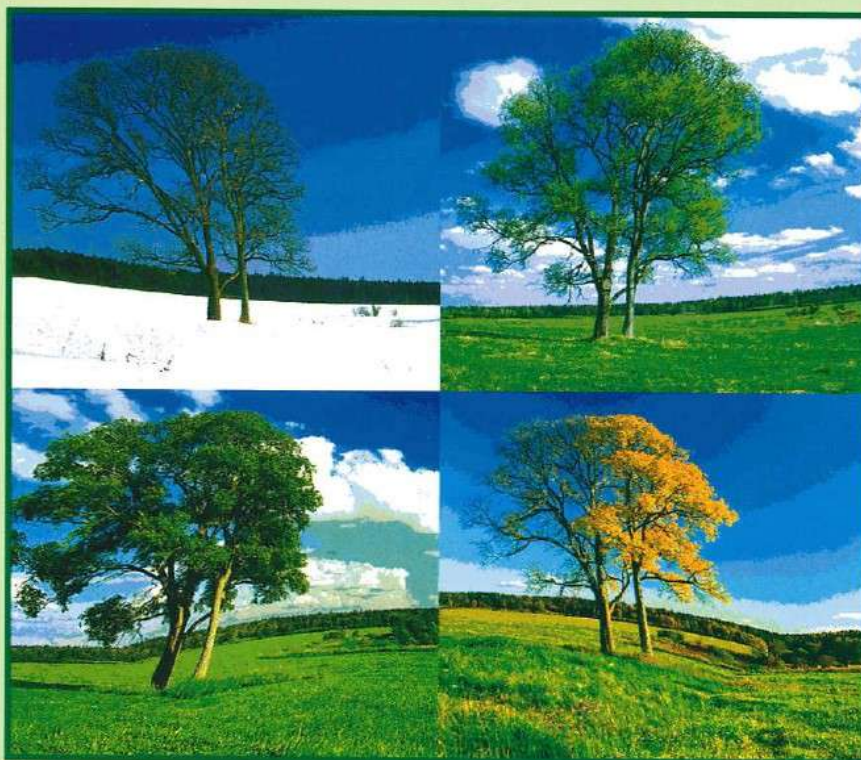


híradástechnika

1945 VOLUME LXII. 2007

hírközlés ■ informatika



Optikai transzport architektúrák

Védelmi módszerek hálózatokban

Virtuális hangtér-szimuláció

2007/2

**A Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület folyóirata
a Nemzeti Hírközlési és Informatikai Tanács együttműködésével**

Tartalom

<i>BEKÖSZÖNTŐ</i>	1
Mitscenkov Attila, Meskó Diána, Cinkler Tibor Forgalomhoz alkalmazkodó védelmi módszerek	2
Szegedi Péter Optikai alapú transzport architektúrák összehasonlító költségelemzése	13
Soproni Péter, Perényi Marcell, Cinkler Tibor Multicast és forgalomkötegelés többretegű hálózatokban	19
Wersényi György Virtuális hangtérszimuláció és a binaurális technológia	25
Dulai Tibor A játékelmélet lehetséges szerepe a távközlésben	33
<i>Hazai fejlesztések</i>	
Benedek Andor, Hammer Géza, Kormos László, Tóth Tamás, Vály László Mikrohullámú berendezés-fejlesztés a Totaltel Kft-ben	37
<i>Melléklet</i>	
2006-ban megjelent számaink tartalomjegyzéke / Szerzők szerinti cikklista	I-XII

Védnökök

SALLAI GYULA a HTE elnöke és DETREKŐI ÁKOS az NHIT elnöke

Főszerkesztő

SZABÓ CSABA ATTILA

Szerkesztőbizottság

Elnök: ZOMBORY LÁSZLÓ

BARTOLITS ISTVÁN
BÁRSONY ISTVÁN
BUTTYÁN LEVENTE
GYŐRI ERZSÉBET

IMRE SÁNDOR
KÁNTOR CSABA
LOIS LÁSZLÓ
NÉMETH GÉZA
PAKSY GÉZA

PRAZSÁK GERGŐ
TÉTÉNYI ISTVÁN
VESZELY GYULA
VONDERVISZT LAJOS

Beköszöntő

szabo@hit.bme.hu

Ez évi első magyar nyelvű számunk, amelyben a 2006. év tartalomjegyzékét is közöljük, jó alkalmat ad egy kis visszatekintésre. Reméljük, hogy Olvasóink haszonnal forgatták tematikus számainkat, amelyekben – szándékunk szerint – egy-egy aktuális területet mutattunk be, áttekintő cikkekkel. A főszerkesztő ezúton is köszönetet szeretne mondani meghívott szerzőinknek színvonalas cikkeikért és a szerkesztőbizottság azon tagjainak, akik egy-egy célszám vendégszerkesztését vállalták és azt sok munkával sikerre vitték. Hadd álljon itt ez a tíz téma és vendégszerkesztői:

- Január:* Az Internet és a WWW aktuális kérdései
– Vonderviszt Lajos
- Február:* Fénytvádközlés – Paksy Géza
- Március:* Beszédtechnológiák – Németh Géza
- Április:* Űrkutatás és távközlés – Kántor Csaba
- Május:* Infokommunikációs rendszerek biztonsága
– Buttyán Levente
- Június:* Válogatás a „Networkshop” előadásaiból
– Tétényi István
- Szeptember:* Távközlési protokollok és szoftverek
– Győri Erzsébet
- Október:* Újgenerációs hálózatok – Paksy Géza
- November:* Távközlés-szabályozás – Bartolits István
- December:* „Ambient Intelligence”
– Győri Erzsébet és Imre Sándor

Az új évben továbbra is a legtöbb magyar nyelvű számunkat, illetve a szám jelentős részét egy-egy fontos témának szenteljük. A tavalyi év néhány témájában ismét össze fog gyűlni több érdekes, új mondanivaló, valamint további célszámokat kívánunk szentelni a szolgáltatásminőségnek, a digitális műsorszórásnak és a GRID-eknek.

A mostani, februári számunk egy válogatás a beküldött, zömükben kutatási jellegű cikkekből.

Mitcsenkov Attila, Meskó Diána, Cinkler Tibor korszerű integrált adatátviteli- és távközlő hálózatok hibavédelmi módszereivel foglalkoznak. A javasolt eljárásokkal megosztott erőforrás-használat és bizonyos mértékű terhelés-kiegyenlítés, valamint a védelmi erőforrások átrendezése révén kívánnak nagyobb hatékonyságot elérni.

Szegedi Péter optikai alapú transzport architektúrák összehasonlító költségelemzésével foglalkozik. Olyan egyszerű forgalmi elemzések során meghatározható paramétereken alapuló költségmodelleket ismertet, amelyek alkalmazása segítheti a beruházási döntések meghozatalát arra vonatkozóan, hogy mikor és milyen feltételek mellett érdemes átmozogni a jellemzően tisztán IP alapú architektúráról az optikai alapú architektúrák irányába.

