

# Multicast és forgalomkötegelés többrétegű hálózatokban

SOPRONI PÉTER, PERÉNYI MARCELL, CINKLER TIBOR

{soproni, perenyim, cinkler}@tmit.bme.hu  
BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Lektorált

**Kulcsszavak:** optikai multicast, WDM, ILP

Cikkünkben a multicast forgalomelvezetés hatékonyságát vizsgáljuk optikai WDM (Wavelength Division Multiplexing) hálózatokban. Összehasonlítjuk az unicast és a multicast elvezetés költségeit. Új hullámhossz-gráf modellt vezetünk be olyan kapcsoló eszközök megjelenítésére, melyek képesek tisztán optikai hullámhossz elágaztatásra. Megvizsgáljuk az elektromos és az optikai osztás költségeit. Megmutatjuk a multicast jó skálázhatóságát az unicast-tal szemben. A forgalomelvezetési és technikai követelményeket ILP segítségével írjuk fel, és egy szimulátorban meg is valósítjuk.

## 1. Bevezetés

Az Internet alapú eszközök mind szélesebb körű elterjedésével az átviteli hálózatok terheltsége folyamatosan és jelentősen nő. Idővel a szolgáltatók nem lesznek képesek, illetve hajlandók a növekedést csak a hálózat átbecsátóképességének növelésével kezelni. Az igények egy jelentős része azonban felfogható, mint *multicast* (egy pont-több pont) igény a hagyományos *unicast*-tal (pont-pont) szemben. Ebbe a csoportba tartoznak, olyan napjainkban egyre inkább terjedő szolgáltatások, mint a műsorszórás, műsor szétosztás (például IP-TV, IP-Rádió), vagy a VoD (Video on Demand). A többes adás főleg olyankor előnyös, ha olyan nagy sáv szélességű igényekről van szó, mint például digitális TV csatornák eljuttatása a központból a helyi szolgáltatókhoz. További alkalmazási lehetőségeket az [1] mutat be.

Számos munka született multicast forgalomelvezetés optimalizálásáról optikai gerinchálózatokban. Madhyashta és társai [2] egy heurisztikus módszert fejlesztettek ki multicast igények elvezetésére gyűrű topológiájú WDM hálózatokban. Emellett javaslatot tettek egy új, elektromos vagy optikai *Drop and Continue* (DaC) képességgel rendelkező csomópont-modellre. A [3] cikk szerzői – ezzel szemben – egy analitikus megközelítést javasoltak a kötegelési probléma megoldására nemlineáris programozás alkalmazásával. Az így kapott eredményeket heurisztikus módszerekkel hasonlították össze. A [4] cikk több heurisztikus multicast fatervező algoritmust hasonlít össze. A szerzők olyan hálózatot feltételeztek, ahol a csomópontoknak csak egy része képes hullámhosszak elágaztatására. Az [5] szerzői heurisztikus algoritmust javasoltak dinamikus multicast fák létrehozására és karbantartására kötegelésre képes optikai hálózatokban. Yang és szerzőtársai [6] ILP formalizmus segítségével oldották meg az optimális elvezetés és hullámhossz hozzárendelés problémáját. Megmutatták, hogy a multicast igények akkor is hatékonyan elvezethetők, ha a hálózat viszonylag kevés hullámhossz-konvertáló és -osztó esz-

köz tartalmaz. Két további heurisztikus optimalizáló algoritmus olvasható [7]-ben. Ezek célja a lefoglalt hullámhosszok számának minimalizálása a hálózatban. A szerzők célja olyan módszer kifejlesztése volt, mely a QoS (Quality of Service) forgalom-elvezetés és az optimális hullámhossz-hozzárendelés problémáját egyszerre oldja meg.

## 2. A probléma megfogalmazása

Kétrétegű hálózatot tételeztünk fel: a felső, elektronikus réteg időosztásra, míg az alsó, optikai réteg hullámhossz-kezelésre képes. Az elektronikus réteg forgalomkötegelést is végezhet, tehát több, alacsony sáv szélességű igény fogható össze (multiplexálás) egyetlen hullámhossz csatornába. A két réteg a *peer* (társ, vertikálisan összekapcsolt) modell szerint működik együtt. Ennek megfelelően – az elvezetés során – a vezérlő sík számára mind az elektronikus, mind az optikai réteg állapotinformációi rendelkezésre állnak. Ez lehetővé teszi, hogy mindkét rétegre kiterjedő optimális megoldást találjunk. Természetesen az eredmények az *overlay* (átfedő) vagy *augmented* (hibrid) modell szerint összekapcsolt rétegekre is kiterjeszhetők.

