

Statisztikus nyalábolás és forgalom kötegelés együttes hatása optikai hálózatokban

KERN ANDRÁS, SOMOGYI GYÖRGY, CINKLER TIBOR

BME Távközlési és Média Informatikai Tanszék
{kern, somogyi, cinkler}@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: dinamikus optikai hálózat, GMPLS, forgalomkötegelés, statisztikus nyalábolás

Többrétegű optikai gerinchálózatok nagy sávszélesség nyújtására képesek. A szükséges erőforrások hatékonyabb kihasználására alkalmas a forgalmak kötegelése (grooming). A kötegelés lényege, hogy ha két forgalmi igény útvonalának van közös része, akkor a két forgalmat egy hullámhosszcsatornába lehet összefogni. A lefoglalt kapacitások hatékonyabb kihasználására ismert másik módszer a forgalmak nyalábolása (multiplexing). A statikus nyalábolás az egyes forgalmi igényeknek nem a maximális sávszélességet foglalja le, hanem a maximálisnál kevesebbet, de az átlagosnál nagyobbat. A cikk célja a két módszer együttes hatásának vizsgálata. Az eredmények azt mutatják, hogy a statisztikus nyalábolás önmagában nem eredményez nagyobb átbocsátóképességet: optikai kapcsolókat feltételezve a nyereség elhanyagolható. Ugyanakkor a nyalábolás és a kötegelés együttes alkalmazása nagymértékben megnöveli a kiszolgált igények mennyiségét.

1. Bevezetés

A modern gerinchálózatok szinte kizárólag optikai átviteli alapulnak, hiszen ez a technológia hatalmas sávszélességet biztosít. Egy optikai csatornán akár több 10 Gbit/s is elérhető, ráadásul a hullámhossz nyalábolás (Wavelength Multiplexing, WDM) alkalmazásával egy fényvonal több jel egyidejű továbbítására is képes párhuzamos csatornákon. Az összefogott csatornák számától függően beszélhetünk ritka hullámhossz-osztásos (Coarse WDM, CWDM) vagy sűrű hullámhossz-osztásos (Dense WDM, DWDM) rendszerekről. DWDM rendszerek esetén akár több Tbit/s sebesség biztosítható. Ebben a hálózatban az összeköttetéseket fényutakkal, hullámhossz-csatornákkal sorozatával valósítják meg.

Nyilvánvaló cél kapcsolt szállító hálózatok esetén is, hogy a rendelkezésre álló erőforrások a lehető leghatékonyabban legyenek kihasználva, azaz a lehető leg-

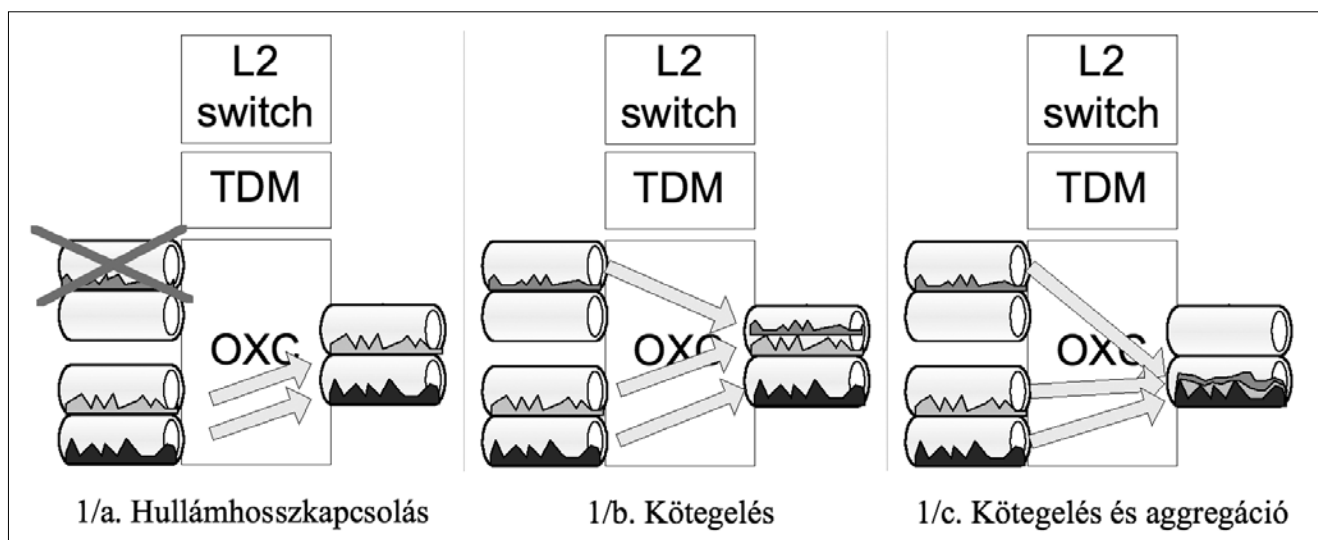
több igényt szolgáljuk ki. Az erőforrás foglalásakor két problémával szembesül a hálózat üzemeltetője:

