

Ütközésfeloldási stratégiák modellezése optikai hálózati kapcsolókban

KOZLOVSZKY MIKLÓS, BERCELI TIBOR

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, OMT Laboratórium
m.kozlovszky@ieee.org, berceli@mht.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: OPS, FDL, teljesítménymodell, szimulátor

Optikai csomagkapcsolást (OPS) végző teljesen optikai kapcsolók esetében komoly problémát jelent az azonos kimenetekre irányuló csomagütközések számának minimalizálása. Az ütközések feloldására több alternatív megoldás alkalmazható, melyek közül cikkünkben részletesen elsősorban az idő tartományban adódó lehetőségeket tekintjük át. A cikk bemutatja a kialakított – optikai késleltetőkből felépített – puffer struktúrákat, illetve azok analitikai modelljeit, melyek teljesítményjellemzőit szimulációkkal megvizsgáltuk. Ezt követően bemutatásra kerül a szimulációkhoz kifejlesztett – az OMNET++ diszkrét-esemény-szimulátor keretrendszeren alapuló – NSOSS optikai kapcsoló modul, majd beszámolunk a különböző konfigurációkon végzett méréseink eredményeiről, illetve az ezekből származtatott egyenletekről.

1. Bevezetés

Az optikai csomagkapcsolás (OPS) működése hasonló a hagyományos (elektromos jelekkel üzemelő) már megvalósított csomagkapcsolással.

Az optikai csomagkapcsolt hálózatok működésüket tekintve lehetnek réselt (konstans csomagméretű) vagy nem réselt (változó csomagméretű) hálózatok. Cikkünkben a konstans csomagméretű megoldásokat vizsgáljuk. Optikai csomagkapcsolással elméletileg legalább két nagyságrendnyi kapacitásnövekedést lehet elérni, ellentétben a hagyományos elektromos jeleket továbbító megoldásokkal.

Az elérhető jelentős növekedés több okra vezethető vissza:

1. A teljesen optikai hálózatok optikai elemeiben napjaink gyakorlatával szemben nem kerül sor optikai-elektromos-optikai (O-E-O) jelkonverzióra. A csomag a hálózat teljes hosszában optikai jel formájában halad át, emiatt a gyakori jelkonverzió okozta **ms** nagyságrendű késleltetések elkerülhetők.
2. OPS alkalmazása esetén a beérkező adatforgalom multiplexálása miatt nagyobb hálózati kihasználtságot lehet elérni a jelenleg elterjedten használt optikai vonalkapcsolt, illetve Optical Burst Switching (OBS) alapú megoldásokkal szemben.

A megnövekedett hatékonyságnak a nyilvánvaló számos előny mellett azonban ára van, ugyanis megjelenik a csomagkapcsolt hálózatok esetében jól ismert csomagütközési probléma. Ütközésnek a szakirodalomban azt a jelenséget nevezzük, amikor két csomag ugyanazon az útvonalon (port/hullámhossz) próbálna egyszerre áthaladni, ami ilyen esetben a fizikai jelek torzulását jelentené. Cikkünkben a „port” szót használjuk a hálózati csatlakozók általános fogalmi megnevezésére. Ütközésfeloldás optikai jelek esetében történhet az alábbi módokon:

- hely/port szinten: terhelés átirányítása kevésbé terhelt útvonalra [1]
- hullámhossz tartományban: átirányítás kevésbé terhelt hullámhosszra, azonos porton
- időtartományban: a csomag ideiglenes várakoztatása az ütközés feloldódásáig.

Az optikai jeltárolás jelenlegi technológiai szintünkön meglehetősen költséges és nehezen kivitelezhető. Az optikai jel terjedési sebességét jelenleg csak szűk tartományban lehet befolyásolni, és az optikai RAM-ok hiánya is komoly problémát jelent.

A kísérleti stádiumban lévő jelterjedést lassító megoldások néhányszor 10 **ns** időtartományt, valamint maximum néhány bit mennyiségű optikai jelnek megfelelő adatot tudnak kezelni [2-5]. A jelenlegi hálózatokban viszont általánosságban 1500 bájtos csomagok, illetve 250-300 **ns** időtartományú késleltetésekre lenne szükség, ami nagyságrendekkel meghaladná a jelenlegi hálózatok és technológiák segítségével elérhető maximális értékeket.

