

Jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás WDM hálózatokban

ZSIGMOND SZILÁRD, PERÉNYI MARCELL, CINKLER TIBOR

BME Távközlési és Médiainformaticai Tanszék
{zsigmond, perenyim, cinkler}@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: OSNR, RWA, útvonalválasztás, WDM

Az optikai hálózatok utóbbi években tapasztalható bitsebesség növekedés mellett egyre nagyobb szerep jut a konfigurálhatóságnak is. A fix optikai csomópontok (OADM) helyett megjelentek az újrakonfigurálható optikai multiplexerek (ROADM), illetve a több-fokszámú újrakonfigurálható optikai multiplexerek (MROADM). Az újrakonfigurálhatóság következtében eddig nem tapasztalt effektusok léptek fel a hálózatban, mint például az ugyanazon szálon áthaladó különböző hullámhossz utak más és más fizikai paraméterekkel rendelkeznek. Ezen új problémák megjelenése miatt egyre nagyobb szerep hárul a csomópontokban beépített mérő és szabályzó rendszer kialakítására, az optikai vezérlősík feladatainak bővítésére. A cikkben egy új útvonalválasztási algoritmust mutatunk be, amely egyidejűleg alkalmas a fizikai hatások figyelembevételére, optimális fényutak meghatározására és ezek konfigurálására.

1. Bevezetés

A hullámhosszosztásos (WDM) optikai hálózatok sikeresen megoldották a sávszélesség problémákat, azonban a szolgáltatók csak nagy nehézségek árán tudják kezelni az új, előre nem tervezhető igényeket. Igen hamar kiderült, hogy a statikusan konfigurálható pont-pont kapcsolatokból felépített optikai hálózatok nem alkalmasak a folyamatosan változó forgalom elvezetésére. Ilyen hálózatokban az átkonfigurálás csak jelentős költségek mellett valósítható meg. Tehát egy olyan hálózatra van szükség, ami a SONET/SDH flexibilitását nyújtja a WDM sávszélessége mellett.

Az optikai hálózatok fejlődésének egyik iránya a flexibilitás növelése. Ennek következtében a vezérlő sík új feladatokat is el kell hogy lásson, mint például a fizikai paraméterek monitorozása, az egyes csatornák frekvenciáinak hangolása, optikai jelszintjének beállítása, diszperzió-kompenzáló elemek hangolása. Természetesen a hagyományos feladatok, mint például az útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelés (RWA) megmarad. Több kiváló cikk foglalkozik az RWA probléma megoldásával, mint például [1,2]. A [3,4] publikált módszer az RWA probléma kiterjesztése az optikai hálózatok fizikai korlátainak figyelembe vételével.

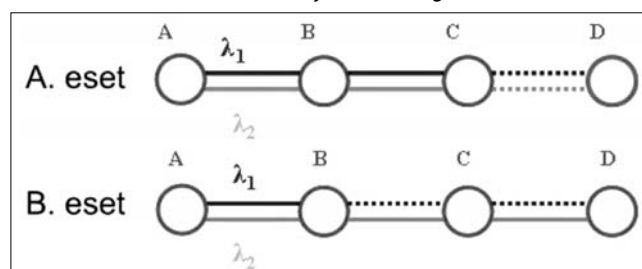
Ebben a cikkben merőben új módszert javasolunk az RWA probléma megoldására. A módszer lényege, hogy a vezérlősík a csomópontokban található vezérelhető optikai csillapítókön keresztül (VOA) szabályozza az egyes optikai csatornák teljesítményét, úgy, hogy a vételi oldalon még megfelelő optikai jel/zaj viszonyt kapjunk. Az ötlet azon alapszik, hogy a metro-WDM hálózatok jelszintjeit a keresztfázis-moduláció, illetve a Raman-szórás korlátozza, nem pedig a Brillouin-szórás. Ez azt jelenti, hogy az optikai jelteljesítményekre felső korlátot a szádba csatolható össz-jelteljesítmény ad, nem pedig az egyes hullámhosszak egyedi teljesítménye. Ennek kö-

vetkeztében megnövelhetjük egy-egy csatorna jelteljesítményét egészen a Brillouin- küszöbig, ugyanakkor az ugyanazon szálaban haladó többi csatorna jelteljesítményét le kell csökkentenünk. Ezek alapján kijelenthetjük, hogy a módszer alkalmas optikai fényutak konfigurálására.

Tekintsük az 1. ábrán az A. esetet. Az A csomópontból a D csomópontba akarunk egy fényutat kiépíteni. Az egyszerűség kedvéért legyen két hullámhossz a hálózatban. Tegyük fel, hogy a fizikai hatások miatt csak a C csomópontig tudunk eljutni, ott jelregenerálásra van szükség. Az általunk alkalmazott módszer használatával (B. eset) növeljük meg a λ_2 hullámhossz teljesítményét annyival, hogy még kielégítő jelminőséget kapjunk a D csomópontban. Ezáltal képesek vagyunk az említett hullámhosszon egy tisztán optikai összeköttetést létrehozni a A-D csomópontok között.

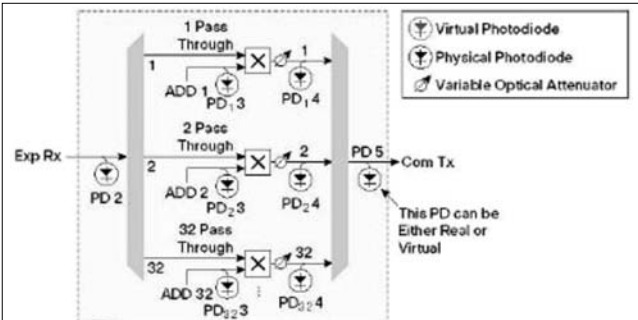
Természetesen annak következtében, hogy megnöveltük a λ_2 hullámhossz teljesítményét, a λ_1 hullámhossz teljesítményét le kell csökkenteni. Elképzelhető, hogy a λ_1 hullámhosszon nem leszünk képesek egy fényutat kiépíteni az A-C csomópontok között, de lehet, hogy erre nincs is szükség, mert a λ_1 hullámhosszon már eredetileg is egy sokkal rövidebb távú összeköttetés volt tervezve, mint például a mi esetünkben az A-B csomópontok közötti fényút.