A hálózati topológiát, az összeköttetéseket alkotó szálak számát és a forgalmi igények leírását előre ismertnek tekintjük. Emellett a használható hullámhosszak számát, azok kapacitását, illetve az forgalomelvezetés elemeinek költségeit (például térkapcsolás, O/E konverzió) is rögzítettnek vesszük.

Feltételezésünk szerint minden igény statikus és multicast vagy unicast típusú. Az unicast igények adott sáv szélességgel, forrás és nyelő csomóponttal rendelkeznek, míg multicast igények esetén több cél is lehetséges. Minden igényre megfogalmazhatunk úgynevezett technikai megkötéseket is (például útvonal hossza). A feladat, hogy minden igény számára annak forrása és nyelő(i) között egy dedikált kapcsolatot hozzunk létre, az esetleges technikai megkötések betartása mellett.

### 3. Hálózati modell

A lehető legáltalánosabb hálózati modellt kívántuk használni. A modellel szemben megköveteltük, hogy alkalmazható legyen kötegelésre képes, két rétegű hálózat esetén, támogassa a peer modell használatát és a különböző tulajdonságú hálózati kapcsolóeszközök képességei megjeleníthetők legyenek. Szintén fontos volt, hogy minden hálózati topológiára alkalmazható legyen. Mindezeket figyelembe véve a *hullámhossz-gráf (WLG)* reprezentációt választottuk a fizikai hálózat modellezésére. A WLG egyértelműen származtatható a hálózati topológiából és a hálózatot alkotó kapcsoló-berendezések képességeiből.

A modell egy egyszerűbb változatát a [8] mutatja be. A statikus unicast igények WLG-ban történő elvezetésének ILP alapú megfogalmazása a [9]-ben olvasható. Ugyanezen cikk az igények védelmével is foglalkozik.

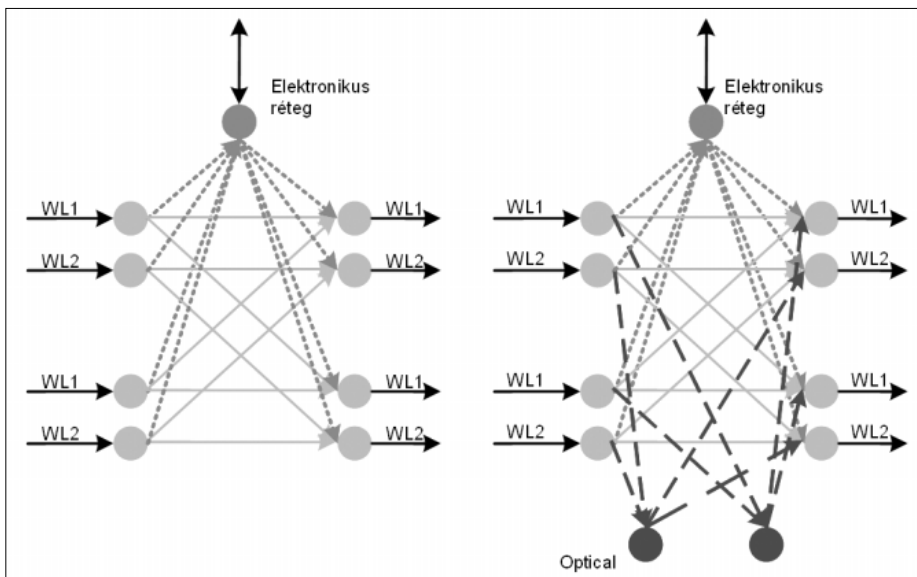
Számos eltérő típusú hálózati kapcsolót különböztethetünk meg: *Optical Add-and-Drop Multiplexers (OADM)*, *Optical Cross-Connect (OXC: optikai maggal)*, *Opto-Electrical Cross-Connect (OEXC: elektronikus mag)*, melyek teljes vagy részleges, illetve tiszta optikai vagy elektronikus hullámhossz konverziót támogathatnak. Az eszközök egy része kötegelésre is alkalmas lehet. Ezek a képességek a hullámhossz-gráfokban egyszerűen figyelembe vehetők.

A hálózatot kapcsolóeszközök és összeköttetések (optikai szálak) alkotják. Egy kapcsoló-berendezés egy belső kapcsológépből és interfészekből áll, melyekhez optikai szálak kapcsolódhatnak. Egy szálban az adatátvitelre használható hullámhosszok száma a kábel tulajdonságaitól és a csatlakozó interfészek képességeitől függ. Minden összeköttetés és eszköz – a típusától függő – egyedi logikai reprezentációval rendelkezik a WLG-ban.

