, September 1999. Boston, MA USA.
- [3] A. Birman. Computing approximate blocking probabilities for a class of all-optical networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5):852–857, 1996.
- [4] R. Srinivasan and A. K. Somani. A generalized framework for analyzing time-space switched optical networks. In *Proc. of IEEE INFOCOM'01*, April 2001. Anchorage, USA.
- [5] S. Subramaniam, A. K. Somani, M. Azizoglu, and R. A. Barry. The benefits of wavelength conversion in wdm networks with non-poisson traffic. *IEEE Communications Letters*, 3(3):81–83, 1999.

- [6] Q. Ma and P. Steenkiste. Routing traffic with quality-of-service guarantees in integrated services networks. In *Proc. of 8th IEEE/ACM International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 1998)*, July 1998. England.
- [7] D. Cavendish and M. Gerla. Internet qos routing using the bellman-ford algorithm. In *Proc. of IFIP Conference on High Performance Networking, HPN 1998*, 1998. Vienna, Austria.
- [8] G. Apostolopoulos, D. Williams, S. Kamat, R. Guerin, A. Orda, and T. Przygienda. RFC 2676: QoS routing mechanisms and OSPF extensions, August 1999.
- [9] R. Dutta and G. N. Rouskas. Traffic grooming in wdm networks: past and future. *IEEE Network Magazine*, 16(6):46–56, 2002.
- [10] X. Zhang and C. Qiao. An effective and comprehensive approach to traffic grooming and wavelength assignment in sonet/wdm rings. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(5):608–617, 2000.
- [11] H. Zhu, H. Zang, K. Zhu, and B. Mukherjee. A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous wdm mesh networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(2):285–299, 2003.
- [12] et al. Kaminow, I. P. A wideband all-optical wdm network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5):780–799, 1996.
- [13] A. Mokhtar and M. Azizoglu. Adaptive wavelength routing in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 6(2):197–206, 1998.
- [14] Y. Zhu, G. Rouskas, and H. Perros. A path decomposition approach for computing blocking probabilities in wavelength routing networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(6):747–762, 2000.
- [15] A. Sridharan and K. N. Sivarajan. Blocking in all-optical networks. In *Proc. of IEEE INFOCOM'00*, March 2000. Tel-Aviv, Israel.
- [16] G. Apostolopoulos, R. Guérin, S. Kamat, and S. K. Tripathi. Quality of service based routing: A performance perspective. In *Proc. of ACM SIGCOMM'98*, 1998. Vancouver, Canada.

- [17] Z. Wang and J. Crowcroft. Qos routing for supporting resource reservation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(7):1288–1294, 1996.
- [18] C. Casetti, G. Favalessa, M. Mellia, and M. M. Munafò. An adaptive routing algorithm for best-effort traffic in integrated-services networks. In *Proc. of 16th International Teletraffic Congress, IEE ITC-16*, June 1999. Edinburgh, UK.
- [19] K. Zhu and B. Mukherjee. Traffic grooming in an optical wdm mesh network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122–133, 2003.
- [20] X. Niu, W. D. Zhong, G. Shen, and T. H. Cheng. Connection establishment of label switched paths in ip/mps over optical networks. *Photonic Network Communications*, 6(1):33–41, 2003.

Publikációk

- [J1] R. Lo Cigno, E. Salvadori, and Z. Zsóka. Dynamic Grooming in IP over Optical Networks based on the Overlay Architecture. *Optical Switching and Networking*, 3(2):118–133, 2006.
- [J2] Z. Zsóka. Dinamikus forgalom-kötegelés (grooming) analízise optikai hálózatokban. *Magyar Távközlés*, 15(2):33–37, 2004.
- [J3] C. Casetti, R. Lo Cigno, M. Mellia, M. M. Munafó, and Z. Zsóka. A new class of qos routing strategies based on network graph reduction. *Computer Networks*, 41(4):475–487, 2003.
- [C1] R. Lo Cigno, E. Salvadori, and Z. Zsóka. Dynamic grooming in overlay networks: A study with realistic traffic based on Gancles simulation package. In *Proc. of 9th IFIP TC6 Conference on Optical Network Design and Modelling, ONDM 2005*, February 7-9 2005. Milano, Italy.
- [C2] R. Lo Cigno, E. Salvadori, and Z. Zsóka. Elastic traffic effects on wdm dynamic grooming algorithms. In *Proc. of IEEE GLOBE-COM'04*, Nov. 29 - Dec. 3 2004. Dallas, Texas USA.

- [C3] Z. Zsóka. Blocking probability of all-optical multifiber networks. In *Proc. of 7th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modelling, ONDM 2003*, February 3-5 2003. Budapest, Hungary.
- [C4] C. Casetti, R. Lo Cigno, M. Mellia, M. M. Munafó, and Z. Zsóka. A new class of qos routing strategies based on network graph reduction. In *Proc. of IEEE INFOCOM'02*, June 23-27 2002. New York, NY USA.
- [C5] Z. Zsóka. Ason hálózatok forgalmának modellezése. In *Proc. of HTE-BME 2002 diákkonferencia*, May 2002. Budapest, Hungary.
- [C6] C. Casetti, R. Lo Cigno, M. Mellia, M. M. Munafó, and Z. Zsóka. A realistic model to evaluate routing algorithms in the internet. In *Proc. of IEEE GLOBECOM'01*, Nov. 25-29 2001. San Antonio, Texas USA.
- [C7] C. Casetti, R. Lo Cigno, M. Mellia, M. M. Munafó, and Z. Zsóka. Routing algorithms evaluation for elastic traffic. In *Proc. of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, HPSR 2001*, May 29-31 2001. Dallas, Texas USA.
- [C8] C. Casetti, R. Lo Cigno, M. Mellia, M. M. Munafó, and Z. Zsóka. Qos routing strategies when link state information is out-of-date. In *Proc. of 8th IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM and IP Networks*, July 17-19 2000. Ilkley, West Yorkshire U.K.

A rövidítések listája

ASON	Automatic Switched Optical Network
CBR	Constant BitRate traffic
DB	Data-Based traffic model
FSP	Fixed Shortest Path routing
G-OXC	Grooming OXC
HGGM	Homogenous Guaranteed-traffic Grooming Model
IP	Internet Protocol (Network)
LD	Load Dependent routing
MD	Minimum Distance routing
MLLC	Multifiber Link-Load Correlation
MSF	Multimetric Sequential Filtering
NGR	Network Graph Reduction
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
OXC	Optical Crossconnect
QoS	Quality of Service
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
TB	Time-Based traffic model
TCP	Transmission Control Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WDMM	Wavelength Dependent Multifiber Model
WS	Widest-Shortest routing