1. ábra
A javasolt algoritmus működése



2. A módszer megvalósíthatósága

Az újrakonfigurálható optikai leágazó multiplexerek (ROADM) megjelenésével az optikai monitorozási rendszerek is előtérbe kerültek. Ezen újabb típusú berendezésekből kialakított csomópontoknak nem csak az a feladatuk, hogy az egyes hullámhossz-csatornákat ki/be csatolják, hanem az is, hogy a jelminőséget meghatározzák, a jelszinteket beállítsák.

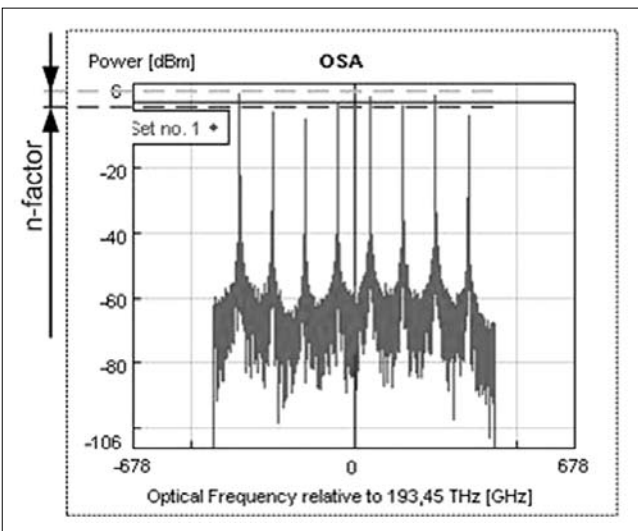


2. ábra
Cisco 15454 ROADM kapcsolójának megvalósítása
(forrás: http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2006/products_data_sheet0900aecd803fc52f.htm)

A 2. ábrán a Cisco 15454-es ROADM berendezés blokk-sémája látható. A multiplexer és demultiplexer között található a 2x1-es kapcsolók, illetve a VOA-k. Ezek feladata a jelszintek megfelelő beállítása. A javasolt algoritmus VOA-k megfelelő szabályozásával állítja be a különböző optikai jelszinteket. Tehát technológiailag a különböző optikai jelszintek beállítása megoldható a jelenleg is használatban levő ROADM-et alkalmazó optikai hálózatokban. Az egyedüli változtatás, amire szükség van, hogy a menedzselő rendszert képessé kell tenni arra, hogy szabályozni tudja az egyes ROADM-ekben található VOA-kat.

További fontos kérdés az említett hálózatok működőképessége. Mint ahogy a 2. ábrán is látszik, a javasolt algoritmus kulcsparamétere, az n-faktor. Az n-faktor adja az egyes csatornák maximális jelteljesítményét. Pon-

3. ábra A javasolt algoritmus jelszintezése



tos definícióját a 3. szakasz (3.7) összefüggése adja meg. Ennek a paraméternek a megfelelő beállítása dönti el, hogy az elméleti számítások útján kapott jelszintek a valóságban megvalósíthatók vagy sem.

Az optikai szál nemlinearitása miatt különböző korlátok lépnek fel az optikai jelszintekre. A Brilluoin-szórás miatt már eleve korlátozva van a szálba csatolható WDM csatornák adóteljesítménye, azaz az n-faktor értéke. Normál ITU-T G.652-s szálak esetén a Brilluoin-küszöb értéke +7 dBm körül van [5]. A többi nemlineáris hatás, a Brilluoin-szórástól eltérően, az összes szálba csatolható teljesítményre ad egy felső korlátot. Ez a felső korlát 10-24 dBm között mozog és nagymértékben függ az alkalmazott csatornák számától, illetve az alkalmazott csatornatávolságoktól [6]. Következésképpen tehát levonhatjuk, hogy az eltérő jelszintek használata megengedett mindaddig, amíg a fentebb említett korlátokat át nem lépjük.

További fontos kérdés, hogyan képesek a már hálózatban elhelyezett optikai erősítők együttműködni a javasolt technikával. Ennek érdekében erbium alapú erősítővel (EDFA) szimulációkat végeztünk. A szimulációs szoftver a kereskedelemben is kapható VPI Transmission Maker [7]. Azt találtuk, hogy az EDFA-k egyértelműen támogatják a különböző bemenő jelszinteket. Az egyes csatornák erősítése jó közelítéssel a bemenő jelszinttől független.

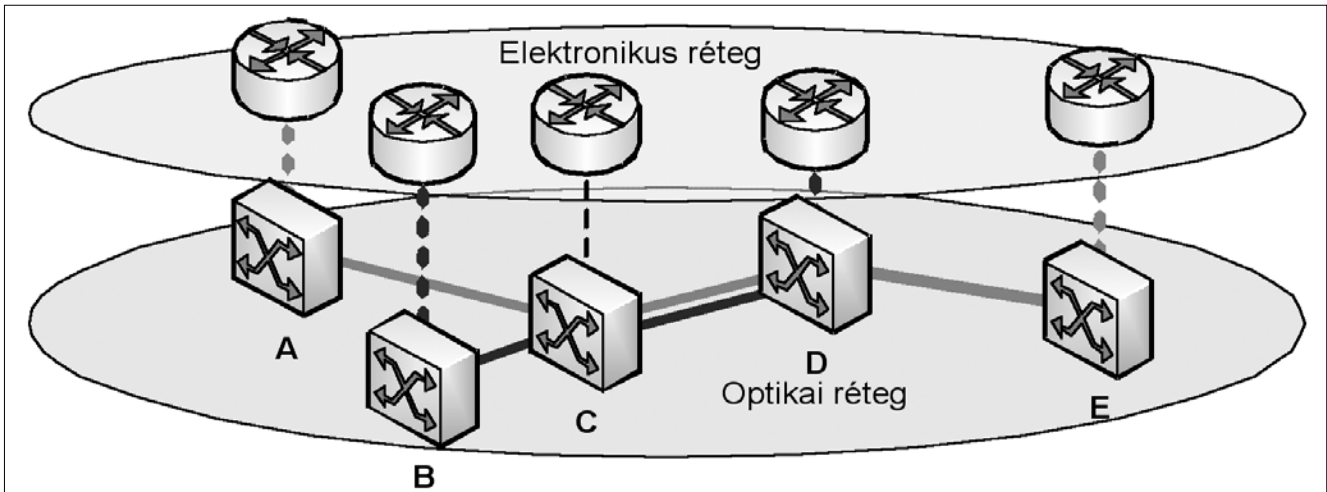
Összefoglalva a javasolt algoritmus mind fizikailag, mind technológiailag megvalósítható.

3. Jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás ILP megfogalmazása egyrétegű hálózatokra

Ebben a fejezetben ismertetjük a jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás ILP megfogalmazását egyrétegű optikai hálózatokra. Egy tisztán optikai hálózati modellt tételezünk fel, ahol minden csomópont kizárólag optikai kapcsolásra képes. Feltételezzük, hogy az optikai rétegben nincs jelregeneráció, tovább azt is, hogy a zaj és a jelalak torzulásai összegződnek a teljes útvonalon, amelyen a fényút halad.

Ezen torzulások kiküszöböléséhez a jel újraerősítése, a jelalak újraformálására és a jel újraidőztetésére volna szükség. Ezt a folyamatot összefoglaló néven 3R (*re-amplification, re-shaping, re-timing*) jelregenerációnak nevezzük. Noha laboratóriumi körülmények között már kimutatták, hogy a 3R jelregeneráció tisztán optikai módon is kivitelezhető, azonban a jelenlegi hálózatokban gazdaságosan csak az elektronikus rétegben oldható meg.

Feltételezzük, hogy az útvonalválasztás során minden egyes igényhez egy teljes fényutat rendelünk hozzá a forrástól a célcsomópontig. A jel a forráscsomópontban belép az optikai rétegbe és csak a célcsomópontban tér vissza onnan. Hullámhossz-konverzió, kötegelés (*grooming*) vagy jelregeneráció nem lehetséges másol az út mentén. Az útvonalválasztás során figyelembe kell



4. ábra

Minden igényhez egy saját fényutat rendelünk a forrás és a nyelő között. E példában két igény látható (A-E és B-D). Két fényút kerül lefoglalásra (A-E, B-D), a C-D linken kötegelés nem megengedett.

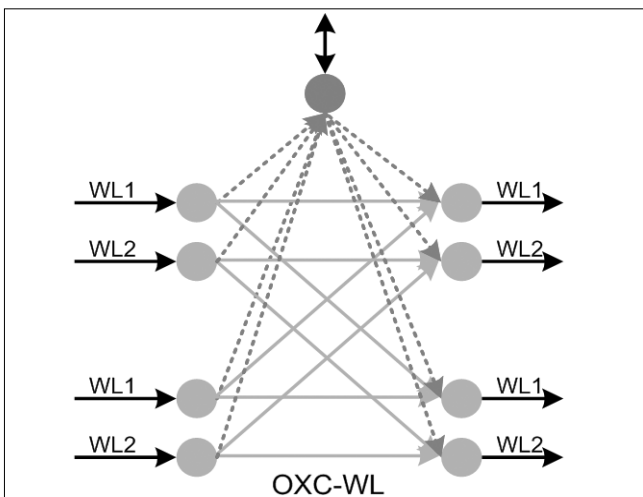
venni, hogy az egy optikai szálba (különböző hullámhosszak által) becsatolható teljesítmény korlátozott, az áthidalható távolság pedig a bemeneti jelteljesítmény függvénye.

Az optikai hálózatot – mely fizikai linkekből és kapcsoló eszközökből áll – egy hullámhossz-gráffal (WL gráf) modellezzük. A WL gráf csomópontokból (V) és élékből (A) áll, ahol (i, j) jelöli a gráf egy élét. A^{sw} jelenti a WL gráf éléinek azon halmazát, melyek kapcsolási funkciót modelleznek egy fizikai eszközön belül. A többi él az optikai szálakban lévő hullámhosszakot modellezi (A^p). A hálózatban elvezetendő igények halmazát O jelöli.

Az ILP megfogalmazáshoz használt kapcsoló hullámhossz-gráfbeli modellje az 5. ábrán látható. A felső elektronikus csomópont képviseli az elektronikus réteget, a többi csomópont pedig bemenő és kimenő hullámhosszakat a kapcsoló interfészein. A példában szereplő kapcsoló két-két bemeneti, illetve kimeneti interfészt tartalmaz, melyek mindegyik 2 hullámhosszt támogat. Az él kapcsolási funkciókat jelenítenek meg: a szürke folytonos él térkapcsolást, a pontozottak hullámhossz-konverziót jelölnek.

5. ábra

Az ILP megfogalmazáshoz használt kapcsolómodell



Az ILP felíráshoz a lehető legegyszerűbb, legáltalánosabb kapcsolómodellt igyekeztünk használni, a felírás azonban könnyen kiterjeszthető tetszőleges kapcsolómodellre.

3.1. Konstansok

$$P_{pl}^{max} = 4\text{-}20 \text{ dBm, tipikusan } 10 \text{ dBm} \quad (3.1)$$

ahol P_{pl}^{max} a p/l fizikai linkbe becsatolható összteljesítmény felső határa dBm-ben, illetve a $P_{pl}^{max}_{lin}$ ugyanez mW-ban.

$$len_{ij} \quad (3.2)$$

len_{ij} annak a fizika linknek a hossza km-ben, melyhez a hullámhossz tartozik.

$$len_{PhyNode} = 90 \text{ km, tipikusan} \quad (3.3)$$

$len_{PhyNode}$ annak a fizikai szálnak a hossza, amivel egyenértékű torzítást okoz egy hálózati kapcsoló a jelalakban, ha egy fényút áthalad az adott eszközön.

$$L_c = 1000 \quad (3.4)$$

Az L_c egy lineáris együtttható, amely egy igény (fényút) bemeneti teljesítménye és az elérhető legnagyobb fizikai távolság közötti kapcsolatot fejezi ki.

$$\alpha \quad (3.5)$$

Az α konstans azt befolyásolja, hogy az optimalizálási célfüggvényben a különböző tényezők milyen súllyal szerepelnek: a minimális költségű útvonalválasztáson vagy a minimális jelteljesítményeken legyen a fő hangsúly.

$$s^o, t^o \quad (3.6)$$

s^o és t^o jelöli az o igény forrás csomópontját, illetve nyelő csomópontját.

$$\beta = \frac{n}{W} \cdot P_{pl}^{max}_{lin} \quad (3.7)$$

A β konstans az egy csatornába becsatolható teljesítmény felső korlátja mW-ban kifejezve, ahol az n valószínűség 1 és W között, W pedig az optikai szálba becsatolható hullámhosszak száma.