Soproni Péter, Perényi Marcell és Cinkler Tibor a multicast forgalomelvezetés hatékonyságát vizsgálják optikai WDM (Wavelength Division Multiplexing) hálózatokban. Új hullámhossz-gráf modellt vezetnek be olyan kapcsoló eszközök megjelenítésére, melyek képesek tisztán optikai hullámhossz elágaztatásra és megmutatják a multicast jó skálázhatóságát az unicast-tal szemben.

A virtuális hangtér-szimuláció és a binaurális technológia a témája *Wersényi György* cikkének. Itt a hangtér létrehozása fejhallgatón keresztül történik és célja az autentikus hangtérleképezés, azaz olyan akusztikus környezet megvalósítása, amely a lehető legjobban hasonlít a valóságra. A cikk bemutatja az ide vonatkozó fogalmakat, mérési eljárásokat, a szimuláció lényegi lépéseit és korlátait, elsősorban a fejhallgató lejátszás szemszögéből.

Dulai Tibor A játékelmélet lehetséges szerepe a távközlésben című cikkében megkísérli bemutatni, hogyan használhatóak a játékelmélet eredményei az egyensúly meghatározásában néhány (főleg mobil) távközlési szituáció esetén.

Végül egy kezdeményezésünkre szeretnénk az Olvasó figyelmét felhívni. Tervbe vettük, hogy rendszeresen fogunk jelentkezni értékes és újszerű hazai fejlesztési eredményet bemutató cikkekkel. *Benedek Andor, Hammer Géza, Kormos László, Tóth Tamás, Vály László* cikke az első a sorban, amely a rádiórelé-technika néhány új módszerének ismertetése után bemutatja a mikrohullámú berendezések fejlesztésére és gyártására szakosodott Totaltel Kft új digitális rádióberendezés-családját.

Szabó Csaba Attila,
főszerkesztő
BME Híradástechnikai Tanszék

Forgalomhoz alkalmazkodó védelmi módszerek

MITCSENKOV ATTILA, MESKÓ DIÁNA, CINKLER TIBOR

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék, HSNLab
{mitcsenkov, mesko, cinkler}@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: védelem, adaptív, dinamikus, átrendezés, újrakonfigurálás

A korszerű integrált adatátviteli- és távközlő hálózatok növekvő sávszélesség-igényével párhuzamosan mind fontosabbá válik hibátűrésük. A cikkben bemutatott hibavédelmi módszerek megosztott erőforrás-használat és bizonyos mértékű terhelés-kiegyenlítés, valamint a védelmi erőforrások átrendezése révén kívánnak nagyobb hatékonyságot elérni. Több referenciaként szolgáló algoritmus kerül felhasználásra, lehetővé téve a komplex módszereket alkotó összetevők hatásának elkülönült vizsgálatát. Ez elvezethet minket az összetettebb algoritmusok eredményeinek helyes értelmezéséhez.

1. Bevezetés

Az internet megjelenése óta az elérhető szolgáltatások, alkalmazások köre rohamosan bővült, a kezdetekben csak néhány kutatóközpont közti kommunikációra használt hálózat mindennapjaink részévé vált. Megjelent egy sor új szolgáltatás (például Peer-to-Peer, Grid Computing, Video on Demand, Voice over IP, banki szolgáltatások stb.). Napjainkra a hajdan elkülönült távközlő- és számítógép-hálózatok integrálódásának következtében már ugyanazt a digitális hálózatot használhatja a kábeltelevízió, a telefon és a számítógépünk is [1,2].

Az alkalmazások egyre szélesebb köre mellett természetesen a felhasználók száma is ugrásszerű növekedésnek indult [4]. E kettő együttesen pedig egyre nagyobb adatforgalmat eredményez (az internet teljes forgalma a számítások szerint hozzávetőlegesen évente megkétszereződik [5]). Az egyre komolyabb sávszélesség-igény új technológiák kialakulását segítette elő, például az optikai gerinchálózatok térnyerését is ennek köszönhetjük.

E szolgáltatások különböző speciális igényeket támasztanak a hálózattal szemben. Egy beszéd- vagy mozgókép-átviteli szolgáltatásnál nem engedhető meg az a nagyfokú késleltetés-ingadozás vagy csomagvesztés, ami egy böngésző-alkalmazásokat kiszolgáló csomagkapcsolt hálózat esetében még nem zavaró. Egyfelől tehát fontossá vált a szolgáltatás-minőség megfelelő szintű biztosítása (QoS – Quality of Service), másfelől foglalkozni kell a hibátűrési képességekkel is (QoR – Quality of Resilience) [3]. Így a hibákkal szembeni ellenálló-képesség biztosítása a minőség garantálása mellett az útvonalválasztó algoritmusok továbbfejlesztésének egyik fontos iránya lett – a cikkben bemutatott, vizsgált algoritmusok e célt szolgálják.

Nyilvánvaló, hogy az IP-nél megszokott „best effort” jellegű csomagtovábbítás jellegéből adódóan nem alkalmas végpontok közötti garantált minőségű szolgáltatás nyújtására, hiszen a csomagok útja időben folyton változik, nem határozható meg előre, és nincs biztosí-

ték arra, hogy a hálózat erőforrásai egy kapcsolat minden csomagja számára egyformán hozzáférhetőek. Ehhez egyebek mellett a teljes útvonal rögzítésére, ismeretére, erőforrásainak lefoglalására van szükség – és így végpont-végpont útvonalválasztáshoz jutunk.

Minden védelmi megoldás alapvető szükséglete, hogy két pont között találjunk több, egymástól (legalább részben) független utat – különben a hálózat meghibásodott alkotóelemét nem tudjuk elkerülni. Ez tehát szövevényes, többszörösen összekötött topológiát feltételez, ami tipikusan a gerinchálózatok sajátossága, hozzáférői hálózatokra kevésbé jellemző [3].

Gerinchálózatokon döntően optikai alapú technológiákat használnak a nagy sávszélesség-igényeknek való megfelelés érdekében. Ezeknek a vizsgált problémakör szempontjából fontos közös jellemzője a (virtuális) áramkörkapcsolt átvitel alkalmazása [2,6,7].

2. Hálózati védelem

A bevezetőben leírtaknak megfelelően szükség van a hálózatok meghibásodás elleni védelmére.