(1) a forgalmi igények mérete általában nagyságrendekkel kisebb, mint a hullámhosszcsatornák mérete, és

(2) a tényleges forgalom nagysága változó és az idő jelentős részében nem használja ki a lefoglalt kapacitást. Az első problémára megoldást jelent a *forgalmak kötegelése* (traffic grooming) [2], míg a második esettel a *statisztikus nyalábolás* (statistical multiplexing) vagy aggregáció témaköre foglalkozik. A két területnek külön-külön komoly irodalma van, azonban a tudásunk szerint a két lehetőség együttes hatását nem vizsgálták még kapcsolt optikai hálózatokban. Ezt a feladatot tűztük ki célul.

A következő példán keresztül illusztráljuk a fenti problémát. Az 1. ábrán látható csomópont 3 kapuval rendelkezik, kapuként két-két hullámhossz-csatornával. A csomópontba három forrásból érkezik forgalom és ugyan-

1. ábra Kötegelés és aggregáció együttes hatása a kapcsolásra



abba a cél csomópontba tartanak. A három irányból érkező forgalom három hullámhossz csatornán érkezik.

Amennyiben csak hullámhosszakat lehet kapcsolni (1/a. ábra), akkor a három csatornából csak kettőt lehet átvinni. A harmadik forgalmat nem tudjuk kiszolgálni: a kapcsolat-felépítési fázisban blokkolódik. Ha lehetővé tesszük a forgalmak kötegelését, akkor elvileg egy csatornában is összefoghatnánk a három forrásból érkező forgalmakat. Azonban a forgalmak leíróban megadott maximális sáv szélesség igények összege meghaladná a csatorna kapacitását, ezért csak két csatornában tudjuk átvinni (1/b. ábra). Ha viszont lehetővé tesszük, hogy a forgalmak számára nem a maximális sáv szélesség-igényeik összegét foglaljuk, hanem kevesebbet – hogy pontosan mennyit, később kerül részletezésre –, akkor mindhárom forgalom átvihető egy csatornán (1/c. ábra).

Amennyiben csak teljes hullámhosszakat lehet kapcsolni (nincs kötegelés), akkor az aggregáció figyelembe vételének a jelen példában nincs értelme, hiszen az csak akkor eredményezne bármekkora nyereséget is, ha egy csatornába több forrásból érkező forgalmakat össze lehetne fogni.

2. Erőforrás-foglalás és útvonalválasztás kapcsolt optikai hálózatokban

Kapcsolt optikai hálózatokban statikus erőforrás-foglalásról beszélünk abban az esetben, amikor a forgalmi igényeket leíró mátrix időben nem változik, tehát az igények statikusak. Ekkor az elvezetési probléma megfogalmazható optimalizálási feladatként. Ezzel szemben a valós hálózatokban a forgalmi igények véletlenszerű időpillanatokban érkeznek, és szintén véletlenszerű „tartási idő” után megszűnnek. Ezt az igényformát egy dinamikus foglalási modell írja le, azaz a forgalomnak mind az intenzitása mind a térbeli eloszlása időben változik. Ekkor a feladat az érkező forgalmi igények egymás után történő elvezetése a hálózatban.