A napjainkban használt közepes és nagy optikai csomagméretek kezelését optikai késleltető vonalak (FDL/ODL) segítségével lehet megvalósítani. Az optikai késleltető vonalak/üvegszálhurok megoldások úgy működnek, hogy a „tárolás” ideje alatt egy kellően méretezett szálköteget utaztatják a tárolandó csomagot. A tárolási idő az üvegszálhurok hosszával szabályozható, amely nyilvánvalóan igen helyigényes megoldást jelent a fény haladási sebességéből adódóan. Ezen egységek optimális méretezése, illetve az ezekből építhető késleltető struktúrák vizsgálata elengedhetetlen a nagysebességű, teljesen optikai (40-100 GB) DWDM rendszerek kapcsolóinak tervezésénél, melyhez az általunk készített OMNET++ [6] keretrendszeren alapuló NSOSS szimulátor a tervezés és a méretezés munkafázisaihoz jól használható adatokat biztosít.

A megvalósított aszinkron optikai kapcsoló szimulátor (NSOSS – Non-Synchronized Optical Switch Simulator)

modellezi a többportos/több hullámhosszal rendelkező DWDM kapcsoló modul működése során keletkező ütközési eseményeket, valamint a változtatható szimulációs paraméterek segítségével pontos képet nyújt a kapcsolórendszer teljesítményéről és a különböző FDL struktúrák működési sajátosságairól, valamint kihasználtságáról.

Cikkünk első részében részletesen bemutatjuk a megvizsgált tároló struktúrákat, valamint a létrehozott NSOSS szimulátort. Ezt követően bemutatjuk az NSOSS-ben különböző konfigurációkon végzett méréseink eredményeit, illetve az ezekből származtatott egyenleteket, majd cikkünk végén levonjuk a végkövetkeztetéseket.

2. Ütközésfeloldási stratégiák

2.1. Puffer struktúra modellek

A komplex, FDL-ekből felépített optikai tárolókat alapstruktúrájuk alapján két főbb kategóriába sorolhatjuk (az egyes struktúrák fogalmainak bevezetésekor a teljes megnevezés után zárójelben feltüntetjük a szövegben későbbiekben használatos rövid hivatkozási nevet is):

1. Sorbakapcsolt optikai tároló struktúrák (TOBS)
2. Párhuzamosan kapcsolt optikai tároló struktúrák (POBS)

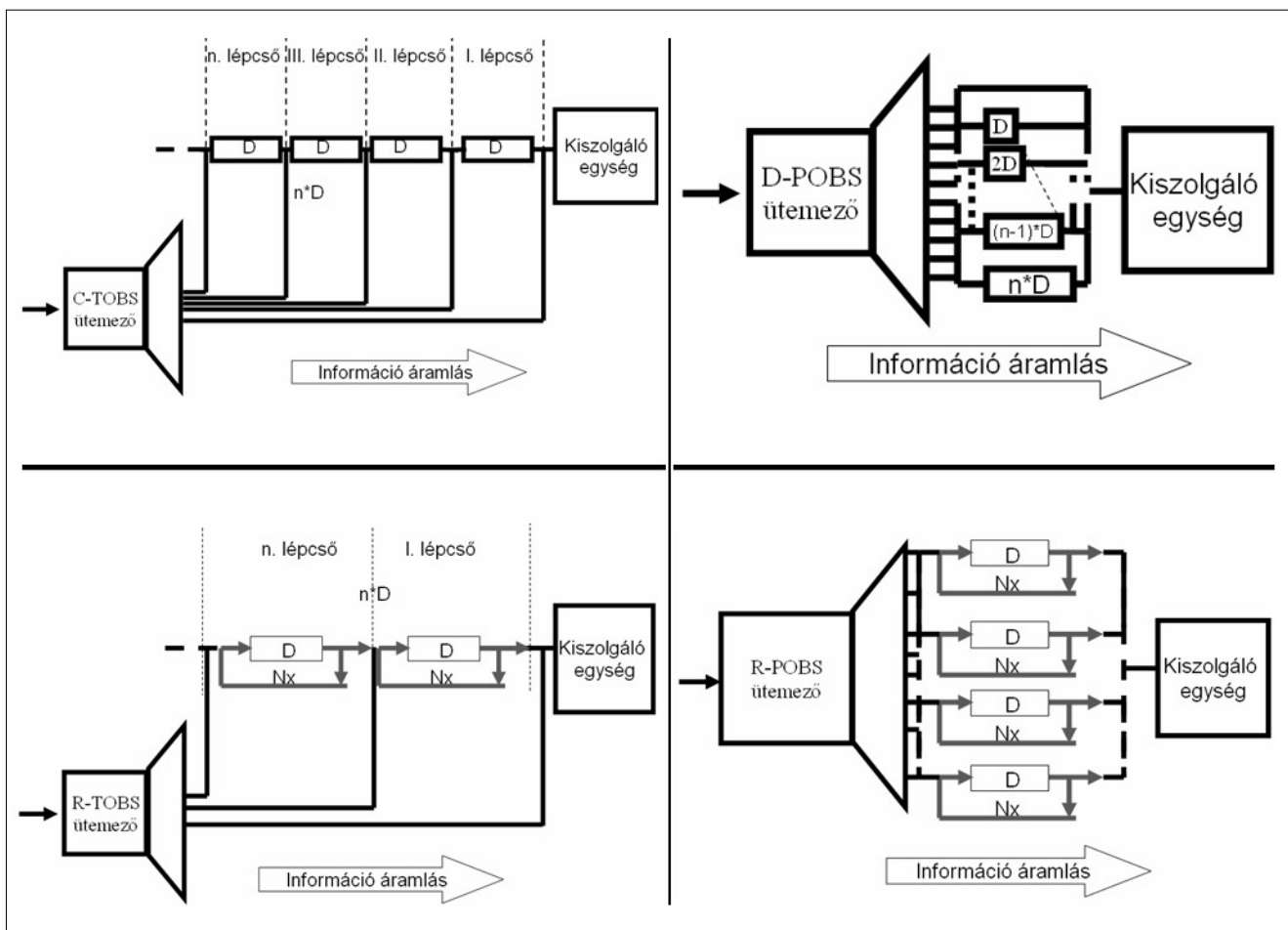
Ebben a cikkben a homogén TOBS és POBS struktúrákra fókuszálunk, mindazonáltal meg kell itt említenünk, hogy FDL-ekből kialakíthatók heterogén struktúrák is, ezek gyakorlati jelentősége azonban nem számottevő, így hely hiányában később sem térünk ki ezekre részletesen. A struktúrákat felépítő alkotóelemek jellegüket tekintve lehetnek passzív, illetve aktív típusúak (1. ábra). Ezen építőelemek esetében különbséget kell tennünk időzítésük, irányításuk alapján aktív (decentralizált) és passzív (centralizált) megoldások között.