Egy fizikai összeköttetés annyi éllel jeleníthető meg a WLG-ban, ahány hullámhossz használható átvitelre. Egy kapcsoló-berendezés logikai reprezentációja a képességeitől függ. Minden egyes él rendelkezik kapacitással és használati költséggel. Az él kapacitása általában a hullámhossz-kapacitással egyenlő, ami a használt vivőtől függ: például 2.5 Gb/s, 10 Gb/s (a szimulációkban az alacsonyabb értéket tételeztük fel).

Egy él használatának költsége annak funkciójától függ (O/E konverzió, térkapcsolás, hullámhossz él). Hullámhossz reprezentáló élnél a költség függhet a szál hosszától (km).

1. ábra  
Az OXC-WL (balra)  
és az – optikai osztásra képes –  
OXC-WO (jobbra)  
eszköz részgráfja a WLG-ban



Minden hálózati kapcsolót egy részgráf reprezentál, mellyel az eszköz összes interfészét és az eszköz belső kapcsoló képességét is modellezzük. A hullámhossz-gráf – kiegészítve a későbbiekben bemutatásra kerülő ILP megfogalmazásokkal – lehetőséget biztosít a különböző képességű fizikai eszközök leképezésére, még akkor is, ha azok egy adott hálózatban egyszerre vannak jelen. A modell könnyen kiterjeszthető, fejleszthető. Az egyes eszközök képességeinek változása könnyen követhető új részgráf típusok bevezetésével.

Egy összetett eszköz részgráfját mutatja az 1. ábra (balra). Az eszköz egyszerre rendelkezik egy OXC és egy OADM képességgel: lehetőség van igények indítására, végződtetésére, illetve hullámhossz-konverzióra és kötegelésre. Hullámhossz-elágaztatásra csak az elektromos rétegen keresztül van mód. Az elektromos réteget egyetlen csomópont reprezentálja. A többi csomópont pár interfészt reprezentál.

Az ábrán látható eszközök két bejövő és két kimenő interfésszel rendelkeznek, melyek mind két hullámhosszt támogatnak. Cikkbéli szimulációink során ezt az eszközmódot, illetve ennek egy kiterjesztését fogjuk használni.

#### 3.1. Új kapcsoló modell

Az OXC-WO (*OXC with WL-conversion and Optical splitting* – az ábrán jobbra) modell az OXC-WL egy kiterjesztése. Annak tulajdonságait egy új funkcióval egészíti ki: a tisztán optikai hullámhossz-elágaztatás képességével. Ezt a képességet a szaggatott vonalak, illetve az új csomópontok felvételével tudjuk reprezentálni a WLG-ban. A modell előnye, hogy így szabadon megválaszthatjuk az optikai osztás költségét, a többi művelet költségétől függetlenül.

Természetesen a hullámhosszosztás – továbbra is – az elektronikus rétegben is megtörténhet. Ehhez az igényt először a felső rétegbe kell vezetni. Előfordulhat, hogy az elektronikus osztást követően az igény más hullámhosszon halad tovább. Tehát – az elágaztatás mellett – hullámhossz konverzió is történhet.

#### 4. ILP megfogalmazás

A következő ILP megfogalmazás több multicast fa együttes, optimális elvezetését teszi lehetővé a hálózatban. Az optikai elágaztatás engedélyezéséhez néhány további egyenlet felírása szükséges:

$$z_{ij}^{or} \in \{0, 1\}:$$

az  $r$  multicast fa  $o$  részigénye használja-e az  $(i, j)$  élt vagy sem

$$x_{ij}^r \in \{0, 1\}:$$

az  $r$  (unicast vagy multicast igény) használja-e  $(i, j)$  élet.

$$y_{ij} \in \{0, 1\}:$$

az  $(i, j)$  élt használja-e bármelyik igény.

$$\sum_{\forall j \in V_i^+} z_{ji}^{or} - \sum_{\forall k \in V_i^-} z_{ik}^{or} = \begin{cases} -1 & \text{if } i = s^r \\ 0 & \text{if } i \notin \{s^r, t^{or}\} \\ +1 & \text{if } i = t^{or} \end{cases} \quad (1)$$

minden  $i \in V$  (logikai) csomópontra,  
 $r$  igényre és  $o$  részigényre

$V_i^+$  jelenti azon csomópontok halmazát, amelyek  $i$ -ből elérhetők kimenő élen.  $V_i^-$  azon csomópontokat reprezentálja, melyekből  $i$  elérhető irányított élen át.  $A, V, V_E, O, R$  jelentése sorrendben a következő: élek, csomópontok, elektromos csomópontok, részigények, végül az igények halmaza. Az  $r$  igény forrását  $s^r$ , míg nyelőjét  $t^{or}$  jelöli, ahol  $o$  a részigény azonosítója.