3.2. Változók

$$p^o \in \left[0, \frac{\beta}{P_{pl\ lin}^{max}} \right], \forall o \in O \quad (3.8)$$

A p^o változó az o igény bemeneti teljesítményét jelöli, osztva a $P_{pl\ lin}^{max}$ értékkel.

$$p_{ij}^o \in \left[0, \frac{\beta}{P_{pl\ lin}^{max}} \right], \forall (i, j) \in A, \forall o \in O \quad (3.9)$$

A p_{ij}^o változó az o igény teljesítménye az (i, j) élen (osztva a $P_{pl\ lin}^{max}$ értékkel).

$$y_{ij}^o \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, \forall o \in O \quad (3.10)$$

Az y_{ij}^o változó fejezi ki, hogy az o igény használja-e az (i, j) élet vagy sem.

3.3. Célfüggvény

A következő függvényt kívánjuk minimalizálni:

$$\alpha \cdot \sum_{\forall o \in O} \sum_{\forall (i, j) \in A/w} y_{ij}^o + (1 - \alpha) \cdot \sum_{\forall o \in O} p^o \quad (3.11)$$

A célfüggvény azt fejezi ki, hogy az útvonalválasztáshoz használt élek számát és az igények jelteljesítményét együttesen akarjuk minimalizálni. Az y értékeket még egy további súlytényezővel is súlyozhatjuk, amennyiben ki akarjuk fejezni, hogy a különböző élek az útvonalválasztás során különböző funkcióknak felelnek meg (például hullámhossz használata optikai szálban, térkapcsolás kapcsolóban stb.), de mivel ebben az esetben az útvonalválasztás tisztán az optikai rétegre korlátozódik, a különböző súlyok hozzárendelésétől eltekintünk.

Az α súlytényező befolyásolja, hogy a hangsúly a minimális költségű útvonalválasztáson (α értéke közel van 1-hez) vagy a minimális jelteljesítményeken legyen (α értéke nullához közeli).

3.4. Kényszerfeltételek

$$\sum_{\forall o \in O} \sum_{\forall (i, j) \in pl} p_{ij}^o \leq 1, \forall pl \in \text{PhyLinks} \quad (3.12)$$

$$p_{ij}^o \leq y_{ij}^o, \forall (i, j) \in A, \forall o \in O \quad (3.13)$$

$$\sum_{\forall j \in V^{t^o}} p_{ji}^o - \sum_{\forall k \in V^{t^o}} p_{ik}^o = \begin{cases} -p^o & \text{if } i = s^o \\ 0 & \text{if } i \notin \{s^o, t^o\}, \\ +p^o & \text{if } i = t^o \end{cases}, \forall i \in V, o \in O \quad (3.14)$$

$$\sum_{\forall j \in V^{t^o}} y_{ji}^o - \sum_{\forall k \in V^{t^o}} y_{ik}^o = \begin{cases} -1 & \text{if } i = s^o \\ 0 & \text{if } i \notin \{s^o, t^o\}, \\ +1 & \text{if } i = t^o \end{cases}, \forall i \in V, o \in O \quad (3.15)$$

$$\sum_{\forall o \in O} y_{ij}^o \leq 1, \forall (i, j) \in A \quad (3.16)$$

$$\sum_{\forall (i, j) \in A^{er}} y_{ij}^o \cdot \text{len}_{\text{PhyNode}} + \sum_{\forall (i, j) \in A^{pl}} y_{ij}^o \cdot \text{len}_{ij} \leq L(p^o) = L_c \cdot p^o \cdot P_{pl\ lin}^{max}, \forall o \in O \quad (3.17)$$

3.5. Magyarázat

A (3.12) kényszerfeltétel azt fejezi ki, hogy egy adott optikai szálon áthaladó igények összteljesítménye nem haladhatja meg a linken megengedett maximális teljesítményt.

A (3.13) kényszerfeltételt kimondja, hogy ha az o igény teljesítménye az (i, j) élen nullánál nagyobb, akkor az o igény „használja” az adott élet.

A (3.14) és (3.15) kényszerfeltételek biztosítják a folyam megmaradás törvényét – minden egyes igényre – a teljesítmény változókra és az y döntési változókra.

A (3.16) kényszerfeltétel biztosítja, hogy egy adott élet (például hullámhosszat) legfeljebb egy igény használhat.

A (3.17) kényszerfeltétel pedig azt írja elő, hogy az o igény teljes útvonalának hossza legfeljebb annyi lehet, amennyit a bemeneti teljesítmény lehetővé tesz.

4. Jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás ILP megfogalmazása többrétegű hálózatokra

Ebben a fejezetben ismertetjük a többrétegű optikai hálózatokra vonatkozó jelerősség-alapú útvonalválasztás ILP megfogalmazását. A 3. pontban ismertetett egyrétegű felíráshoz képest a legfontosabb eltérés az, hogy az igények mind az optikai, mint az elektronikus réteget használhatják útjuk során a forráscsomóponttól a nyelőig. Ha szükséges és költséghatékony, akár többször is felmehetnek az elektronikus rétegbe (tehát egy igény útvonala több fényútból is állhat). Hullámhossz-konverzió, kötegelés és 3R jelregeneráció csak az elektronikus rétegben lehetséges.

Az egyrétegű modellhez hasonlóan feltételezzük, hogy a zaj és a jelalak torzulásai összegződnek a fényút során (ne feledjük, hogy ebben az esetben azonban az igény útvonala több fényútból is állhat). Az egyrétegű esethez hasonlóan figyelembe kell venni, hogy az egy optikai szálba (különböző hullámhosszak által) becsatolható teljesítmény korlátozott és a fényút által áthidalható távolság pedig a fényút bemeneti jelteljesítményének függvénye.