Az egyre megbízhatóbb hálózati eszközöknek köszönhetően lehetséges viszonylag egyszerű, hatékony algoritmusok alkalmazása. Egy akár országos méretű hálózatban egyidejűleg bekövetkező két meghibásodás esélye elenyészően csekély, de még európai méretű hálózatok esetén is indokolatlanná válhat a többszörös hibák ellen is garanciát nyújtó védelem alkalmazása, mert nem térül meg a szükséges erőforrás-többlet. Ezért a cikkben bemutatott algoritmusok fejlesztése során éltünk azzal a szakirodalomban elterjedt feltételezéssel, hogy a hálózatban csupán egyszeres hibák megjelenésével kell számolnunk. Különböző korlátozások bevezetésével e módszerek akár többszörös hibák ellen is felkészíthetőek [8]. A védelem célja: a bekövetkező hiba következményeinek elhárítása, minél gyorsabb helyreállítás, minél rövidebb kiesés, minél kisebb mértékű információ-vesztés [3,6,9].

2.1. Védelem alkalmazásának előnyei és hátrányai

Egy védelmi stratégia kialakításakor több különböző szempontot figyelembe kell vennünk. Nyilvánvaló, hogy amennyiben nem csak a hálózatba érkező igények számára foglalunk utat, hanem védelem céljára is, az többlet-számításokat fog igényelni, ezáltal megnő az egyes igényekre eső összeköttetés-felépítési idő.

A hiba következményeinek gyors felszámolása érdekében a használt protokollnak minél gyorsabban kell reagálnia: a lehető legrövidebb idő alatt kell a hibát felderíteni, és a sérültről az üzemképes, tartalék hálózatrészre átkapcsolni. E folyamat egyik legfontosabb összetevője az útvonalválasztó rutin, de teljesítményét befolyásolják a különböző menedzsment-funkciók (hiba-detektálás, kapcsolás stb.) megvalósításai is. Az átkapcsolás lehetőségének fenntartásához pedig szükség van erőforrások visszatartására: a hálózat egy részét nem használhatja a valós forgalom, azt a hiba esetén működésbe lépő tartalék útvonalak foglalják.

Az ideális védelmi stratégia kiválasztása a számítási idő, a reagálás gyorsasága és a takarékoság közötti kompromisszum eredménye lesz. Ha az erőforrás-igényt szeretnénk csökkenteni, a számítási idő nő meg, ha gyors reakciót és alacsony késleltetést tűzünk ki célul, az erőforrásigény fog megugrani [6,9].

Az itt bemutatott módszerek célja a védelmi erőforrások adaptív átrendezésében rejlő lehetőségek bemutatása. Ezért a számítási igény növekedése terén engedményeket teszünk az erőforrásokkal való minél hatékonyabb gazdálkodás érdekében. Amikor megtehető, a teljesítmény érdekében erős számítási idő növekedést is kockáztatva, szükség esetén az idővel való takarékoság érdekében pedig a lehetőségeket némiképp korlátozva – éppen a fent említett kompromisszumot keresve.

2.2. Védelmi stratégiák csoportosítása

2.2.1. Védelem vagy helyreállítás?

A bekövetkező hibákra történő reagálás és az ezt megelőző felkészülés alapján beszélhetünk védelemről vagy helyreállításról.

Védelem alkalmazásakor még a meghibásodás előtt, az igény elvezetésekor keresünk és foglalunk számára védelmi utat, és a hiba bekövetkeztekor azonnal átkapcsolunk erre az előre számított védelmi útra.

Helyreállítás használatakor a meghibásodást követően kezdünk a hálózatban más utat keresni az érintett igények számára, nincsenek előre számított védelmi utak. Ezáltal az erőforrásigény csökken, és rövidebb lesz az igények elvezetéséhez szükséges számítási idő, de előfordulhat, hogy nem találunk alkalmas alternatív utakat a hiba bekövetkeztekor.

2.2.2. Hozzárendelt vagy megosztott védelem?

Nyilvánvaló, hogy a védelem többlet erőforrásigényt jelent. Újraemlíthetünk egy kompromisszumot a számítási idő és az erőforrásigény között.

Egyszerű, de kevésbé takarékos megoldás a hozzárendelt védelem alkalmazása. Ekkor minden igény va-

lós forgalmat szállító „üzemi útja” mellé keresünk egy attól független, vele azonos kapacitású „védelmi utat”. Ez a hiba bekövetkezéséig tartalékként funkcionál, valós forgalmat nem szállít.

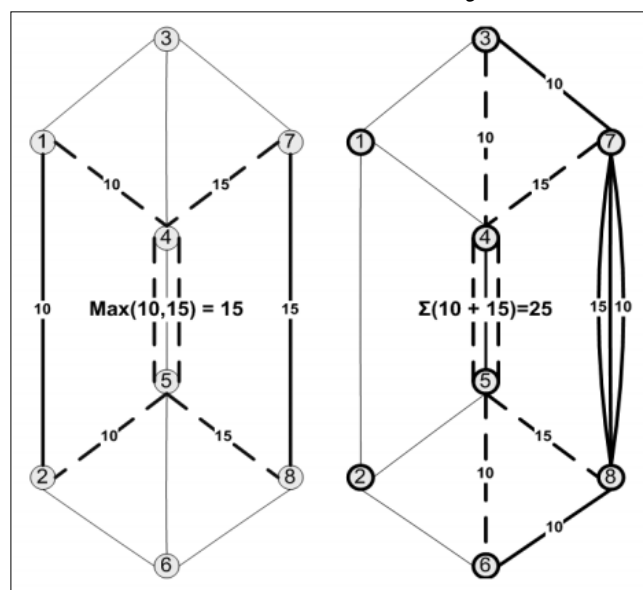
Bonyolultabb, de takarékosabb megoldás a megosztott védelem alkalmazása. Ennek alapja a bevezetőben említett, többszörös hibák kizárására vonatkozó feltételezés: két különböző igény üzemi útja, amely nem használ közös erőforrásokat, nem hibásodhat meg egyszerre, azaz nem válhatnak egyszerre mindketten a védelmi útjukra. Ezért ezek védelme használhat közös erőforrásokat. Az „osztás” menete és feltételei nyomon követhetők az 1. ábrán: adott két igényünk, 10 és 15 egységnyi kapacitással. Az üzemi utakat folytonos, a védelmi utakat szaggatott vonal jelzi. Az első esetben (bal oldali ábra) a két üzemi út egymástól független, így a védelmi útjaik közös szakaszán elegendő a sáv szélességük maximumát foglalni védelem céljából. Így bármelyikük üzemi útja hibásodik meg, a 4-5 élen foglalt 15 egységnyi kapacitás elegendő lesz az átkapcsolt forgalom számára – egyszerre mindkettő pedig a fentebb vázolt okok miatt nem sérülhet meg. A második esetben (jobb oldali ábra) viszont a két igény üzemi útjának van közös szakasza: a 7-8 él. Emiatt kettejük védelme nem használhat közös erőforrásokat, hiszen a 7-8 él meghibásodása esetén mindkettő forgalma a 4-5 éle fog átkerülni. Ez esetben tehát a két igény összegének megfelelő 25 egységnyi kapacitást kell védelem céljából a 4-5 élen lefoglalni.