$$z_{ij}^{or} \leq x_{ij}^r, \forall (i, j) \in A, \forall o \in O, \forall r \in R \quad (2)$$

$$x_{ij}^r \leq \sum_{\forall o \in O} z_{ij}^{or}, \forall (i, j) \in A, \forall r \in R \quad (3)$$

$$\sum_{\forall j \in V_i^+} x_{ji}^r = \sum_{\forall k \in V_i^-} x_{ik}^r \leq 1, \forall i \notin V_E, \forall r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{\forall j \in V_i^+} x_{ji}^r \leq \begin{cases} 0 & \text{if } i = s^r \\ 1 & \text{if } i \neq s^r \end{cases}, \forall i \in V_E, \forall r \in R \quad (5)$$

$$\sum_{\forall r \in R} x_{ij}^r \cdot b^r \leq B_{ij}, \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

$$x_{ij}^r \leq y_{ij}, \forall (i, j) \in A, \forall r \in R \quad (7)$$

$$y_{ij} \leq \sum_{\forall r \in R} x_{ij}^r, \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

$$\sum_{\forall j \in V_i^+} y_{ji} = \sum_{\forall k \in V_i^-} y_{ik} \leq 1, \forall i \notin V_E \quad (9)$$

Változók:

$$z_{ij}^{to} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, \forall o \in O, \forall r \in R \quad (10)$$

$$x_{ij}^r \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, \forall r \in R \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A \quad (12)$$

Célfüggvény:

$$\text{Minimalizálandó } \sum_{\forall (i, j) \in A} c_{ij} y_{ij} \quad (13)$$

(1) a folyammegmaradás törvényét fejezi ki a részigényekre. (2) szerint egy multicast fa használ egy adott  $(i, j)$  élet, ha bármelyik részigénye áthalad rajta. (3) az előző fordítottja: egy  $(i, j)$  élet csak akkor használ egy fa,

ha legalább egy részigénye áthalad rajta. Ez biztosítja, hogy főlőslegesen ne foglaljunk le kapacitást. (4) biztosítja, hogy igény ne tűnhessen el, illetve ne ágazhasson el olyan csomópontban, ahol ez nem engedélyezett. (6) szerint az adott  $(i, j)$  élen áthaladó igények sáv szélességeinek összege nem haladhatja meg az él (hullámhossz) kapacitását. (7) biztosítja, hogy egy élen csak akkor haladhatson át egy igény, ha az használatra le van foglalva. (8) ismét a főlősleges lefoglalást akadályozza meg: csak akkor kell lefoglalni egy élet, ha azon legalább egy igény áthalad. (8) elhagyható, mivel ezt a célfüggvény implicit tartalmazza. (9) nagyon hasonlít (4)-re, csak eggyel magasabb absztrakciós szinten. (9) elhagyható (mert redundáns kényszer), azonban gyorsítja a megoldást.

A célfüggvény (13) kifejezi, hogy a lefoglalt élek összköltségének minimumát keressük. Tehát célunk egy minimális költségű elvezetés megtalálása.

Az előbbieken bemutatott ILP megfogalmazás egyaránt használható multicast és unicast igényekre is, ugyanis az unicast igények tekinthetők egy egyetlen nyelővel rendelkező multicast igénynek. Csak unicast igények elvezetése felírható lenne kevesebb egyenlet és változó alkalmazásával is. Kiderült azonban, hogy a két felírás megoldási ideje között nincs jelentős eltérés. Ez azzal magyarázható, hogy az ILP megoldó felismeri az egyszerűsítési lehetőségeket, redundanciákat, és ezeket felhasználja a megoldás gyorsítására.

#### 5. Technikai megkötések

Az útvonalválasztás különböző tulajdonságainak befolyásolása érdekében több technikai kényszert is megfogalmaztunk, melyek valós technikai megkötéseket fejeznek ki. A kényszerek két típusba sorolhatók: egyik részük az elágazások számát, mások a fa méretét korlátozzák.

##### 5.1. Elágazási korlát

A gyakorlatban használt eszközök jelentős része – technológiai vagy szoftveres megkötések miatt – nem képes sem elektromos sem optikai osztásra. Ezért szükséges lehet az osztások számának korlátozása. Az elektromos rétegben ezt a következő módon tehetjük meg:

$$\sum_{\forall j \in V_i^-} x_{ij}^r \leq \alpha_r, \forall i \in V_E, \forall r \in R \quad (14)$$

Az osztási korlátot  $\alpha_r$ -vel jelöltük, mely eszközönként más és más lehet.

Az igények tisztán optikai osztása – még ha csak két-felé történik is – legalább 3 dB-es teljesítményvesztéssel jár. Ha még több irányba ágaztatunk, akkor a csillapítás még jelentősebb, ami hibás detektálást okozhat a vevőnél. Ezért szükséges olyan kényszer felvétele, amely az optikai osztást szabályozza.