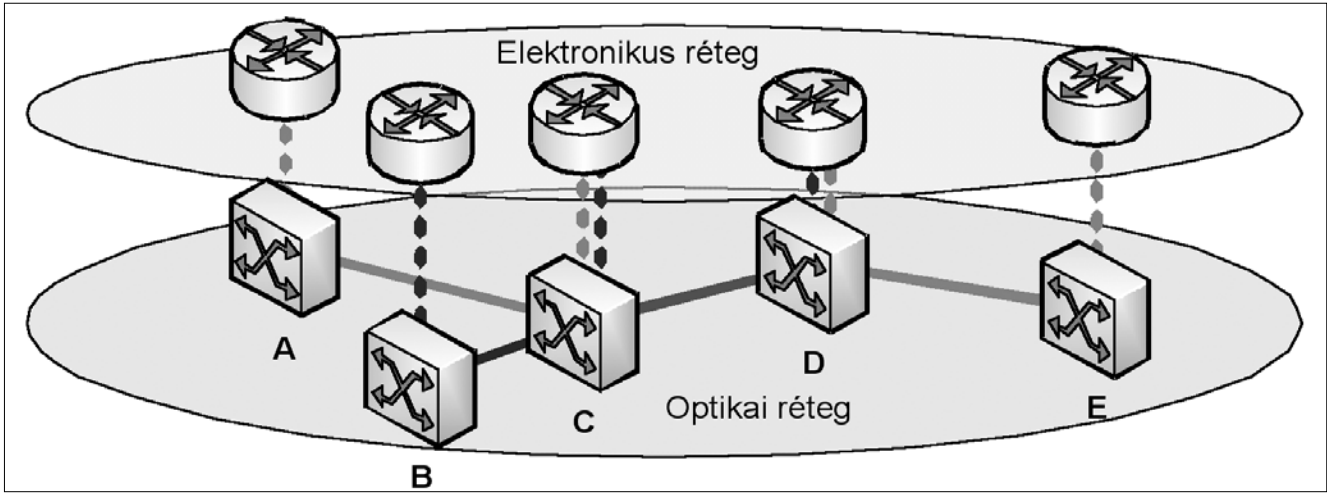
A többrétegű esetben a kötegelési korlátot is be kell tartani, tehát az egy fényútra összekötegelt igények összes sávszélessége nem haladhatja meg a fényút (a hullámhossz) kapacitását.

Mindezek eredményeképpen az általunk javasolt új ILP megfogalmazás képes az útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelés (RWA) meghatározására a kötegelés figyelembevételével, továbbá ezzel egyidejűleg a fényutak jelerősségének meghatározására.

4.1. Változók és konstansok

$$p_{EF} \in \left[0, \frac{\beta}{P_{pl\ lin}^{max}} \right], \forall (E, F) \in L \quad (4.1)$$

A p_{EF} változó az (E, F) fényút bemeneti teljesítményét jelöli osztva a $P_{pl\ lin}^{max}$ értékkel.



6. ábra
Két igény látható az ábrán (A-E és B-D). Összesen 4 fényutat (A-C, B-C, C-D és D-E) húzunk ki. A C-D fényúton kötegelést is alkalmazhatunk.

$$p_{ij}^{EF} \in \left[0, \frac{\beta}{P_{pl\ lin}^{max}} \right], \forall (i, j) \in A, (E, F) \in L \quad (4.2)$$

A p_{ij}^{EF} változó az (E, F) fényút teljesítményét jelöli az (i, j) élen osztva a $P_{pl\ lin}^{max}$ értékkel.

$$x_{ij}^{o\ EF} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, o \in O, (E, F) \in L \quad (4.3)$$

Az $x_{ij}^{o\ EF}$ változó azt fejezi ki, hogy az o igény használja-e az (E, F) fényutat az (i, j) élen vagy sem.

$$y_{ij}^{EF} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A, (E, F) \in L \quad (4.4)$$

Az y_{ij}^{EF} változó azt jelzi, hogy (E, F) fényút használja-e az (i, j) élet vagy sem.

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A \quad (4.5)$$

Az y_{ij} változó azt jelöli, hogy az (i, j) él lefoglalásra kerül-e az útvonalválasztáskor vagy sem.

A felíráshoz ugyanazokat a konstansokat használtuk, melyeket a 3.1. alfejezeteiben már definiáltunk.

4.2. Célfüggvény

A következő célfüggvényt kívánjuk minimalizálni:

$$\alpha \cdot \sum_{\forall (i, j) \in A} y_{ij} + (1 - \alpha) \cdot \sum_{\forall (E, F) \in L} p_{EF} \quad (4.6)$$

A célfüggvény azt fejezi ki, hogy az útvonalválasztás költségét (mely magában foglalja a különböző hálózati erőforrások használatát) és a jelek teljesítményét együttesen akarjuk minimalizálni.

Az α súlytényező befolyásolja, hogy a hangsúly a minimális költségű útvonalválasztáson (α értéke közel van 1-hez) vagy a minimális jelteljesítményeken legyen (α értéke nullához közeli).

4.3. Kényszerfeltételek

$$\sum_{\forall (i, j) \in pl} \sum_{(E, F) \in L} p_{ij}^{EF} \leq 1, \forall pl \in \text{PhyLinks} \quad (4.7)$$

$$x_{ij}^{o\ EF} \leq y_{ij}^{EF} \leq y_{ij}, \forall o \in O, i, j \in V, (E, F) \in L \quad (4.8)$$

$$y_{ij}^{EF} \leq \sum_{\forall o \in O} x_{ij}^{o\ EF}, \forall (i, j) \in A, (E, F) \in L \quad (4.9)$$

$$y_{ij} \leq \sum_{\forall (E, F) \in L} y_{ij}^{EF}, \forall (i, j) \in A \quad (4.10)$$

$$p_{ij}^{EF} \leq y_{ij}^{EF}, \forall i, j \in V, (E, F) \in L \quad (4.11)$$

$$\sum_{\forall j \in V^{-in}} p_{ji}^{EF} - \sum_{\forall k \in V^{out}} p_{ik}^{EF} = \begin{cases} -p_{EF} & \text{if } i = E \\ 0 & \text{if } i \notin \{E, F\}, \\ +p_{EF} & \text{if } i = F \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\sum_{\forall j \in V^{-in}} \sum_{\forall (E, F) \in L} x_{ji}^{o\ EF} - \sum_{\forall k \in V^{out}} \sum_{\forall (E, F) \in L} x_{ik}^{o\ EF} = \begin{cases} -1 & \text{if } i = s^o \\ 0 & \text{if } i \notin \{s^o, t^o\}, \forall i \in V, o \in O \\ +1 & \text{if } i = t^o \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\sum_{\forall E, F} y_{ij}^{EF} \leq 1, \forall (i, j) \in A \quad (4.14)$$

$$\sum_{\forall o \in O} \sum_{(E, F) \in L} x_{ij}^{o\ EF} \cdot b^o \leq B, (i, j) \in A \quad (4.15)$$

$$\sum_{\forall (i, j) \in A_{in}} y_{ij}^{EF} \cdot \text{len}_{\text{PhyNode}} + \sum_{\forall (i, j) \in A_{pl}} y_{ij}^{EF} \cdot \text{len}_{ij} \leq L(p_{EF}) = L_c \cdot p_{EF} \cdot P_{pl\ lin}^{max}, (E, F) \in L \quad (4.16)$$

4.4. Magyarázat

A jelölések teljesen hasonlóak a 3.4.-ben alkalmazot-takhoz. A különbség, hogy a fényutak halmazát L -l jelöljük. A hullámhosszgráfban egy útvonalat akkor nevezünk fényútnak, ha kizárólag az optikai rétegben halad, az elektronikus réteg érintése nélkül. Egy fényút tehát nem érint egyetlen elektronikus csomópontot sem, kivéve a forrás és a cél csomópontot.