2.1. Hullámhosszgráf-modell

A transzport hálózatokban történő dinamikus útvonalválasztás szimulációjához az úgynevezett hullámhosszgráf-modellt használtuk fel [3]. A modell alapötlete, hogy két csomópont között futó fényszálak annyi párhuzamos éllel írjuk le, ahány hullámhossz áll rendelkezésre. Emellett minden fizikai eszközt a típusától függő részgráffal írjuk le, ami lehetőséget biztosít különféle típusú csomópontok egyszerű és szemléletes leírására. Ez a tulajdonság a modell egyik legfontosabb erénye. Jelen cikkben két, képességeiket tekintve lényegesen eltérő csomópont típust tételezünk fel:

Az *optikai vezérelt rendezők* (Optical Cross Connect, OXC) a hullámhossz csatornák fényszálak közötti kapcsolását valósítják meg. Továbbá rendelkeznek optikai leágaztató (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) funkciókkal is, ezért forgalmi igények belépési és kilépési pontjai lehetnek.

Ezzel szemben a *kötegelő (grooming) csomópontok* kiegészítik az OXC csomópontok tulajdonságait azzal, hogy több forgalom egy közös hullámhosszcsatornába történő összefogására, azaz kötegelésére is képesek. A kötegelést részletesebben a következők fejezetben járjuk körül.

2.2. Forgalmkötegelés

A transzport hálózatokba érkező forgalmi igények mérete tipikusan sokkal kisebb, mint egy hullámhosszcsatorna kapacitása. Egy forgalmi igényhez egy teljes csatorna hozzárendelése az esetek nagy részében erőforrás pazarló lenne, ezért lehetőleg meg kell osztani a fényutakat több forgalmi igény között. Közös forrással és céllal rendelkező igényeket az elektromos rétegben össze tudjuk fogni és végig egy fényúton átvinni. Ezt *nyalábolásnak* nevezzük. Ez a módszer azonban nem alkalmazható abban az esetben, amikor a forgalmi igényeknek nem ugyanaz a forrása vagy célja.

Ez utóbbi esetben megtehető, hogy a fényutakat a közös szakasz előtt és után megszakítjuk, és ezekben a pontokban az elektromos rétegbe vezetjük a forgalmat. Ott összefogjuk a forgalmakat – például időosztással –, és a közös szakaszon egy csatornában viszzük át őket. Ezt a megoldást nevezi az irodalom *forgalom-kötegelésnek*. Általánosságban akkor beszélünk forgalom-kötegelésről WDM hálózatokban, amikor egy vagy több csatornán érkező forgalmakat felsőbb – elektromos – rétegben átcsoportosítjuk (például a céljuk szerint), és csoportonként összefogva egy-egy külön csatornán továbbítjuk őket.

A kötegelés nyilvánvaló előnye, hogy a hullámhosszcsatornák hatékony kihasználását teszi lehetővé. Ugyanakkor az alkalmazásához optikai-elektromos átalakítókra van szükség a kötegelő csomópontokban, amelyek drága eszközök. Emiatt a méretezési fázisban a kötegelés költségét figyelembe kell venni. Ezzel szemben jelen munkában a tervezési illetve méretezési kérdésekkel nem foglalkozunk.

2.3. Statisztikus multiplexelés (aggregáció)

A gerinchálózatok forgalmának jelentős részét az adatforgalom adja, amelynek nagysága időben változó. Ez felveti annak kérdését, hogy mennyi kapacitást is foglaljunk a forgalmi igények számára. Hagyományos megoldás, hogy a lefoglalt kapacitás egyenlő az egyes igények maximális méretének összegével. Ezt nevezük *determinisztikus multiplexálásnak*, amely azonban túlméretezett hálózatot eredményez. A kihasználatlan kapacitások mennyisége csökkenthető a *statisztikus multiplexálás* alkalmazásával, ahol azt a jelenséget használjuk ki, hogy az egyes források által generált forgalom maximumai nagy valószínűséggel időben nem esnek egybe. Így az aggregált forgalom számára meghatározható egy korlát, amely esetén annak a valószínűsége, hogy az aggregátum meghaladja a választott korlátot egy rögzített kis érték. Ez utóbbi paraméter túlcsoportulási (vagy csomagvesztési) valószínűségnek nevezzük, míg a korlát neve effektív sáv szélesség.