Az optikai osztások számát értelmezhetjük a multicast fa egészére, és az egyes részigényekre is. Az utóbbi ésszerűbb, mert az optikai osztások száma a fa kü-

lönböző – a forrástól a nyelőig vezető – ágai mentén eltérő lehet. A jel minőségromlását a nyelőig vezető úton elszennvedett optikai osztások száma határozza meg. Ez az érték az alábbi formulával korlátozható:

$$\sum_{\forall i \in V_{\text{optika}}} z_{ij}^{\text{or}} \leq L^{\text{or}}, \forall o^r \in O, \forall r \in R, \quad (15)$$

ahol  $L^{\text{or}}$  megengedett felső határ adott részigényre.

Az optikai osztások számát azon élekekhez rendelt változók összegzésével számítjuk ki, melyek optikai osztópontból haladnak kifelé. Fontos megjegyezni, hogy ez az érték a teljes útvonalon található összes osztások száma, nem pedig az elektronikus réteg érintése nélkül megtett, egymást követő osztások maximális száma. Bár az utóbbi jobban jellemezné a minőség változását, annak kiszámítása csak nagyon összetett lineáris kényszerek felírásával lehetséges.

### 5.2. Multicast fák méretének korlátozása

Néha az optimális megoldás a kívánatosnál hosszabb utat jelöl ki a forrás és valamely nyelő csomópont(ok) között. Ez magasabb késleltetést jelent, mely bizonyos alkalmazásokban nem elfogadható, vagy sérti az adott kapcsolathoz rendelt QoS-t. Az út hossza (ugrások száma) az alábbi formulával korlátozható (*mélységi korlát*):

$$\sum_{\forall (i,j) \in A} z_{ij}^{\text{or}} \leq \beta^{\text{or}}, \forall o \in O, \forall r \in R \quad (16)$$

A  $\beta^{\text{or}}$  segítségével más-más érték adható meg az egyes igényekhez, részigényekhez. Ugyanakkor a  $\beta^{\text{or}}$  nem megfelelő megválasztása az egész problémát megoldhatatlanná teheti. Ugrás-szám helyett más metrikát is alkalmazhatunk, ekkor a változókat egy távolságot kifejező tényezővel kell súlyozni.

A multicast fa teljes méretének korlátozása szintén szükséges lehet. A fa által használt összeköttetések számának felső határát a következő módon szabhatjuk meg:

$$\sum_{\forall (i,j) \in A} x_{ij}^r \leq \mu^r, \forall r \in R, \quad (17)$$

$\mu^r$  konstans a fa méretének maximuma.

Egy hálózati eszközt egy multicast fa levelének nevezünk, ha nem osztja vagy továbbítja az igényt, hanem végződteti azt. Ez azt jelenti, hogy az ilyen pontok kimenő fokszáma nulla. A fa szélességén a benne lévő levelek számát értjük. *Szélességi korlátot* az alábbi egyenlőtlenség-rendszer segítségével állíthatunk fel:

$$\sum_{\forall j \in V_i^r} x_{ij}^r \leq \kappa_i \cdot (1 - v_i^r), \forall i \in T^r, \forall r \in R \quad (18)$$

$$(1 - v_i^r) \leq \sum_{\forall j \in V_i^r} x_{ij}^r, \forall i \in T^r, \forall r \in R \quad (19)$$

$$\sum_{\forall i \in T^r} v_i^r \leq \eta^r, \forall r \in R \quad (20)$$

**Változók:**

$$v_i^r \in \{0, 1\}, \forall i \in V_{\text{dr}}, \forall r \in R, \quad (21)$$

A  $v_i^r \in \{0, 1\}$  változó azt fejezi ki,

hogy az  $r$  fa az  $i$  csomópontban továbbhalad ( $v_i^r=0$ ) vagy végződik ( $v_i^r=1$ ).  $\kappa_i$  egy alkalmasan megválasztott, nagy konstans,  $\eta^r$  pedig maga a szélességi korlát. A (20)-ban az összegzést elég a fa nyelőinek elektronikus csomópontjaira felírni, mivel közülük kerülnek ki a fa levelei. Mindez a fára korábban felírt útvonal-választási kényszerekből következik.

### 5.3. Gyenge korlátok

Az eddig ismertetett kényszerek egy része „gyenge korlátként” is megfogalmazható. Ekkor az adott *előírást* többé nem egy ILP kényszer valósítja meg, hanem átkerül a célfüggvénybe. Ilyenkor – ha egy megtalált megoldásban egy előírás nem teljesül – a megoldást nem dobjuk el, hanem azt a költségfüggvényen keresztül büntetjük. Egy előírás fontosságát a célfüggvényben hozzá tartozó súly szabályozza. Például nem jelent kizáró körülményt, ha egy megoldásban az egyik igényt nem lehet elvezetni, de a büntetés arra ösztönzi a megoldót, hogy próbáljon jobb megoldást találni.