A megosztott védelem alkalmazásának következménye egy takarékosabb algoritmus lesz, amely azonban a megoszthatóság felderítésének problémája miatt nagyobb számítási időt eredményez.

2.2.3. Szakasz, szegmens vagy útvédelem?

A szakaszvédelem a legkézenfekvőbb megoldás: minden szomszédos csomópontpár közti összeköttetéshez rendelhetünk egy alternatív útvonalat, amely a

1. ábra Megosztott védelem



szakasz két végpontját köti össze. A szakasz kiesése esetén teljes forgalmát átirányítjuk a hozzá rendelt védelmi útra.

Egy-egy igény elvezetése után kereshetünk a forrás és nyelő pontpár között egy, az üzemi úttól teljesen független, védelmi útvonalat, ekkor útvédelemről beszélünk. Az egy szakasznál hosszabb, de egy egész útnál rövidebb hálózatrészek védelmét pedig szegmensvédelemnek nevezzük.

2.2.4. Statikus, dinamikus vagy adaptív védelem?

Statikus védelem esetén minden pontpárra előre meghatározott üzemi és védelmi útvonalak közül választunk. Dinamikus a védelem, amennyiben az egyes pontpárok között meghatározott útvonalak időről időre változnak. Adaptív védelemről akkor beszélünk, ha az útvonalválasztó rutin képes a hálózat állapotának, terhelési viszonyainak megfelelően a védelmi utak rendszerének, a hálózat forgalmi viszonyainak megváltoztatására.

2.2.5. Hibafüggő vagy hibafüggetlen?

Az angol szakirodalomban failure-dependent (hibafüggő), illetve failure-independent (hibafüggetlen) néven szereplő fogalmak.

A hibafüggetlenség fogalma jelenti azt, hogy egy algoritmus az adott igény védelmét a hiba helyétől függetlenül határozza meg, tehát az üzemi útjának bármely alkotóeleme sérül is meg, a forgalom mindig ugyanarra a védelmi útra helyeződik át.

Hibafüggő ellenkező esetben: amikor különböző helyen bekövetkezett hibák esetén egyazon üzemi úthoz más és más védelmet rendel.

3. A hálózat modellje

Az egyes konkrét fizikai megvalósítások jellemzőitől független logikai modell megalkotása volt a cél, és erre a hálózatok legelterjedtebb matematikai reprezentációja, a gráf-modell [3] teljes mértékben megfelelő volt.

Ez biztosítja a minél szélesebb körű alkalmazhatóságot: az itt bemutatott algoritmusok bármely technológiával képesek együttműködni, amennyiben az adott technológia és a logikai gráf-reprezentáció közötti átjárást sikerül biztosítani – ez pedig a legtöbb esetben megtehető. Egyszerű irányítatlan gráfot alkalmazunk, ahol a szakaszok legfontosabb jellemzője a teljes kapacitásuk (sávszélességük) és az egységnyi kapacitás költsége. A bevezetőben említettekkel összhangban végpont-végpont útválasztást valósítunk meg.

A cél az egyes algoritmusok teljesítményének vizsgálata volt, így a könnyebb implementálhatóság és áttekinthetőség érdekében központosított útvonalválasztást alkalmazunk. Az elosztott rendszer felé történő továbblépés feltétele az egyes csomópontokban a hálózatról alkotott kép megfelelő részletessége és pontossága lenne – e kérdéssel bővebben foglalkozik pl. [10].

Az igények dinamikusan, a szimuláció szempontjából előre nem ismert minta szerint érkeznek. Ennek megvalósítása természetesen a reprodukálhatóság és összehasonlíthatóság érdekében egy előzetesen összeállított forgalmi állomány.

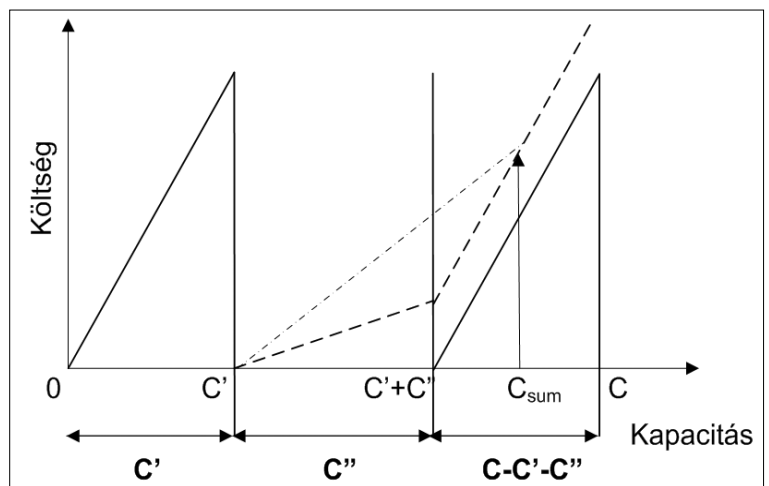
4. Dinamikus védelmi algoritmusok

A következőkben bemutatásra kerülnek a vizsgált algoritmusok, működésük, főbb jellemzőik. Referenciaként és első lépcsőként szolgál egy egyszerű, hibafüggetlen útvédelmi módszer. Ezt több lépésben továbbfejlesztve jutunk el a nagyobb tudású, komplexebb algoritmusokhoz. Az egyes lépcsőket jelentő változatok leírása a könnyebb megértést, eredményeik értelmezése a különbségek hatásának szemléltetését szolgálja.

Különböző szempontok alapján csoportosíthatjuk a bemutatott algoritmusokat. Egyikük hibafüggetlen, a többi hiba-függő (ld. 2.2.5). Vannak köztük út és szakasz-védelmet megvalósító módszerek is (ld. 2.2.3). Egy részük a korábban rögzített útvonalakhoz alkalmazkodó dinamikus, más részük azokat részben változtatni képes adaptív megoldás (ld. 2.2.4).

Az osztott védelem alkalmazásának következményként egy igény védelmi útja számára az egyes éleken elérhető kapacitás két részből tevődik össze. Egyrészt használhatja a tőle független forgalmak ott lefoglalt védelmi erőforrásait, másrészt az adott él még nem használt, szabad kapacitását (lásd 1. ábra). Valós többletfoglalást természetesen csak ez utóbbi jelent, ezért ezt nagyobb súllyal vesszük figyelembe a védelmi út költségének számításakor, míg előbbit csak ennek töredékével, ezáltal próbáljuk a védelmeket a megosztott erőforrások használatára kényszeríteni (2. ábra). E két súlyhányadosának értéke hatással van a védelmi utak kiépítésekor a felhasznált szabad és megosztott kapacitások arányára, valamint közvetve az üzemi, illetve védelmi utak hosszára.