Az elméleti alapok taglalása megtalálható F. Kelly cikkében [4]. S. Floyd egy egyszerű módszert javasolt a Hoeffding korlát alapján [5] szükséges effektív sáv szélesség (BW) kiszámolására:

$$BW = \sum_{i=1}^n m_i + \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot \sum_{i=1}^n p_i^2}{2}}, \quad (1)$$

ahol m_i és p_i az i -ik elemi forrás átlagos és maximális sebessége; továbbá ε annak a valószínűsége, hogy az aggregált forgalom nagyobb lesz, mint BW. A módszer előnye, hogy könnyen számolható és konzervatív becslés – azaz garantálja, hogy adott peremfeltételek mellett a sáv szélesség nem lesz nagyobb a kiszámítottnál. Komoly hátránya, hogy gerinchálózatok esetén a forgalmak már aggregáltak, így az ingadozásuk is kisebb. Emiatt ez a modell meglehetősen pontatlan, és így nem alkalmazható.

Pontosabb modellek alkotásához emiatt feltételezéseket kell tennünk a forgalom természetéről. Tegyük fel, hogy az érkező forgalmak egymástól függetlenek és nagyságuk normális eloszlású. Ez a feltétel gerinc hálózatok esetén jól közelíti a valóságot, hisz az egyes igények forgalmi már maguk is aggregátumok. Ekkor alkalmazható például a Guèrin által javasolt modell [6], ami szerint a lefoglalandó kapacitás a következőképp számolható:

$$BW = \sum_{i=1}^n m_i + \alpha \cdot \sigma, \quad (2)$$

ahol m_i az egyes elemi forgalmak átlagos sebessége, míg σ az aggregált forgalom szórása. Mivel az elemi forgalmakról feltételeztük, hogy normális eloszlásúak, így az aggregált forgalomról is feltételezhetjük azt. Ekkor annak a valószínűsége, hogy az aggregátum meghaladja a lefoglalt kapacitást (túlcsordulási valószínűség), jól jellemezhető az α paraméterrel. Ahhoz például, hogy a túlcsordulási valószínűség 0,01 legyen, az α értéke 2,33 kell legyen, és $\alpha = 5,61$ esetén, ez a valószínűség 10^{-9} . Mivel további feltételezés, hogy az egyes elemi folyamatok függetlenek egymástól, így az aggregátum szórásnégyzete (σ^2) egyszerűen számolható: megegyezik az elemi forgalmak szórásainak négyzetösszegével.

A Guèrin-modell kiterjesztését a [7] taglalja, és több módszert mutat be az α paraméter meghatározására. A modell előnye a könnyű számolhatóság, továbbá, hogy jól modellezi a valós forgalmakat. Ugyanakkor a forgalmi igények leírói között meg kell követelni a forgalom szórását is, vagy azt becsülni kell az egyéb megadott paraméterek (például az átlag és maximális érték) alapján. Ez utóbbi feladat viszont nehézkes.

Lindberger által javasolt közelítés alapötlete, hogy a forgalom eloszlását ekvivalens „Poisson csomókból” álló folyamattal [8] írja le. A kapott formula meghatározza az egyes elemi folyamatok számára szükséges sáv szélességet. Ezt összegezve kapjuk a következő formulát, amely egyenesen arányos az átlagos sáv szélesség-igényekkel (m_i) és a szórásnégyzetekkel (σ^2), valamint fordítottan arányos csatorna kapacitásával (C):

$$BW = \sum_{i=1}^n a \cdot m_i + b \cdot \frac{\sigma^2}{C}, \quad (3)$$

ahol a és b csak a csomagvesztési valószínűségtől (P_{loss}) függ:

$$a = 1 - \frac{\log P_{loss}}{50}, \quad b = -6 \cdot \log P_{loss}.$$

Vizsgálataink során az (1,18; 63) paraméterpárt használtuk, amellyel az elérhető túlcsordulási valószínűség $P_{loss} = 10^{-9}$.