A módszer előnye, hogy hamarabb kaphatunk egy „részleges” megoldást. Nem kell megvárunk, amíg a megoldó olyan megoldást talál, mely minden előírásnak megfelel. Az eljárás különösen hasznos, ha az összes előírás együtt teljesíthetetlen, azonban néhány előírás elhagyásával a probléma megoldhatóvá válik; például az összes igény együtt nem vezethető el, azonban az igények egy részhalmaza igen.

A mélységi korlát például a következőképp írható fel gyenge korlátként:

$$\sum_{\forall (i,j) \in A} z_{ij}^{\text{or}} \leq \beta^{\text{or}} + q^{\text{or}}, \forall o \in O, \forall r \in R \quad (22)$$

**Célfüggvény:**

$$\text{Minimalizálandó } \sum_{\forall (i,j) \in A} c_{ij} y_{ij} + \sum_{\substack{\forall o \in O, \\ \forall r \in R}} c^{\text{or}} q^{\text{or}} \quad (23)$$

$$q_i^{\text{ro}} \in \mathbb{R}^+, \forall o \in O, \forall r \in R \quad (24)$$

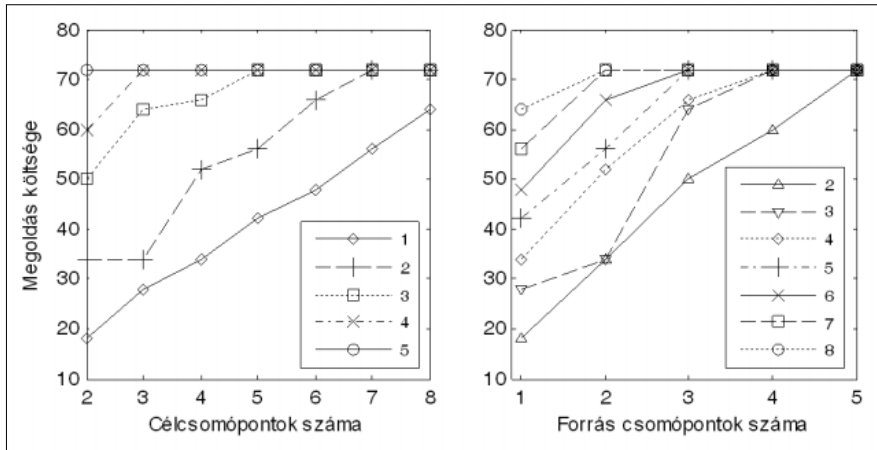
$q^{\text{or}}$  egy pozitív változó, mely az előírt étéktől való eltérést reprezentálja, míg  $c^{\text{or}}$  a büntetősúly. A többi korlát hasonló módon fogalmazható át.

## 6. Eredmények

Minden szimulációban az *NRS core* hálózattal [10] dolgoztunk, 5 hullámhosszt feltételezve minden élen.

A 2. ábra azt mutatja, hogy a multicast forgalomelvezetés jól skálázódik mind a forrás, mind a nyelő csomópontok számának növelésével. A költségfüggvény mindig egy adott küszöb alatt marad, fokozatos telítődik. Tehát egy újabb fa hozzáadásának, vagy egy új végpont meglévő fába való beillesztésének költsége egyre kisebb.

A 3. ábra bizonyítja, hogy ha a hálózat csomópontjait optikai osztási képességgel ruházzuk fel, akkor jelentős költségmegtakarítást érhetünk el. Az ábra az elvezetés költségét hasonlítja össze egy optikai osztásra is képes, illetve egy kizárólag elektronikus osztásra



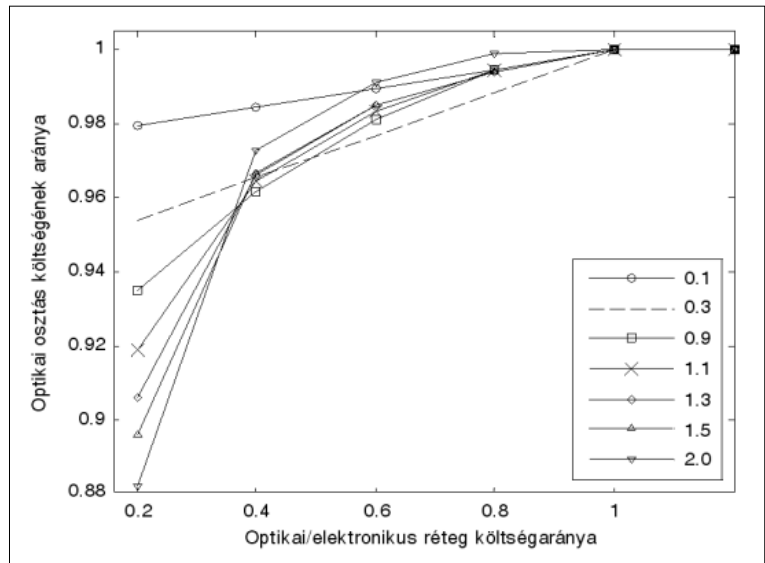
2. ábra  
Az útválasztás költsége a célcsozópontok számának függvényében különböző számú nyelőre (bal) és az útválasztás költsége a forrás csomópontok számának függvényében különböző számú célcsozópontra (jobb)