2.1.1. Passzív struktúrák

Alapvetően kétféle passzív típusú struktúrát vizsgáltunk részletesebben: konstans pufferekből és degenerált [7] típusú pufferekből felépítettek. Passzív pufferek esetében a csomagidőzítőnek folyamatosan pontos képpel kell rendelkeznie minden egyes passzív puffer állapotáról, valamint az esetleg kialakuló várakozási sor hosszáról. Méréseinkhez optimalizált csomagidőzítési stratégiákat készítettünk soros, illetve párhuzamos struktúrákhoz egyaránt.

1. C-TOBS – Konstans puffer, soros optikai puffer struktúra elrendezésben. Ez a struktúra a legegyszerűbb optikai pufferstruktúra. Az egyes pufferek sorban egymáshoz vannak kapcsolva, és mindegyik konstans késleltetési idővel rendelkezik.

1. ábra Különböző optikai késleltető struktúrák megvalósításai (C-TOBS, D-POB, R-TOBS, R-POBS) [12]



2. D-POBS – Degenerált puffer, párhuzamos optikai pufferstruktúra-elrendezésben.

A struktúrában az egyes pufferek párhuzamosan egymáshoz kötöttek. Az egyes FDL-ek az alapkésleltetési idő (D) egészszámú többszörösével (2D, 3D) teszik lehetővé az ütközésfeloldást.

Csomagok időzítése passzív elemekből felépített késleltető struktúrák esetén könnyen automatizálható, ehhez megfelelő pontosságú központi időzítők használata szükséges.

2.1.2. Aktív struktúrák

Vizsgálatainkat kiterjesztettük az aktív pufferstruktúrákra is, melyek közül hasonlóan a passzívakhoz kétféleképp vizsgáltunk meg részletesebben. Az aktív struktúrákat visszahurkolt optikai pufferek építik fel, melyeket az alábbi, elterjedten használt struktúrákba rendezhetünk:

1. R-TOBS – Visszahurkolt pufferekből épített soros optikai tárolóstruktúra. A struktúra speciálisan visszahurkolt optikai pufferek láncszerűen sorba-kapcsolt elrendezését jelenti. E struktúrák esetén a jelcsillapítás komoly felső korlátot jelent.
2. R-POBS – Visszahurkolt pufferekből felépített párhuzamos optikai tárolóstruktúra [8], mely speciálisan visszahurkolt optikai pufferek párhuzamos összekapcsolását jelenti.