A következő kapacitásbecslő képlet (SCRPCR) esetén a lefoglalandó kapacitás megegyezik az *átlagos sáv szélesség igények* összegével, és ezt az összeget növeli meg a maximális és átlagos sáv szélesség igény különbségei közül a legnagyobbal:

$$\sum_{i=1}^n m_i + \max_{i=1..n} \{p_i - m_i\}. \quad (4)$$

A különféle aggregációs technikák irodalma bőséges, azonban a cikknek nem célja az összes módszer megvizsgálása ezért ez utóbbi három módszert (2, 3, 4) vizsgáltuk. Az elsőt annak korlátai – rossz becslést ad a gerinchálózati forgalmak esetén – miatt nem alkalmazzuk.

3. Statisztikus multiplexelés és kötegelés együttes vizsgálata

Mind a forgalom-kötegelésnek, mind a statisztikus multiplexelésnek nagy irodalma van, azonban tudomásunk szerint az együttes hatásukat nem vizsgálták kimerítően. Cikkünk ezt a területet célozza. Az együttes hatást szimulációval vizsgáltuk. A fő eszköz a tanszéken fejlesztett Intra- és Interdomain Routing (IIDR) nevű diszkrét eseményvezérelt szimulátor, amely egy adott hálózat dinamikus viselkedését szimulálja különböző forgalmi terhelések esetén.

Az üzemeltető csomópontok közötti összeköttetést nyújt szolgáltatásként, amelyek számára erőforrásokat foglal le. Az összeköttetések paramétereit (forrás és cél eszköz címe) és leíróit (tartási ideje, átlagos és maximális sáv szélesség-igénye) együttesen forgalmi igénynek nevezzük. A szimuláció során ezek az igények egymás után lépnek be a hálózatba, és a forgalomirányítási algoritmus egyesével vezeti el őket.

Első lépésben az igény forrása és célja között egy megfelelő útvonalat keres. Az útvonal keresését egy logikai gráf felett végzi, amely a korábban bemutatott hullámhossz-gráf modellen alapul. Ebből a gráfból az út keresés idejére törölődnek azok az élek, amelyen nem áll rendelkezésre elegendő szabad kapacitás az igény számára. Így az útválasztás megoldható legrövidebút-kereső algoritmusok segítségével. Ekkor, ha létezik út az igény forrása és célja között, akkor az út mentén mindenütt rendelkezésre áll a szükséges mennyiségű erőforrás, így azok lefoglalásra kerülhetnek. Ellenkező esetben az igény blokkolódik, elkerülendő a későbbi torlódást. Egy igény törlése esetén a szimulátor az igényhez rendelt erőforrásokat egy lépésben szabadítja fel.

A különböző vizsgált aggregálási modellek hatása az útvonal-választási lépésben jelenik meg. Statisztikus multiplexálás esetén annak ellenőrzése, hogy rendelkezésre áll-e a szükséges kapacitás, következőképp történik. A forgalomirányítási algoritmus meghatározza az effektív sávszélességet abban az esetben, ha az aktuális igény használná az adott élel. Ha ez az érték nagyobb, mint a rendelkezésre álló kapacitás, akkor nem áll rendelkezésre a szükséges hálózati kapacitás, és az adott él törlődik a logikai gráfból.

A forgalmi igényeket egy erre a célra kifejlesztett alkalmazás generálja, még a szimuláció előtt, lehetővé téve, hogy ugyanazon a forgalmi mintán, több független szimulációt lehessen elvégezni. A szimulációk futtatását, valamint a kimenetek alapján az ábrák készítését perl szkriptek segítségével végezzük el.

3.1. Topológiák

A szimulációkat a COST 266 Európai Unió projekt referenciahálózatainak végeztük [8]. Az egyik a COST 266-os maghálózati topológia (Core Topology), a másik a COST 266-os gyűrűs topológia (Ring Topology).