2. ábra
Költségek számítása megosztott védelem esetén



Ha a hányados egyhez közeli, a védelmi utak közel egyenlő mértékben támaszkodnak a megosztható védelmi kapacitásra, és a még nem használt, szabad erőforrásokra. Így megközelítőleg egyforma hosszúságú üzemi és védelmi útvonalakhoz jutunk. Ez ugyan egyszerűbbé teheti a védelmi utak rendszerét, de éppen a megosztott védelem előnyeit veszítjük el vele: nem segítjük elő a közösen használható erőforrások alkalmazását. Ellenkező esetben, ha a megosztott kapacitából foglalt rész súlya igen kicsi, a védelmi utak építésekor használható, igen olcsó megosztható kapacitás használata, és az ehhez képest igen drága kihasználatlan kapacitás elkerülése érdekében indokolatlanul hosszú elkerülő szakaszok alakulhatnak ki.

4.1. Hibafüggetlen megosztott útvédelem (Failure-independent SPP)

Failure Independent Shared Path Protection (SPP), avagy megosztott útvédelem, a hiba helyétől független védelmi út alkalmazásával. A legegyszerűbb módszer: hibafüggetlen, dinamikus útvédelem.

Működésének lépései:

1. lépés: Az érkező o igény számára Dijkstra algoritmusával üzemi út keresése. Ha sikerül, védelmi utat keresünk ($\rightarrow$ 2. lépés), ha nem, az igényt blokkoljuk és vesszük a következőt ($\rightarrow$ 1. lépés).

2. lépés: Az üzemi út éleit átmenetileg töröljük a hálózathoz, ezeket ugyanis a védelmi út nem használhatja majd.

3. lépés: Kiszámítjuk a fent leírt költségfüggvényhez szükséges C' és C'' értékeket (lásd 2. ábra) az egyes élekre. Természetesen a cél az, hogy a védelmi út allokálásához minél kevesebb eddig nem használt sáv szélességet foglaljunk, ezt fejezzük ki ennek magasabb költségével is. Ehhez szükség van tehát arra, hogy tudjuk: a hálózat egyes élein mennyi megosztható védelmi kapacitás található. Ez pedig kiszámítható az élen áthaladó azon védelmi utak kapacitásából, melyekhez tartozó üzemi utak függetlenek az új o igény üzemi útjától. Így tehát az üzemi út minden egyes l' élére, valamint a hálózat minden szóba jöhető (az üzemi úttól független) l'' élére kiszámítjuk a $C_{l',l''}$ értéket, melynek jelentése: az adott l' él meghibásodása esetén az l'' élen az igény összesen $C_{l',l''}$ védelem számára felhasználható, megosztható kapacitás található.

4. lépés: Ezen algoritmus hibafüggetlen módszer, ezért egy olyan értékre van szükségünk, amely bármely él meghibásodása esetén érvényes, és kifejezi, mennyi megosztható kapacitás található az adott élen bármely hiba esetén. Ezért végül vesszük a $\min_l \{C_{l',l'}\}$ értéket – ez lesz az l' élre adódó költség kiszámításakor a 2. ábrának megfelelő C'' érték. Ezek után képezhetjük a $C_{sum} - C_{igény}$ értéket, amely megmondja, hogy mennyi szabad kapacitás lefoglalására lesz szükség az adott élen és e kettő megfelelően súlyozott összege adja meg az l' él költségét.

5. lépés: Ismét alkalmazzuk a Dijkstra-algoritmust, és amennyiben ez talál védelmi utat az előzőekben módosított élköltségű hálózatban, az igényt elfogadjuk,

üzemi és védelmi útjait lefoglaljuk a hálózatban – ellenkező esetben blokkolás történik. Végül ugrás a következő igényre ($\rightarrow$ 1. lépés)

4.2. Hibafüggő megosztott útvédelem (Failure-dependent SPP)

Failure Dependent Shared Path Protection (SPP), azaz megosztott útvédelem, a hiba helyétől függő védelmi út alkalmazásával. Hibafüggő, dinamikus útvédelem.

Működése nagyban hasonlít az előző módszerhez, az első három lépés lényegében megegyezik. A különbség a védelmi utak keresésében, pontosabban azok számában mutatkozik meg. Ezúttal az üzemi út minden egyes l' éléhez nyilvántartunk egy-egy külön védelmi utat, amelyre az l' él meghibásodása esetén a forgalom áthelyeződik. Ezáltal feleslegessé válik a negyedik pontban leírt minimum-számítás. Az ötödik pontban leírt Dijkstra-algoritmust lefuttatjuk az üzemi út minden egyes l' élének megfelelően módosított gráfban az ahhoz tartozó $C_{l',l''}$ értékekkel. Ha sikerült minden esetben az üzemi úttól független védelmi utat találni, az igény üzemi és védelmi útjait lefoglaljuk, ellenkező esetben blokkolás következik be.

Jól láthatóan ez annyiban jelent előrelépést az előzőhöz képest, hogy most nem kellett a kapott $C_{l',l''}$ értékek minimumát venni, lehetővé téve a megosztott védelmi erőforrások jobb kihasználását.

4.3. Megosztott védelem részben független utakkal (PDSP)

Partially Disjoint Shared Path Protection (PDSP), azaz megosztott védelem részben független utak alkalmazásával. Hibafüggő, dinamikus szegmensvédelem.

Amint nevéből is látszik, nem az üzemi utaktól teljesen független védelmi utakkal dolgozik. A korábban leírtakkal összhangban feltehetjük, hogy csak egyszeres hibák fordulnak elő a hálózatban. Az üzemi út minden éléhez egy külön védelmi utat rendelünk és így az egyes hibaesetekhez rendelt védelmi utak a hálózat bármely élét használhatják, a hiba esetén érintett él kivételével. Ennek eredményeként a védelmi utak nem feltétlenül lesznek függetlenek a hozzájuk tartozó üzemi utak egészétől. Ezáltal természetesen még nagyobb mozgásteret adunk az algoritmusnak, mint az előzőleg említett módszernél.

A hibafüggő megosztott útvédelemtől tehát mindössze az ideiglenesen törölt élek halmazának meghatározásában különbözik: ezúttal nem a teljes üzemi út kerül törlésre, a második lépésben megelégszünk az éppen vizsgált l' él átmeneti takarásával. Ezt követően a fent leírtak szerint a kiszámított $C_{l',l''}$ értékek alapján Dijkstra algoritmusával védelmi utat keresünk és ha ez minden l' él esetén sikeres volt, az üzemi- és védelmi utakat lefoglaljuk, ellenkező esetben blokkolás következik be.