Az FDL-ből összeállított aktív pufferek passzív társakkal ellentétben (nevük is innen származik) rendelkeznek saját irányítással. Bár az egyes pufferek mérete konstans, mivel az optikai jel visszahurkolható, a puffer ideális körülmények között tetszőleges mértékben „újrafelhasználhatónak” tekinthető. A visszahurkolások maximális számát, az optikai jel visszahurkolások során elszenvedett csillapításának/torzulásának mértéke határozza meg, melyet csillapítás néven rendszerparaméterként beépítettünk a szimulátorba.

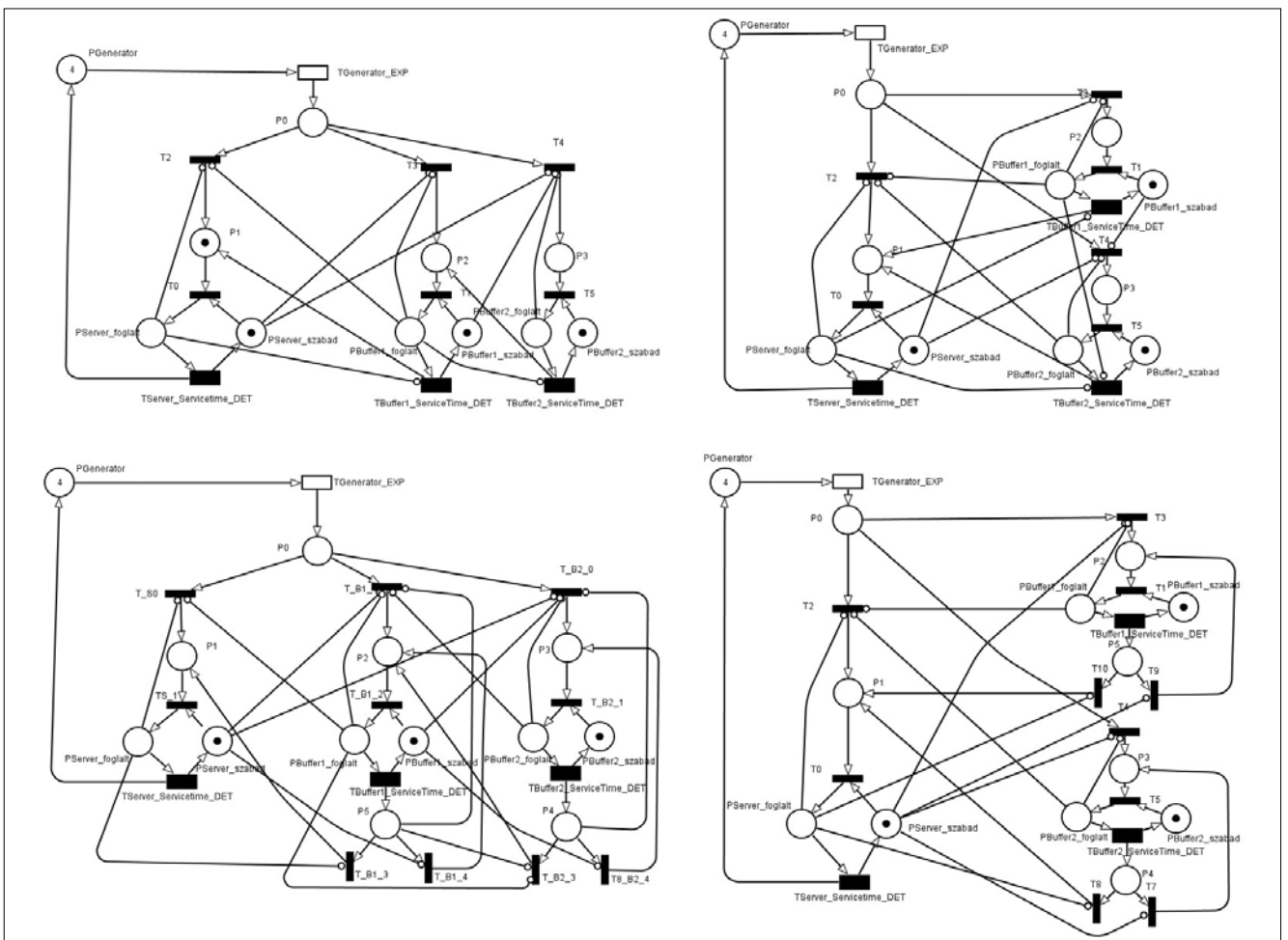
A hurkolást tartalmazó pufferek alkalmazása komoly feltételeket támaszt a rendszerrel szemben, ugyanis a csomagméret a rendszerben felülről limitált, vagyis maximális értéke nem haladhatja meg a legkisebb hurok méretét.