A maghálózati topológia 16 csomópontot és 23 élel tartalmaz, a csomópontok fokszáma kisebb, mint három. A gyűrűs topológia 28 csomópontot és 35 élel tartalmaz, itt a csomópontok átlagos fokszáma 2,5. Mindkét topológia esetén két csomópont között 4 hullámhosszcsatornát definiáltunk, egy csatorna kapacitása 1000 kbit/s.

3.2. Forgalmi igények

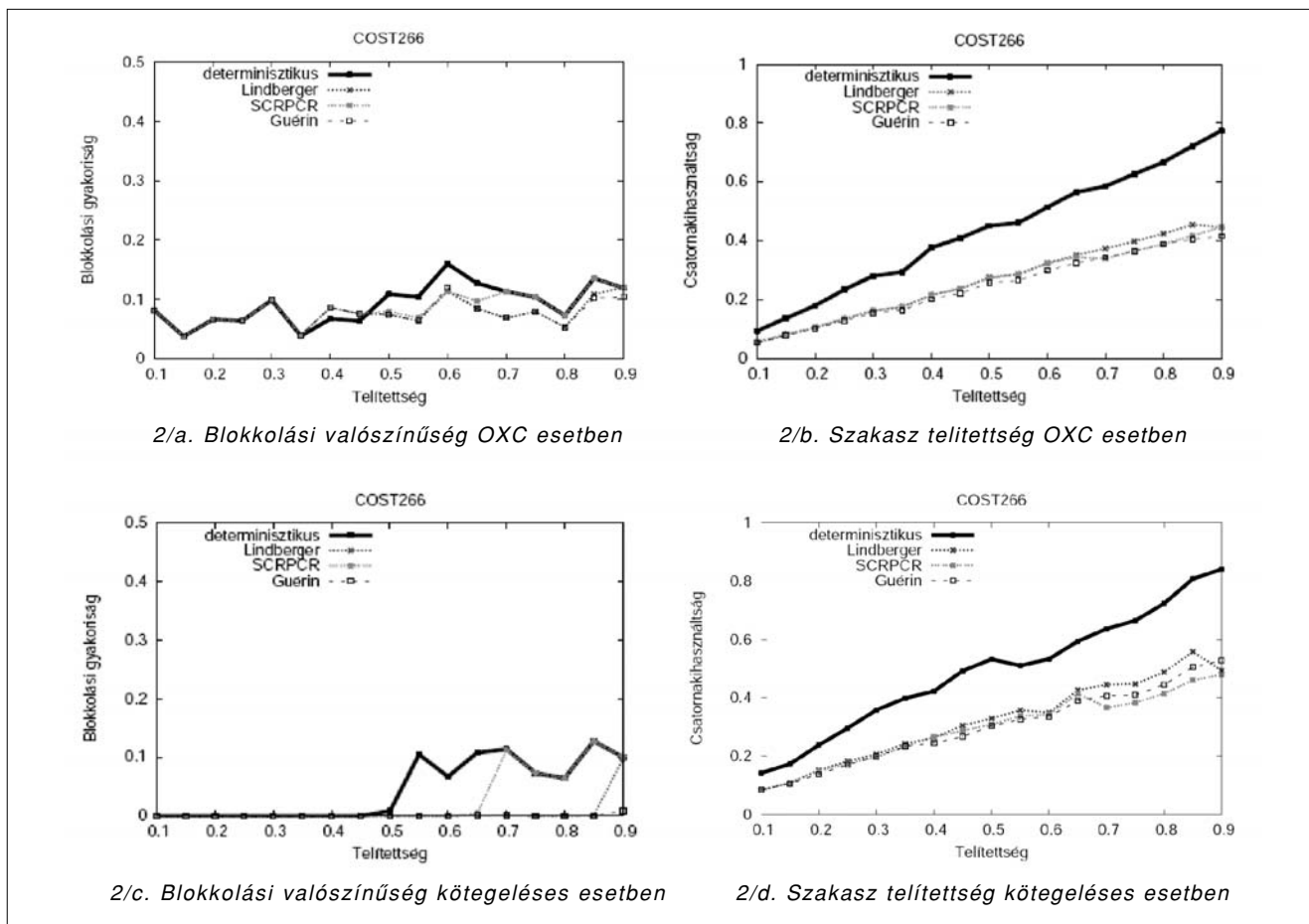
Minden forgalmi igényt hat paraméter írt le. A *forrás és cél* csomópontok határozzák meg az igény végpontjait. Végpont a topológia bármely csomópontja lehet. A hagyományos megközelítéssel szemben, az igény sávszélesség-igényét két paraméter, az *átlagos és a maximális méret* jellemzi. Determinisztikus nyálabolás esetén elegendő lenne a maximális méret is, de a többi modell esetén a másik paraméterre is szükség van. Az igény *belépési ideje* jelöl azt az időpontot, amikor a forgalmi igényt el kell vezetni. Az utolsó paraméter az igény *tartási ideje*.