3. ábra  
Az útválasztás költségeinek aránya optikai osztással, illetve kizárólag elektronikus osztással (különböző hullámhossz-költségekre)

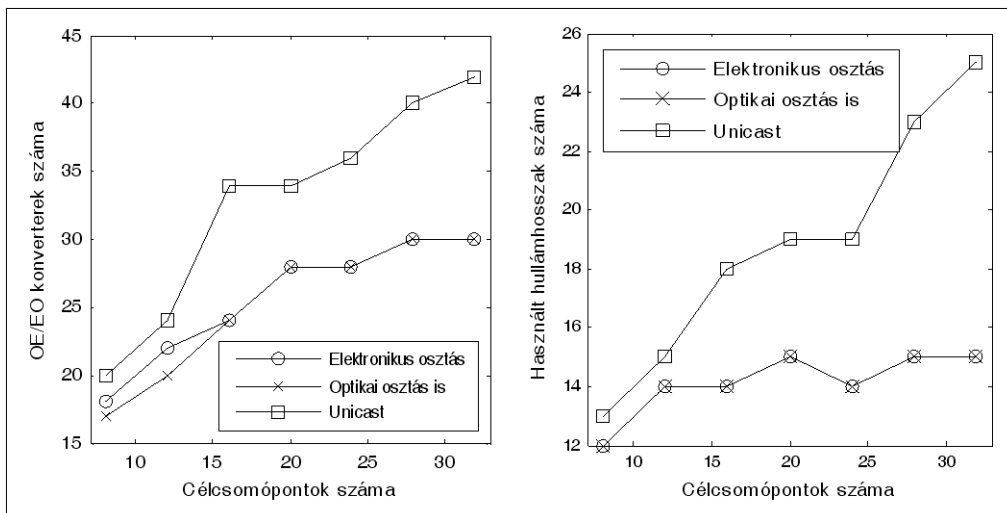
képes hálózatban. Jól látható, hogy minél olcsóbb az optikai réteg használatának költsége, annál nagyobb lehet a megtakarítás. Az optikai osztás tehát főleg akkor kedvező, ha az elektronikus réteg használata drága, ami a jelenlegi hálózatokra igaz. A nyereség minde mellett nagymértékben függ az igények halmazától és a hálózat egyéb tulajdonságaitól is.

A 4. ábra alapján megállapítható, hogy az elvezetéshez szükséges konverziós portok és a felhasznált hullámhosszok száma nő a nyelő csomópontok hozzáadásával. Az optikai osztással is rendelkező hálózat csak akkor használ kevesebb konverziós portot, ha a résztvevő csomópontok száma kicsi – a hálózatban lévő összes csomópontok számához képest.

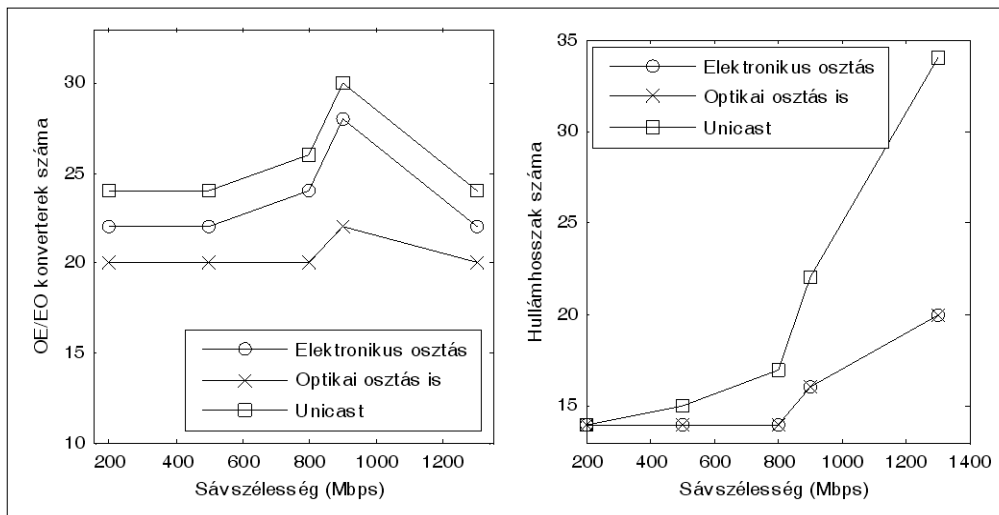
Ahogy egyre több csomópont válik a fák tagjává, úgy tűnik el a nyereség. Ez azzal magyarázható, hogy a multicast fák nyelő csomópontjaiban mindenképp fel kell lépni az elektronikus rétegbe, így az optikai osztásra kevesebb szükség van. Multicast esetén mind a szükséges konverziós portok, mind a használt hullámhosszok száma jól skálázódik a csomópontok számának növekedésével. Nem így unicast esetben: ilyenkor a szükséges erőforrások száma rendkívül gyorsan nő. Unicast esetén a korábbi multicast igény-nyel ekvivalens igényhalmazt vezetünk el.