A megfelelő csomagidőzítés aktív decentralizált kommunikációt és vezérlést igényel az egyes struktúraelemek között, melynek megvalósításához komplex elektronika szükséges.

2.2. Pufferek Petri-hálón alapuló modelljei

A Petri-hálók (Petri Net/PN) nevüket, az 1960-as években Carl Adam Petri-ről kapták, aki ezidőtájt diszkrét elosztott rendszerek grafikus és matematikai ábrázolásával foglalkozott.

2. ábra A vizsgált késleltető struktúrák Petri háló modellje (a, C-TOBS; b, D-POBS; d, R-TOBS; e, R-POBS)



A Petri-hálókat felépítő főelemek: a helyek (jelölésük kör), átmenetek (jelölésük téglalap), az irányított élek (jelölésük nyíl), súlyok, valamint az egyes helyek között mozgó „tokenek”. Az élek kötik össze a helyeket az átmenetekkel és megfordítva, ugyanakkor két hely, illetve két átmenet nem kapcsolódhat össze közvetlenül. A Petri-háló irányított, súlyozott, páros gráfok. Az egyes helyeken tetszés szerint bármennyi token előfordulhat. A tokenek helyváltoztatása a helyhez kapcsolódó átmenet úgynevezett „tüzelésekor” következhet be. Tüzelés akkor történhet, ha az átmenethez vezető élek mindegyikén a „tüzelési” feltétel teljesül.

Matematikai reprezentációja: $PN=(P, T, E, W, M_0)$, ahol $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ a helyek halmazát, $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ az átmenetek halmazát, E az élek halmazát, W a súlyfüggvényeket, M a token eloszlást, valamint M_0 a kezdeti token eloszlást jelölik. A Petri-háló elemkészlete az évek során kibővült. Az egyes késleltető pufferek Petri-hálóhoz a sztochasztikus rendszerek leírására használatos DSPN szimbólumokat (fehér téglalap = EXP, fekete vastag téglalap = DET, fekete vékony téglalap = azonnali átmenet), illetve a tiltó élet (vonal végén fehér kör) használjuk. A 2. ábrán látható a szimulációk során felhasznált puffer struktúrák megvalósítása Petri háló segítségével. A modellek elkészítéséhez a TimeNET eDSPN analízis csomagját használtuk fel [9].

3. Az NSOSS Szimulátor

Az OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++) diszkrét esemény-szimulátort használtuk fel futtatási és fejlesztői környezetként az NSOSS szimulátor kialakításánál. A szoftveresen megvalósított aszinkron optikai kapcsoló-szimulátor (NSOSS) belső kapcsolóegységként képes működni egy DWDM alapú, kimeneti sorokat kezelő, teljesen optikai kapcsolóban. Támogatja mind 40 Gbit/s, mind pedig 100 Gbit/s vonali sebességeket. A szimulátor működése során feltételezi, hogy minden lényeges csomagmódosítás (például címkecsere/címkekapcsolás) már azelőtt sikeresen megtörtént, hogy a csomag a szimulátorba került. Ez nem jelentős egyszerűsítés, hiszen ilyen megoldással élt több nagy optikai kapcsolórendszer tervezését és megvalósítását sikeresen végrehajtó projekt, mint például KEOPS [10], vagy később a LABELS [11] (3. ábra). A réselt csomagkapcsolt optikai hálózatokban fontos a megfelelő szinkronizáció kérdése, melyet a szimulátor az úgynevezett „guard time”-ok – az időrés határai között 40 Gbit/s-es esetén 20 ns – használatával támogat.

3.1. NSOSS szimulátor építőelemei

A kialakított NSOSS szimulátor nagyszámú optikai építőelemet tartalmaz, többek között: optikai csomagforrásokat és nyelőket, hangolható hullámhossz-átalakítókat, különböző késleltető pufferstruktúrákat, valamint speciális beállítási lehetőségeket, úgymint: változtatható csomagméret, aszinkron csomagkezelés, nem- nulla hangolási idejű hullámhossz-konverterek használata.