3.3. Vizsgált paraméterek

Blokkolási valószínűség a hálózat működése szempontjából talán a legfontosabb jellemző. Azt mutatja meg, hogy a forgalmi igények közül mennyit tudott a hálózat kiszolgálni és mennyi maradt kiszolgáltatlanul. Ha a blokkolási valószínűség alacsony, akkor az adott hálózaton több igényt lehet átvinni, ami több bevételt eredményezhet.

Összeköttetések telítettsége (szakaszkihasználtság) azt mutatja meg, hogy mekkora az egyes hálózati összeköttetések átlagos terheltsége. Ez a paraméter az egyes eljárások hatékonyságának jó mércéje. Ugyanis, ha kevésbé kihasznált összeköttetések vannak a hálózatban, akkor azokon az éleken több forgalmat lehetne átvinni, így több igényt lehetne kiszolgálni. Ez egyúttal csökkentené a blokkolási valószínűséget is.

2. ábra Szimulációs eredmények



4. Eredmények, összefoglalás

A szimulációkat a két topológiák külön-külön végeztük el. Mindkét topológia esetén két alesetet határoztunk meg. Az első esetben a csomópontok OXC-k voltak, míg a második esetben a csomópontok kötegelési képességgel is rendelkeztek. Ebben a négy alesetben vizsgáltuk meg a blokkolási valószínűséget és csatornakihasználtságot. A forgalmak méretének és dinamikájának leírásához két jellemzőt vezettünk be: a forgalmi igény maximális sávszélesség paraméterének és a hálómhosszak kapacitásának arányát (telítettség); illetve az igények átlagos és maximális méretének az arányát (változékonyság). A következőkben a blokkolási valószínűséget és a szakaszkihasználtságot vizsgáljuk a két paraméter változásain keresztül. Mindkét topológián hasonló mérési eredményeket tapasztaltunk.

A következő szimulációk során az egyes forgalmi igények méretét változtattuk a csatorna kapacitásának 0,1-szereséről 0,9-szeresére. Továbbá feltételeztük hogy az igények maximális és átlagos sávszélességének aránya, azaz a változékonysága 2:1 (2. ábra).

Az ábrákról azt olvashatjuk le, hogy ha OXC csomópontok esetén (2/a), a négy nyalábolási modell szinte teljesen azonos blokkolási eredményt ér el. Ugyanakkor a becsült szakaszkihasználtság (load ratio) lényegesen eltér, és függ a aggregálási modelltől (2/b), de ez a szabad kapacitás kihasználatlanul marad. Ha azonban kötegelést is lehetővé tesszük, az aggregálási modellek között nagy különbség mutatkozik a blokkolási valószínűségek terén (2/c). Determinisztikus esetben a blokkolás 0, ha az igények mérete legfeljebb a fele a link kapacitásának. Ugyanakkor a legjobb teljesítményt nyújtó Guèrin-modell esetén 0 blokkolást mértünk, míg a telítettség a 0,9-t el nem éri. A szakasz kihasználtság (2/d) valamivel magasabb, mint OXC esetben, és az összes modell esetén visszaesés figyelhető meg. Ez egybeesik azzal a ponttal, amikor a blokkolási valószínűség 0-ról elmozdul. Ennek oka, hogy amikor a blokkolás hirtelen megnő, kevesebb igény marad a hálózatban, így kevesebb igény számára foglalunk erőforrást.