Ezáltal a lehetséges védelmi út keresésekor a hálózat nagyobb részhalmaza áll rendelkezésre (csak egy élet törölünk egy egész útvonal helyett), növelve a védelmi útvonalválasztás mozgásterét.

5. Adaptív védelmi algoritmusok

Az eddig bemutatott algoritmusok a korábban a hálózatba bekerült igények üzemi és védelmi útjait a későbbiek folyamán már nem képesek módosítani. Ez jelentősen megnehezíti a később kialakuló szűk keresztmetszetek felszámolását, pedig a legtöbb hálózat esetén ezzel számolnunk kell.

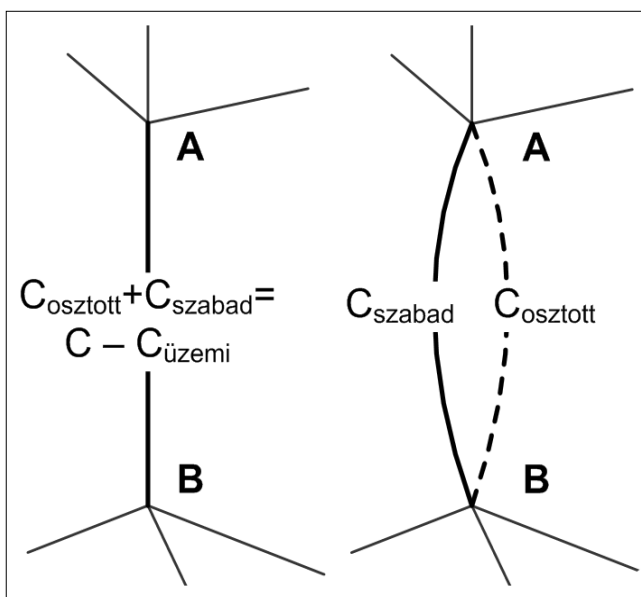
Az adaptív módszerek működésének lényege a védelmi utak átkonfigurálása a hálózat terheléséhez igazodva. Ezek megszakítása ugyanis a felhasználók számára nem észrevehető: hiba esetére fenntartott erőforrások valódi forgalmat nem bonyolítanak. Ezáltal a túltelített hálózatrészek, összeköttetések terhelése csökkenthető, ami kiegyenlítettebb terhelést eredményez és csökkenti a blokkolás esélyét.

5.1. Élkettőzés (Link Duplication – LD)

A védelmi utak átrendezése felvet egy komoly problémát: eddig az elérhető megosztott kapacitások ($C_{l,l'}$) számításakor erősen támaszkodtunk a már lefoglalt védelmi utakra. Jelen helyzetben viszont több védelmi utat szeretnénk egyidejűleg meghatározni vagy megváltoztatni, érintve a már korábban lefoglalt, de most áthelyezendő védelmeket – ezek előzetes ismeretére tehát nem támaszkodhatunk. A problémát az jelenti, hogy egy adott l él esetén most nem tudjuk meghatározni egy adott o_l igény számára a felhasználható kapacitás értékét, az ugyanis függ a vele egyidejűleg elvezetésre váró o_2, o_3 stb. igényektől is – mivel azok adott esetben szintén használhatják az l élet.

Erre jelent megoldást a többtermékes folyam probléma (Minimal Cost Multicommodity Flow, MCMCF [11]) alkalmazása. A szakirodalomban található több különböző megközelítés is az MCMCF probléma kezelésére: heurisztikus módszerek, iteráció, vagy az egészértékű lineáris programozás (ILP) használata [12,14,17]. Az e cikkben bemutatott algoritmusok ILP-n alapulnak [13].

3. ábra Az élkettőzés lépése



Az ILP alkalmazása azonban felvet egy problémát: csak lineáris költségfüggvényekkel működik. A védelmi utak keresésekor az egyes élek költségfüggvénye viszont nem lineáris, hanem a 2. ábránál leírtaknak megfelelően két, külön-külön lineáris függvény kombinációja. Ezt a problémát az okozza, hogy amíg a védelem talál elérhető megosztott kapacitást, addig azt használja – alacsony költségek mellett –, ezt követően viszont a jóval drágább szabad erőforrásokhoz kell nyúlnia. A szakaszonként lineáris költségfüggvények leírásához szükséges segédváltozók bevezetése hálózatok, gráfok esetén jól szemléltethető az élkettőzés modellezési trükkjével.

A szomszédos A és B pontok között futó élen az összetett költség-függvény valójában két kapacitás-tartománnyal és az ezekhez tartozó lineáris költségfüggvényekkel számol. Válasszuk szét e kettőt: ahol eddig egyetlen él futott, oda húzzunk be kettőt, és osszuk meg közöttük a kapacitást – értelemszerűen a két különböző kapacitás-tartomány szerint. A megosztott erőforrásokhoz rendeljük a hozzá tartozó alacsonyabb lineáris költséget, a szabad erőforrásokhoz pedig a magasabbat (3. ábra). Így módon kaptunk két élet az eddigi egy helyett, viszont most már csupa lineáris költség-függvényünk van és alkalmazhatjuk az ILP eszközt [14] a többtermékes folyam probléma megoldására.

5.2. A probléma ILP megfogalmazása

Védelmi út keresésekor tehát nem csak az új igény védelmi útjának próbálunk helyet keresni, hanem a már lefoglalt igények egy csoportjának védelmét is változtatni fogjuk. Pontosabban egy l él kiesésének szimulálásakor az összes olyan igény vonatkozó védelmi útját töröljük, amely üzemi élként használta az l élet. Ezeknek és az új igénynek egyidejűleg próbálunk védelmet találni a kiesett él átmeneti törlése után maradó hálózatban. A következőkben leírt ILP probléma megoldása adja meg az új védelmi utak rendszerét.

Felmerülhet a kérdés, hogy miért csak az l él kiesése által érintett védelmi utakat rendezzük át és miért nem az összeset? Ennek magyarázata az adódó matematikai probléma komplexitása [15,16]. A hálózatban (gráfban) összesen jelen lehet az igények száma $|V|^2$ -tel arányos, míg az adott élen futó védelmi utak száma $|V|^2/|E|$ -vel. A lineáris programozási feladat változóinak száma tehát így kezelhető szintre csökken.

A védelmi utak előző pontban leírt halmazának együttes elvezetését adó többtermékes folyam probléma ILP megfogalmazása a következő:

$$\text{Célfüggvény: } \min \sum_{o \in T_e} \left\{ \sum_{l \in E^{\text{osztott}}} x_l^o \omega_l + \sum_{l \in E^{\text{szabad}}} x_l^o \gamma_l \right\} \quad (1)$$

E^{szabad} az élkettőzéskor a szabad kapacitásból keletkezett éleket, E^{osztott} a megosztott kapacitásból keletkezett éleket jelöli, e az aktuális vizsgált él (melynek kiesését szimuláljuk), T_e az elvezetendő igények (védelmek) halmaza, az x_l^o változó értéke jelzi az o igény védelmi útjának l élre eső részét, ω_l a szabad, míg γ_l a megosztott erőforrások költségét.