Ahhoz, hogy részletesen feltárhassuk a teljesen optikai alapokon működő hálózati kapcsolóban rejülő optimalizációs lehetőségeket, az alapvető építőelemek mellett elkészítettünk többféle (és többszintű) ütemezési stratégiákat, ezekhez tartozó specifikus ütemezési algoritmusokat (C-TOBS/D-POBS/R-TOBS/R-POBS), valamint magasabb szintű ütközésfeloldási technikákat.

4. Diszkrét esemény-szimulációk

Terjedelemi korlátok miatt cikkünkben csak néhány fontosabb teljesítményjellemzőt vizsgálunk, a szimulátor képességeit bizonyító további eredmények (pufferek, illetve hangolható hullámhossz konverterek méretezése stb.) olvashatók az irodalomban [12,13]. Minden szimulációnál 10 független futtatás lett megvalósítva, melyeknél különböző véletlen számmagok (seed-ek) lettek felhasználva. A felhasznált pseudo-véletlen számokat a „Mersenne Twister” véletlenszám-generátorral állítottuk elő [14], mely az OMNET++ beépített része.

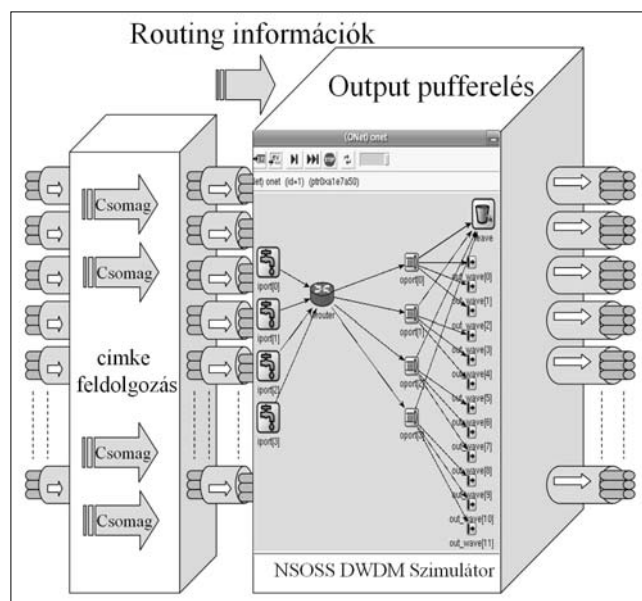
4.1. Szimulációk egyetlen hullámhosszal

Egyetlen hullámhosszat használó szimulációk esetén az egyes rendszerparaméterek hatását vizsgáltuk a teljesítmény függvényében, úgymint: késleltető struktúrák és a teljesítmény közötti összefüggések, valamint a csomagméret, illetve a pufferek számának hatása a rendszer teljesítményére.

4.1.1. A különböző késleltető struktúrák teljesítmény-analízise

Konstans pufferméreteket használtunk a mérések során (a fix méretű csomagkiszolgálási idejével meg egyezőt). Általánosságban elmondhatjuk, hogy a puffer nélküli rendszer teljesítménye a teljes csatornkapacitás 50%-a körül mozog.

3. ábra
Ütközésfeloldás az NSOSS DWDM optikai kapcsoló szimulátorral [12]



A kapott eredményekből (4. ábra) látszik, hogy az aktív pufferekből felépített struktúra (R-POBS) messze a legjobb áteresztőképességgel rendelkezik a többi struktúrához képest. Passzív pufferek esetén a soros optikai struktúra jelentősen jobb teljesítményt biztosít, mint a degenerált pufferekből megvalósított párhuzamos struktúra.

4.1.2. Hasznos csatorna kapacitás a pufferszám függvényében

Fontos eredmény, hogy már egyetlen puffer esetén is közel 10%-os teljesítményjavulást érhetünk el a puffermentes rendszerhez képest. Kiszámú (kettő már megfelelő) visszahurkolt puffer használata esetén a puffer nélküli, valamint a passzív pufferekkel kialakított struktúrák teljesítményénél jobb eredmények érhetőek el.

Az alpméréseknél fix (1500 bájtos) csomagméretet használtunk. A teljesítménygörbék karakterisztikájának pontosításához széles puffer spektrumot (1-100 dedikált puffer) vizsgáltunk. Az alábbiakban megadjuk a különböző dedikált puffer struktúrákra kapott teljesítmény egyenleteket.