A (4.7) kényszerfeltétel azt fejezi ki, hogy egy adott pl /optikai szálon áthaladó igények összteljesítménye nem haladhatja meg a linken megengedett maximális telje-

sítményt. A (4.7) egyenlőtlenség bal oldalán összegezzük azoknak a fényutaknak a teljesítményét, melyek áthaladnak a pl optikai szálon.

A (4.8) kényszerfeltétel rendkívül egyszerű: egyfelől kimondja, hogy az (E, F) fényút használja az (i, j) élet, amennyiben bármelyik igény – azok közül, melyek az (E, F) fényúton össze vannak kötegelve – használja az élet. Másfelől azt is kimondja, hogy az útvonalválasztás használja az (i, j) élet, amennyiben bármelyik fényút használja azt. A (4.9) – kiegészítve a (4.8) kényszer – biztosítja, hogy az (E, F) fényút *csak akkor* használja az (i, j) élet, ha bármelyik kötegelt igény használja azt. Tehát az (E, F) fényút nem használ feleslegesen éleket. Hasonló módon a (4.10) kényszerfeltétel azt biztosítja, hogy az útvonalválasztás *csak akkor* használ egy (i, j) élet, ha egy fényút használja azt. Tehát nem hozunk létre fényutakat feleslegesen.

A (4.9) és (4.10) kényszerfeltételek nem kötelezőek, mert a célfüggvény implicit módon tartalmazza ezeket a célokat.

A (4.11) kényszerfeltétel egyszerűen csak annyit mond el, hogy ha egy fényút teljesítménye egy élen nagyobb, mint nulla, akkor a fényút használja ezt az élet.

A (4.12) kényszerfeltétel azt biztosítja, hogy egy fényút teljesítménye állandó a teljes útvonal mentén (folyammegmaradás).

A (4.13) kényszerfeltétel a folyammegmaradást rögzíti minden egyes igényre.

A (4.14) kényszer kimondja, hogy minden élet legfeljebb egy igény használhat.

A (4.15) fejezi ki a kötegelés alapelvét: a kötegelt igények sáv szélességeinek összege nem haladhatja meg a hullámhossz kapacitását.

A (4.16) kényszerfeltétel leírja a fényút útvonalának fizikai hossza és a fényút jelteljesítménye közötti viszonyt.

5. A módszer előnye

Nagyon nehéz bemutatni a javasolt módszer előnyeit, hiszen egyértelműen jobb megoldáshoz fog vezetni, mint a hagyományos RWA megoldás. Ennek oka az optimalizáció során fellépő plusz egy szabadságfok, a jelszintek állíthatósága. A kérdés csupán az, hogy a megjelenő szabadságfok milyen hatással van a konfigurálhatóságra.

Ennek kiderítésére szimulációkat végeztünk a COST 266 európai méretű referencia hálózat topológiáját alkalmazva. Feltételeztük hogy a csomópontok tisztán optikai kapcsolók (OXC), továbbá feltételeztük, hogy egy tisztán optikai hálózatot hozunk létre, azaz közbelső elektromos átalakítások nem lehetségesek. A szimulációk során az egyrétegű modellt alkalmaztuk. Az útvonalválasztásnál alkalmazott konstans paraméterek megegyeztek a 3. szakaszban bemutatott értékekkel. Mivel a választott hálózat egy európai méretű hálózat és nem egy metró- vagy országos méretű hálózat, amelyre a módszer megvalósíthatósága garantált, ezért az egyes élek hosszát lecsökkentettük az egynegyedére.



7. ábra
ACOST 266 Európai referencia hálózat topológiája

Az így kapott hálózat méreteiben megfelel egy európai méretű ország optikai gerinchálózatának kiterjedésével.

Annak érdekében, hogy bemutassuk az algoritmus előnyeit, kiszámoltuk a maximálisan elvezethető igények számát egy adott konfiguráció esetén. Egy adott forgalmi mátrix egy elemét (igényét) nem lehet elvezetni, ha egy igény kezdő- és végpontja túl messze van egymástól, azaz fizikai hatások miatt a kapcsolat nem építhető ki tisztán optikailag, vagy ha nincs szabad hullámhossz, azaz az RWA problémának nincs megoldása. Meg kell említeni, hogy a javasolt módszer a globális optimumot határozza meg, amely egy NP-nehéz probléma. Ennek köszönhetően egyes szélsőséges esetekben a számolási idők igen nagyok lehetnek, akár több nap is lehet.

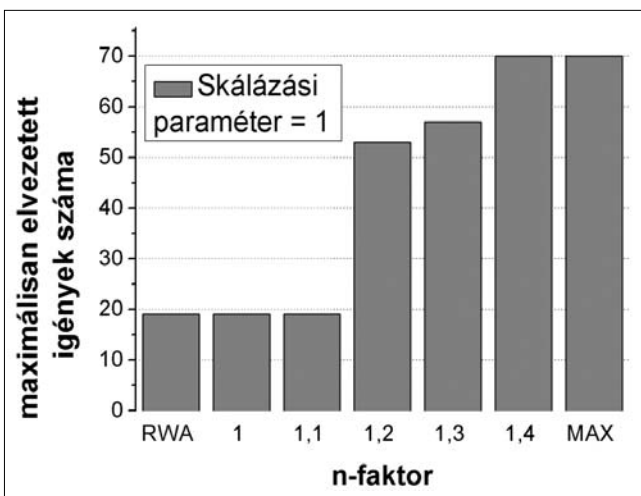
A „maximálisan elvezetett igények száma” azt a szélső helyzetet jelenti, amikor is egy adott konfiguráció esetén meghatározzuk azon igények számát, amit még el tudunk vezetni. Ezt úgy végeztük el, hogy generáltunk egy forgalmi mátrixot k darab igénnyel. Az igények generálása véletlenszerű kezdő- és végcsomópont-sorsolással történt, ezek eloszlását egyenletesnek tekintettük. Ezek után az így kapott forgalmi mátrix igényeit megpróbáltuk elvezetni. Ha sikerült, növeltük az igények számát, ha nem sikerült, csökkentettük. Így meg tudtuk határozni egy maximális igényszámot, amely még megoldáshoz vezetett. Természetesen egy más igénygenerálás adott konfiguráció esetén más maximálisan elvezethető igényszámhoz vezetne.