A feltételek:

$$\sum_{o \in T_e} x_i^o \leq C_i^{szabad} \quad \text{minden } \forall l \in E^{szabad} \text{ esetén} \quad (2)$$

$$\sum_{o \in T_e} x_i^o \leq C_i^{osztott} \quad \text{minden } l \in E^{osztott} \text{ esetén} \quad (3)$$

$$\sum_{\forall j \in V, j \neq i} x_{ij}^o - \sum_{\forall k \in V, k \neq i} x_{ki}^o = \begin{cases} 0 & \text{ha } i \neq s^o \wedge i \neq d^o \\ b^o & \text{ha } i = s^o \\ -b^o & \text{ha } i = d^o \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{minden} \\ o \in T_e, i \in V \\ \text{esetén} \end{matrix} \quad (4)$$

$$0 \leq x_i^o \leq b^o \quad \text{minden } l \in E \text{ és } o \in T_e \text{ esetén} \quad (5)$$

$$\sum_{ik} x_{ik}^o = b^o \cdot z_{ik}^o \quad \text{minden szomszédos} \quad (6)$$

$$i, k \in V \text{ és } o \in T_e \text{ esetén}$$

$$z_{ik}^o \in \{0, 1\} \quad (7)$$

(2) és (3) a kapacitáskorlátokat jelentő feltételek, (4) felelős a folyammegmaradásért, (5) az x változók értékére ad nyilvánvaló korlátot, (6) bevezet egy, az „osztatlanságot” biztosító bináris segédváltozót, (7) pedig a z változók bináris voltát rögzíti.

Az „osztatlanság” fogalma alatt az élkettőzés alkalmazásához szükséges feltételt értjük: ha egy védelmi út i pontba beérkező forgalma nem is egyetlen élen távozik onnan, csak az egyazon él kettőzésével keletkezett két élen osztható. A (6) feltétel másként megfogalmazva annyit jelent, hogy egy ilyen élpáron vagy átmegy az adott o igény teljes forgalma, vagy teljesen elkerüli azt.

5.3. Hibafüggő megosztott útvédelem élkettőzéssel (SPP-LD)

Failure Independent Shared Path Protection with Link Duplication (SPP-LD), avagy adaptív megosztott útvédelem. Adaptív módszer, mely képes a már lefoglalt védelmeket a megváltozott terhelésnek megfelelően átrendezni.

Működésének lépései:

1. lépés: Az érkező o igényre Dijkstra algoritmusával üzemi út keresése. Ha sikerül, védelmi utat keresünk ($\rightarrow 2$. lépés), ha nem, az igényt blokkoljuk, vesszük a következőt ($\rightarrow 1$. lépés)

2. lépés: Sorra vesszük az üzemi út l' éleit. A következő l' élre összegyűjtjük a rajta áthaladó üzemi úttal rendelkező igények ezen élhez tartozó védelmi útjait és ezeket kiegészítve az új o igény leendő védelmével megkapjuk az ILP megfogalmazásban látott T_e halmazt. Amennyiben nincs több l' él, az igény és annak védelmi útjai elvezethetők a hálózatban, azokat lefoglaljuk, és vesszük a következőt ($\rightarrow 1$. lépés).

3. lépés: A T_e halmazban található védelmi utakat töröljük a hálózatból – ezek helyett a következő lépésben újakat keresünk.

4. lépés: Megoldjuk az ILP problémát, egy, az algoritmusra jellemző kiegészítéssel: minthogy útvédelemről beszélünk, garantálni kell, hogy a kialakuló védelmi utak függetlenek legyenek a hozzájuk tartozó teljes üzemi úttól. Ez megtehető, amennyiben az ILP-t kiegészítjük a következő korlátokkal (WP_o jelöli az o igény üzemi útját):

$$x_i^o = 0 \quad \text{bármely } o \in T_e \text{ és } l \in WP_o \text{ esetén}$$

Amennyiben az ILP-nek létezik megoldása, egyidőben elvezethetők a hálózatban a korábbi igények, valamint az új o igény l' -höz tartozó védelmi útjai. Vesszük az üzemi út következő élét ($\rightarrow 2$. lépés). Ha az ILP nem megoldható, az újonnan jött igény számára védelem nem biztosítható, ezért az új igényt blokkoljuk, a korábban törölt védelmi utakat visszaállítjuk. Ugrás a következő igényre ($\rightarrow 1$. lépés).

Az algoritmus adaptívvá tétele lehetőséget ad bizonyos fokú terhelés-kiegyenlítésre, leginkább erősen összekötött hálózatok esetén. A védelmek keresésekor az átkonfigurálás lehetőségének köszönhetően nagyobb mozgástérrel rendelkezik mint a dinamikus verzió, ezért az e fázisban fellépő blokkolások arányának csökkenése várható. Ugyanakkor a nagyobb számításigény miatt megnövekedett futási idővel kell számolnunk, ami végső soron a beérkező igények kiszolgálásának késleltetését növeli.

5.4. Megosztott védelem részben független utakkal, élkettőzéssel (PDSP-LD)

Partially Disjoint Shared Path Protection with Link Duplication (PDSP-LD). Hibafüggő, adaptív szegmensvédelem. Mind dinamikus megfelelője, a PDSP, mind az előzőleg bemutatott SPP-LD továbbfejlesztésének is tekinthető, amint azt az 1. táblázat is mutatja, előbbihez képest az adaptív működés, a védelmek átrendezése, utóbbihoz képest a szegmensvédelem révén.

Működése az előző algoritmus leírása után könnyen érthető, egyetlen változtatásra van szükség: ezúttal az egyes védelmi utaknak nem a hozzájuk tartozó üzemi út egészétől, hanem csak a vizsgált l éltől kell függetlennek lenniük. Így tehát a negyedik lépésben leírt feltétel e módszer esetén helyesen:

$$x_i^o = 0 \quad \text{bármely } o \in T_e \text{ esetén}$$

Ettől eltekintve a két algoritmus működése azonos.