C-TOBS

$$P_{C\text{TOBS}} = f(x) \Rightarrow y = \frac{-4.7x \text{Log}[x] + 682.5x - 95.6}{10x} \quad (1)$$

D-POBS

$$P_{D\text{POBS}} = f(x) \Rightarrow y = \frac{-2.38x \text{Log}[x] + 651.5x - 64.8}{10x} \quad (2)$$

R-TOBS

$$P_{R\text{TOBS}} = f(x) \Rightarrow y = \frac{55.1x \text{Log}[x] - 3.7x^2 + 759.7x - 107}{10x} \quad (3)$$

R-POBS

$$P_{R\text{POBS}} = f(x) \Rightarrow y = \frac{62x \text{Log}[x] - x^2 + 748x - 96}{10x} \quad (4)$$

ahol az egyenletekben x jelenti a struktúrában lévő pufferek darabszámát.

4.1.3. Teljesítményváltozás a csomagméret függvényében

A méréseket az 1500 bájttal mellett több fix csomagméret esetén is elvégeztük (3 KB, 4.5 KB, 8 KB, 9 KB, 16 KB) a kapott eredményekből a használt csomagméretek, illetve puffer mennyiségek alapján az alábbi eredményeket kaptuk:

$$P = \text{Log} \left[\frac{(L_K - L_D)}{L_D} * \Delta P_{C/D/RxOBS} \right] + R_{C/D/RxOBS} \quad (5)$$

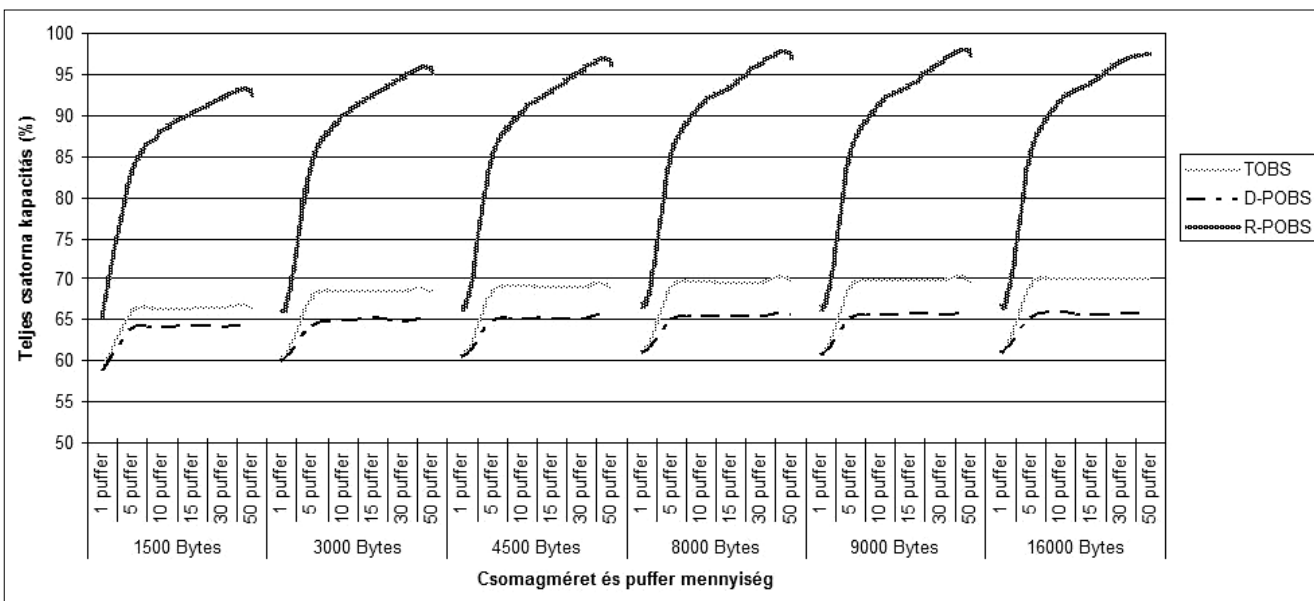
ahol L_K az új csomagméret, L_D az alapértelmezett csomagméret (1500 bájttal), $R_{C/D/RxOBS}$ az 1500 bájton megfigyelt teljesítményegyenlet (behelyettesítve a megfelelő pufferszámmal), valamint $\Delta P_{C/D/RxOBS}$ az egyes puffer struktúrákhoz rendelt tapasztalati konstans, melyek értékét az 1. táblázatban foglaltunk össze.

Az egyenletek ajánlott használati tartománya pontosság szempontjából 1-25 pufferig terjed hullámhosszszanként (annak ellenére, hogy a szimulációs méréseket nagyobb tartományra végeztük). Ez az érték biztonságos ráhagyást jelent a valós rendszerekben használt/tervezett pufferek számához képest.