Összehasonlítottuk a javasolt algoritmust és a hagyományos azonos jelszintet működő RWA algoritmust (8. és 9. ábra). Az y tengelyen a maximálisan elvezetett igények száma található, míg az x tengelyen az n -faktor, ahol az n -faktor a (3.7) korlátban bevezetett változó. Az RWA felirat a hagyományos útvonalválasztással kapott eredményt jelenti. Az $n=1$ megoldás hasonló az RWA megoldáshoz, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben megengedünk az átlagtól kisebb jelszinteket, míg az RWA esetén mindegyik jelszint azonos. Ter-

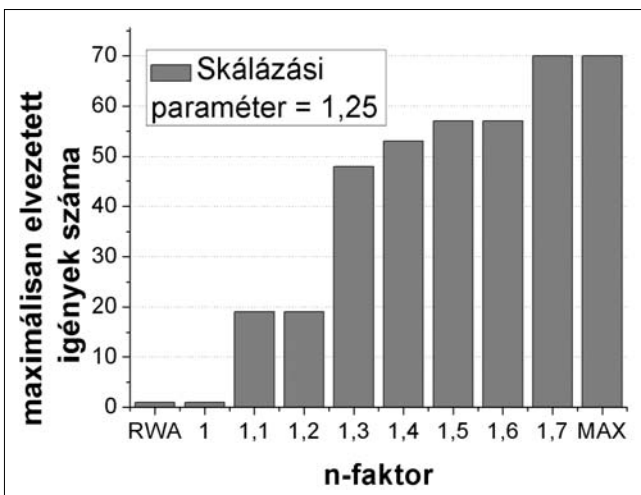
	fix	1	1,2	1,4	1,6	1,8	Brillouin-küszöb
P_{imax} (mW)	1,25	1,25	1,5	1,75	2	2,25	~ 5
P_{imax} (dBm)	0,96	0,96	1,76	2,43	3,01	3,52	~ 7

1. táblázat
n-faktor értékek
mW és dBm
megfelelője

mészetesen az átlagnál nagyobb jelszintet ebben az esetben sem engedünk meg. Az $n > 1$ esetben az egyes csatornák nagyobbak lehetnek, mint az átlagos jelteljesítmény, maximumait a már említett formula alapján határozhatjuk meg (3. szakasz, (3.7) konstans). A „MAX”-al jelölt megoldás azt az esetet mutatja, mikor a fizikai hatásoktól eltekintünk és csupán az RWA problémát oldjuk meg. A skálázási paraméter azt jelenti, hogy az eredeti szálhosszakat megnöveltük a skálázási paraméter arányával annak érdekében, hogy a fizikai hatások dominánsabbak legyenek.



8. ábra
Maximálisan elvezetett igények száma az n-faktor függvényében



9. ábra
Maximálisan elvezetett igények száma az n-faktor függvényében, skálázási paraméter: 1.25

Az eredményekből jól látható, hogy igen jelentős igényszám növekedés érhető el az n-faktor növelésével, szélső esetben még a fizikai korlátok nélküli eset is elérhető.

Az 1. táblázatban az egyes n-faktor értékekből származó jelteljesítmény értékeket tüntettük fel mW, illetve dBm-ben. Az utolsó oszlop a Brillouin-szórás által meghatározott maximális teljesítményt jelöli. Jól látható, hogy a kapott jelteljesítmények a megadott küszöbérték alatt vannak.

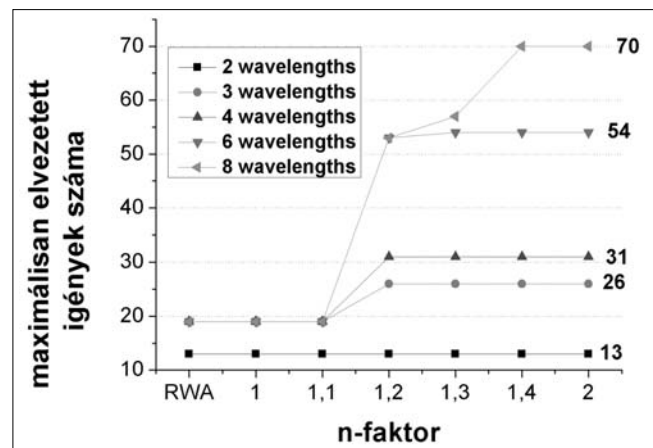
Annak érdekében, hogy meghatározzuk az algoritmus teljesítőképességének hullámhosszfüggését, simulációkat végeztünk a már említett referenciahálózaton különböző hullámhosszak alkalmazásával. Az eredményekből jól látható, hogy növelve a hullámhosszak számát, egyre több igény vezethető el. Ez természetesen magától értendő, ami viszont érdekes, hogy duplájára növelve a hullámhosszakot, minden esetben több mint kétszerannyi igényt tudunk elvezetni. Ez abból következik, hogy minél több hullámhossz van, annál több lehetősége van az algoritmusnak a jelszintek beállítására, azaz a teljesítőképessége növekedni fog a hullámhosszak számával.

Mint ahogy azt már említettük, több hullámhossz – például 32 – esetén meghatározni a maximálisan elvezethető igények számát igen időigényes folyamat, több hetet is igénybe venne a számolás. Ez nem azt jelenti, hogy a javasolt algoritmus alkalmatlan több hullámhosszal rendelkező hálózatok konfigurálására. A probléma a maximálisan elvezethető igények számában van, hiszen ez egy szélsőérték-keresés és a futási idők ott jelentősek, ahol éppen „határon” vagyunk, azaz vagy van megoldás vagy nincs.