A fenti méréseket elvégeztük az igények különböző változékonysága mellett. Tapasztalataink azt mutatták, hogy a forgalom változékonyságát növelve a statisztikus multiplexálás egyre hatékonyabbá vált a determinisztikus nyalábolással szemben, ha volt kötegelés.

Megállapítható tehát, hogy OXC kapcsolók alkalmazása esetén nincs jelentős aggregációs nyereség, azaz, nem tudunk több forgalmat elvezetni a hálózatban. Ezzel szemben az igények kötegelésével a statisztikus multiplexálás alkalmazásával a blokkolási valószínűség lényegesen csökkent a vizsgált esetekben, emiatt több igényt tudtunk elvezetni.

A cikkben a forgalom kötegelésének és statisztikus multiplexálásának együttes hatását vizsgáltuk többretegű optikai gerinchálózatokban. Mivel nem célunk ezen eljárások teljes tárházának bemutatása, ezért kiválasztottunk négy megközelítést és azokat ismertettük.

A hálózat dinamikus viselkedését – a tanszéken fejlesztett eszköz segítségével –, szimulációkon keresztül vizsgáltuk. Ezek azt mutatták, hogy ha a forgalmakat nyaláboljuk (nem kötegeljük) a statisztikus multiplexálás nyeresége csak a lefoglalt kapacitás csökkenésében nyilvánul meg, a blokkolási gyakoriság nem változik. Emiatt a hálózatban több igényt elvezetni nem lehet.

Nyilvánvaló tény, hogy a forgalom kötegelése esetén az aggregáció a blokkolási valószínűségeket csökkenteni fogja, azonban annak nagysága kérdéses volt. A cikkben megmutattuk, hogy ez a különbség nagy lehet: például Guèrin-modelljét feltételezve, a hálózat 0,9 telítettségi (forgalmi igény maximális sávszélesség-igényének és egy csatorna méretének aránya) paraméter mellett kezd el blokkolni, míg determinisztikus multiplexelés esetén már 0,5-s érték esetén.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői ezúton szeretnének köszönetet mondani Szigeti Jánosnak és Hegyi Péternek a szimulátor alapváltozatának fejlesztéséért, valamint Geleji Gézának a perl nyelvű vezérlő szkriptekért.

Irodalom

- [1] B. Rajagopalan, J. Luciani, D. Awduche: „IP over Optical Networks: A Framework” IETF RFC 3717, <http://www.rfc-archive.org/getrfc.php?rfc=3717>
- [2] E. Modiano, P.J. Lin: „Traffic Grooming in WDM Networks”, IEEE Communications Magazine, Vol.39., No.7, pp.124–129, July 2001.
- [3] Cs. Gáspár, G. Makács, T. Cinkler: „WR-DWDM hálózatok konfigurálása”, Híradástechnika, Vol. LVIII., 2003/7, pp.2–9.
- [4] F. Kelly: „Notes on effective bandwidths,” in Stochastic Networks: Theory and Applications, F. Kelly, S. Zachary, I. Ziedins, Eds. Oxford University Press, 1996., pp.141–168.
- [5] S. Floyd: „Comments on measurement-based admissions control for controlled-load services,” beadva: CCR, 1996 július, <http://www.icir.org/floyd/papers/admit.ps>.
- [6] R. Guerin, H. Ahmadi: „Equivalent capacity and its applications to bandwidth allocation in high-speed networks”, IEEE Journal on Selected Areas Comm., Vol.9, pp.968–981., 1991. szeptember.
- [7] L. Noirie: „Mixed tdm and packet technologies as a best compromise solution to ensure a cost-effective bandwidth use with the current traffic evolution,” in Next Generation Internet Networks Conference (EuroNGI), Róma, 2005.
- [8] K. Lindberger: „Dimensioning and design methods for integrated ATM networks,” in Proceedings 14th Int. Teletraffw Congress 1994, pp.897–906.
- [9] Robert Inkret, Anton Kuchar, Branko Mikac: „Advanced Infrastructure for Photonic Networks”, Extended Final Report of Cost Action 266, <http://www.ure.cas.cz/dpt240/cost266/docs/COST266>