Az 5. ábra szintén a szükséges hullámhosszok és konverziós portok számát mutatják, de az igények növekvő sávszélességének függvényében. A szimuláció során négy fát vezetünk el egyenként három nyelével. Az optikai osztás egyértelműen kevesebb konverziós portot használ, mint az elektromos osztás, viszont az optikai osztás a szükséges hullámhosszok számát nem csökkenti. Az unicast – ahogyan várható – sokkal rosszabbul teljesít.



4. ábra  
A szükséges konverziós portok (balra) és hullámhosszok (jobbra) száma a célcsozópontok számának függvényében unicast, illetve multicast esetben (optikai osztással és anélkül)



5. ábra  
A szükséges konverziós portok (balra) és hullámhosszak (jobbra) száma az igények sáv szélességének függvényében unicast, illetve multicast esetben (optikai osztással és anélkül)

A kötegelés egyre inkább elveszti jelentőségét, ahogy az igények sáv szélessége közelít a hullámhossz kapacitásához. A használt OE/EO konverterek számának hirtelen csökkenés is ezzel magyarázható.

## 7. Összefoglalás

A cikkben bemutatunk egy új hullámhossz-gráf modellt és egy új ILP megfogalmazást unicast és multicast igényeket optimális módon történő elvezetésére WDM hálózatokban. Megvizsgáltuk a multicast elvezetés költségét és erőforrás-felhasználását optikai osztás használatával és a nélkül, illetve összehasonlítva az unicast esettel.

Rámutatunk, hogy az optikai osztás általában kedvezőbb, mint a kizárólag elektromos elágaztatás. Ugyanakkor, ha a hálózat sok csomópontja vesz részt a fában, akkor az elektronikus réteget mindenképpen használni kell, így az optikai osztással elérhető megtakarítást jelentősen csökken. Kis sáv szélességű igények esetén a kötegelés képes az unicast elvezetés hátrányait némiképp kompenzálni a multicast-tal szemben.

## Irodalom

1. B. Quinn and K. Almeroth, „IP multicast applications: Challenges and solutions”, IETF RFC 3170, September 2001.
2. Madhyastha et al., „Grooming of multicast sessions in WDM ring networks”, (OptiComm 2003) Optical Networking and Communications, Nov. 2003.
3. G. V. Chowdhary and C. S. R. Murthy, „Grooming of Multicast Sessions in WDM Mesh Networks”, Workshop on Traffic Grooming, 2004.
4. X. Zhang et al., „Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 18, no.12, December 2000, p.1917.

5. X. Huang, F. Farahmand, J. P. Jue, „Multicast Traffic Grooming in Wavelength-Routed WDM Mesh Networks Using Dynamically Changing Light-Trees”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, no.10, October 2005.
6. D. Yang and W. Liao, „Design of light-tree based logical topologies for multicast streams in wavelength routed optical networks,” in Proc. IEEE Information Communications (INFOCOM), San Francisco, April 2003.
7. Xiao Hua Jia et al., „Optimization of Wavelength Assignment for QoS Multicast in WDM Networks”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 49, no.2, Februar 2001, pp.341–350.
8. T. Cinkler et al., „Configuration and Re-Configuration of WDM networks”, NOC'98, European Conf. on Networks and Optical Comm., Manchester, UK, 1998.
9. T. Cinkler, „ILP formulation of Grooming over Wavelength Routing with Protection”, ONDM 2001, 5th Conf. on Optical Network Design and Modeling, Wien, Februar 2001.
10. NRS core network topology (16 nodes, 22 links) [http://www.ibcn.intec.ugent.be/css\\_design/research/projects/INTERNAL/NRS/index.html](http://www.ibcn.intec.ugent.be/css_design/research/projects/INTERNAL/NRS/index.html)