6. Összegzés

Cikkünkben egy új módszert javasoltunk az optikai hálózatok útvonal konfigurálására. A módszer lényege a menedzselő rendszer kiterjesztése úgy, hogy az képes

10. ábra
Maximálisan elvezetett igények száma az n-faktor függvényében, különböző hullámhosszak esetén



legyen az optikai csomópontokban található változtatható optikai csillapítók értékeit szabályozni és ezáltal képes legyen különböző adószinteket beállítani.

Bebizonyítottuk, hogy az ilyen típusú optikai hálózatok működőképesek, továbbá megadtuk egy ilyen elven működő hálózat egészértékű lineáris programozáson alapuló konfigurációs algoritmusát. Kimutattuk, hogy ezen az elven konfigurált tisztán optikai hálózatok jobban kihasználhatók, mint a hagyományos, azonos jel-szinttel konfiguráltak.

A szerzőkről

Zsigmond Szilárd a BME Távközlési és Médiainformaticai Tanszékének munkatársa. Kutatási területe az optikai hálózatok fizikai hatásainak számolása, az optikai hálózatokban történő útvonalválasztás. Számos nemzetközi és hazai projekt résztvevője, mint például COST 291; NoE e-Photon/ONe and NoE e-Photon/ONe+; CELTIC PROMISE; NKFF.

Perényi Marcell a BME TMIT harmadéves doktorandusz hallgatója, mérnök-informatikusként ugyanezen a tanszéken szerzett Mester-fokozatot 2005-ben. Kutatási területei közé tartozik az optikai hálózatok tervezése, méretezése, optimalizálása és az általános optimalizálási problémák (például ILP), valamint az IP hálózatok forgalmának azonosítása és elemzése. Tapasztalatokkal rendelkezik továbbá adatbázisok, webszolgáltatások és Microsoft-infrastruktúrák tervezése, karbantartása területén.

Irodalom

- [1] N. Wauters, P. Demister, "Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-Connected Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 5, pp.881–892., June 1996.
- [2] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks", IEEE Transaction on Networking, Vol. 3, No. 5, pp.489–500., October 1995.
- [3] I. Tomkos et al., "Performance Engineering of Metropolitan Area Optical Networks through Impairment Constraint Routing" OptiComm, August 2004.
- [4] Sz. Zsigmond, G. Németh, T. Cinkler "Mutual Impact of Physical Impairments and Grooming in Multilayer Networks" ONDM 2007, Athens, Greece, May 2007.
- [5] G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, (2nd ed.), Academic, New York, 1995.
- [6] Mazroa Dániel, Zsigmond Szilárd "Maximális optikai jelszint meghatározása DWDM rendszerekben" Híradástechnika, Vol. LXII., 2007/6, pp.26–34.
- [7] VPI Transmission Maker, <http://www.vpisystems.com/>

Hírek

A **Motorola** bemutatta hamarosan piacra kerülő **Good Mobility Suite 6.0**-ás verzióját, mely menedzselte szolgáltatásokat tartalmazó virtuális magánhálózatot (VPN), eszközmenedzselést és biztonsági elemeket tartalmazó megoldását kínálja a Windows Mobile eszközökre és közvetlenül vállalati ügyfelek számára lesz elérhető. A programcsomag, melynek részei a Good Mobile Connection, a Good Administration Center és a Good Mobile Messaging, biztonságosabb, integrált és menedzselhető mobil hozzáférést kínál a céges információkhoz és alkalmazásokhoz.

A **Cisco Data Center 3.0** a hálózati kapcsolatra felkészített adatközponti stratégia újabb állomása. Az elképzelés szerint az adatközpont olyan virtualizált környezetté alakul át, amellyel bármilyen, hálózatba kötött eszközön lévő tartalom bárhol, bármikor elérhető. A koncepció része a **Cisco Nexus 5000** sorozatú adatközponti szintű kapcsolócsalád, az egyedülálló hálózati együttműködési képesség lehetővé teszi az alkalmazás- és rendszerpartnernek együttműködése révén, valamint az adatközponti értékesítést támogató partnerképzési stratégia. A Cisco az új Nexus 5000 sorozattal tovább erősíti meglévő adatközponti portfólióját, valamint a stratégiájának megfelelően a következő másfél év során további, új generációs adatközponti termékek és funkciók bevezetésére készül.

A **HP** rendkívül méretrugalmas tárolórendszert mutatott be, amely egyszerűsíti több petabájtnyi adat kezelését, ezért ideális megoldást jelent az online és a digitálismédia-vállalatok számára. A Web 2.0 cégek és a digitálismédia-vállalatok által nyújtott új üzleti szolgáltatások óriási fájlalapot adattömeget generálnak, amelyet tárolni és kezelni kell, majd szükség esetén azonnal lekérhetővé kell tenni. Az olaj- és gázipari, biztonsági és felügyeleti cégek, valamint a genetikai kutatásokat végző vállalatok hasonló kihívásokkal szembesülnek. A **StorageWorks 9100 Extreme Data Storage System (ExDS9100)** óriási tárhelykapacitással és egyszerűsített, integrált felügyelettel reagál az igényekre. A piacon egyetlen más egységes felügyeleti felülettel ellátott hálózati tárolórendszer (NAS) sem képes több petabájtos szintű skálázás támogatására, így a rendszergazdák végre nem csak terabájtnyi, hanem több petabájtnyi tárhelykapacitást is könnyen kezelhetnek. Az ExDS9100 a HP kínálatának első horizontálisan bővíthető környezetekhez szánt megoldása. Ilyen például a „számítási felhő” (cloud computing), ahol a szolgáltatásokat az interneten keresztül nyújtják.

A **Novell** nyerte el az **SAP Pinnacle Award** díját a „Technology: Co-Innovation for Core Business” kategóriában. Ez is bizonyítja, hogy a cég az SAP partnereként nagymértékben hozzájárult az SAP ügyfélközpontú gazdasági rendszerének fejlődéséhez. A Novell díjazásában jelentős szerepet játszott, hogy együttműködve alakították ki az SAP rendszerekhez a SUSE Linux Enterprise Server elsőbbségi támogatását, valamint, hogy az SAP rendszerekhez a SUSE Linux Enterprise Server nagy rendelkezésre állású és virtualizációs funkciókat biztosít.