5. Összefoglalás

Cikkünkben definiáltunk, modelleztünk, valamint részletesen elemeztünk különböző optikai késleltető pufferstruktúra-modelleket. Bemutattuk az általunk kifejlesztett aszinkron optikai kapcsoló-szimulátort (NSOSS), melynek segítségével számos szimuláció végezhető OPS hálózati eszközök ütközésfeloldásának vizsgálatához. A szimulátorral folytatott mérésekből kiderült, hogy az aktív késleltető pufferekből felépített struktúrák hatéko-

4. ábra Különböző puffer struktúrák teljesítménye egyetlen hullámhossz esetében



Puffer struktúra	$\Delta P_{C/D/RxOBS}$
C-TOBS	$6.29654e^{-0.74} x^{-0.1}$
D-POBS	$\frac{2.58571e^{0.18} x}{x^{0.047}}$
R-TOBS	$0.139457e^{\frac{2.55}{x} + 0.07x} x^{1.59}$
R-POBS	$e^{\frac{1}{5} + \frac{0.41}{x}} x^{0.65}$

1. Táblázat

$\Delta P_{C/D/RxOBS}$ értékei különböző puffer struktúrák esetén

nyabbak a passzív elemekből felépülőknél. A vizsgált pufferstruktúrákhoz fix csomagméretek használata mellett megadtuk a teljesítményegyenleteiket. Az elkészített NSOSS szimulátor segítségével kapott eredmények leegyszerűsítik a teljesen optikai csomagkapcsolt hálózati berendezések FDL-eken alapuló pufferstruktúráinak méretezési problémáit.

Irodalom

[1] M. Baresi, S. Bregni, A. Pattavina, G. Vegetti, Deflection Routing Effectiveness in Full-Optical IP Packet Switching Networks, ICC'03, IEEE, pp.1360–1364., 2003.

[2] Rodney S. Tucker et al., „Slow-Light Optical Buffers: Capabilities and Fundamental Limitations”, J. of Lightwave Techn., Nr.23, pp.4046–4065., 2005.

[3] Connie Chang-Hasnain et al., „Variable Optical Buffer Using Slow Light in Semiconductor Nanostructures”, Proc. IEEE, Vol. 91., Nr.11, pp.1884–1897., 2003.

[4] G. Lenz et al., „Optical delay lines based on optical filters”, IEEE J. of Quant. Electron., Vol. 37., Nr.4, pp.525–532., 2001.

[5] Mehmet F. Yanik et al., „Stopping light all optically” Phys. Rev. Letters, Vol. 92., Nr.8, 83901-1-83901-4 (2004).

[6] Andras Varga, The OMNeT++ Discrete Event Simulation System, In the Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001), Prague, Czech Republic, June 2001.

[7] L. Tancevski, L.S. Tamil, F. Callegati, Non-degenerate buffers: A paradigm for building large optical memories, IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 11., Nr.8, pp.1072–1074., August 1999.

[8] K. Merchant et al., Analysis of an Optical Burst Switching Router with Tunable Multiwavelength Recirculating Buffers, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 23., Nr.10, pp.3302–3312., October 2005.

[9] A. Zimmermann, J. Freiheit, R. German, G. Hommel, Petri Net Modelling and Performability Evaluation with TimeNET 3.0, 11th Int. Conf. on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation (TOOLS'2000), LNCS 1786, pp.188–202., ISBN 3-540-67260-5. Springer-Verlag, Schaumburg, Illinois, USA, 2000.

[10] P. Gambini et al., Transparent optical packet switching: Network architecture and demonstrators in the KEOPS project, IEEE J. Select Areas in Communication, 1998.

[11] A. Martinez et al., Recent Advances on Optical Label Swapping Techniques: An Approach to the Final Results of IST-LABELS Project, Transparent Optical Networks, 2006 International Conference on Volume 3, pp.51–56., June 2006.

[12] M. Kozlovsky, T. Berceli, G. Kovács, V. Kozlovsky, Measurements on optical buffering models made from fiber delay lines, 12th Microcoll Conference, Budapest.

[13] M. Kozlovsky, T. Berceli, V. Kozlovsky, Ütközésfeloldási stratégiák teljesen optikai alapú hálózati kapcsolók esetében, Tavaszi Szél 2007 Konferencia, Budapest.

[14] M. Matsumoto, T. Nishimura, Mersenne Twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, ACM Trans. Model. Comp. Simul., Vol.8., Nr.3, 1998.