1. táblázat Az algoritmusok csoportosítása

	Útvédelem	Szegmensvédelem
Dinamikus	Hibafüggő megosztott útvédelem (SPP)	Megosztott védelem részben független utakkal (PDSP)
Adaptív	Hibafüggő megosztott útvédelem élkettőzéssel (SPP-LD)	Megosztott védelem részben független utakkal, élkettőzéssel (PDSP-LD)

A fent említett mindkét módszernél nagyobb mozgástérrel rendelkezik, emiatt azt várhatjuk, hogy hatékonyságban mindkettőt felülmúlja. A dinamikus PDSP változattal összehasonlítva az adaptív működésnek köszönhetően kiegyenlítettebb terhelést és az ezzel járó előnyöket várhatjuk, az SPP-LD-hez képest pedig a védelmi utakra megfogalmazott enyhébb feltételeknek köszönhetően nagyobb hatékonyságot a védelmi utak kiépítésénél.

A legbonyolultabb, legösszetettebb működésű módszer a bemutatott algoritmusok közül, melyhez a kiindulásként alkalmazott hibafüggetlen, dinamikus útvédelemről három lépésben jutottunk el: először áttértünk a hibafüggő működésre, ezt követően lecseréltük az útvédelmet szegmensvédelemre, majd adaptívvá tettük a korábban már lefoglalt védelmek átrendezési képességével.

5.5. Részben adaptív megosztott útvédelem

Az adaptív módszerek alkalmazása során újabb problémákba ütközünk. Az egészértékű lineáris programozási feladat (ILP) számításgénye, komplexitása meglehetősen magas. Egyes esetekben ez azt eredményezheti, hogy az egy igényre eső számítási idő megengedhetetlenül nagyra nő (a hálózat méretétől, összekötöttségétől, egyéb tulajdonságaitól függően pár másodperctől akár a több perces tartományig). A nyilvánvaló előnyei mellett így e módszerek csak korlátozottan alkalmazhatóak.

Érdemes tehát elgondolkodni a gyors és egyszerű dinamikus, valamint a komplex, de jobb teljesítményű adaptív módszerek ötvözésén. Ez természetesen kompromisszumos megoldást jelent, hiszen így ugyan alacsonyabb futási időt nyerünk, viszont veszítünk az adaptív megoldások jelentette előnyökből.

Ennek megvalósítására több lehetőségünk is van, talán a legkézenfekvőbb a következő: a folyamatosan érkező igények kiszolgálásakor elsőként alkalmazzuk a választott módszer (SPP vagy PDSP) dinamikus változatának útvonalválasztó rutinját. Amennyiben ez sikerrel járt, és mind az üzemi út, mind az egyes hibákhoz rendelt védelmi utak lefoglalásra kerültek, akkor folytatjuk a következő igényvel.

A védelmi utak keresésekor fellépő blokkolás során azonban van még egy további lehetőségünk: a hálózatban már lefoglalt védelmi utak átrendezése érdekében a módszer adaptív változatához továbbíthatjuk az igényt. Így tehát csak abban az esetben indítjuk el a jóval bonyolultabb és nagyobb számításgényű újrarendező mechanizmust, amikor arra ténylegesen szükség van.

A hálózatban egyidejűleg mozgatott védelmi utakra való tekintettel adminisztratív problémákat vetne fel egy hálózaton belül az út- illetve szegmens-védelem kevert alkalmazása. Ennek megfelelően a részben adaptív megosztott útvédelem az útvédelmet megvalósító dinamikus és adaptív algoritmusok kombinációját jelenti, melyre – rövidítésük alapján – SPP+SPP-LD-ként fogok hivatkozni.

5.6. Részben adaptív megosztott védelem, részben független utakkal

Az előző pontban leírt gondolat alapján a szegmensvédelmet megvalósító dinamikus és adaptív algoritmusok kombinációja, rövidítésük alapján PDSP+PDSP-LD-ként fogok rá hivatkozni.

6. Szimulációk

6.1. A szimulátor bemenete

6.1.1. Paraméterek

A szimulátor paramétereként értelemszerűen meg kell adnunk a használni kívánt hálózatot és az előre generált forgalmat (amely a szimuláció szempontjából nem lesz előzetesen ismert).

Céljaink között szerepelt, hogy különböző terhelések mellett is vizsgálni tudjuk az egyes módszereket – ehhez kézenfekvő megoldásnak tűnik az egyre erőteljesebb forgalmak alkalmazása, az igények nagyságának növelése. Az egyszerűség és a megegyező forgalomminták lehetőségének megőrzése érdekében azonban egy ezzel egyenértékű, más megoldást választottunk: a hálózat áteresztőképességét változtatjuk. Így paraméterként megadható az egyes élek kapacitása is.

6.1.2. Hálózatok és forgalmak

A szimulációk során összesen hat különböző méretű és összekötöttségű hálózatot alkalmaztunk. A cél ismert topológiák választása volt, ezek egyszerű gráfként kerültek alkalmazásra, egyenrangú (költség és sávszélességű) élekkel, a hullámhossz-csatornák és egyéb, technológiára jellemző paraméterek elhagyásával. Így a bevezetőben leírtak szellemében egy igen általános modellhez juthatunk, lehetővé téve az algoritmusok teljesítményének technológia-független vizsgálatát, ugyanakkor nem elveszítve a konkrét megvalósításokhoz való illeszthetőség lehetőségét, tekintettel arra, hogy a legtöbb összetett hálózati modell gráfként leírható.

A felhasznált hálózatok csomópontszáma 13 és 28 között, élszáma 19 és 61 között változik. Különösen érdekes lehet az egyazon 28 csomóponton alapuló topológia különböző összekötöttségű 35, 41 és 61 élet tartalmazó változata (COST266 referencia-hálózatok). Ezek vizsgálata tanulságokkal szolgálhat a hálózat sűrűségének és az egyes algoritmusok teljesítményének összefüggéseire.

2. táblázat Adaptív módszerek számítási ideje

Hálózat	Csomópontok száma	Élek száma	Átlagos foksám	PDSP-LD futási idő
NSFNET	13	19	2,92	0,74
COST266_CT	16	23	2,88	2,68
o22	22	45	4,09	2,92
COST266_RT	28	35	2,50	6,68
COST266_BT	28	41	2,93	6,96
COST266_TT	28	61	4,36	7,73

Az egyes hálózatokhoz használt forgalmak paramétereit az adott hálózat megfelelő jellemzői határozzák meg. Ez lehetővé teszi a hálózati jellemzők hatásának vizsgálatát. Azonos valószínűséggel keletkeztek igények bármely csomópont-pár között, a szimuláció teljes időtartama alatt a csomópont-párok számával arányos számban. A hálózatban egyidejűleg aktív igények száma átlagosan a csomópont-párok számának felével egyezett meg, az egyes igények nagysága pedig 1 és 20 egység között egyenletes eloszlású volt. Ennek eredményeként a forgalom intenzitása (az azonos átlagos sávszélességnek és az egyidejűleg aktív igények számának köszönhetően) szintén a csomópont-párok számával, tehát a csomópontok számának négyzetével arányos. A forgalmak és hálózatok jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza.

7. Numerikus eredmények

Bemutatásra került hét algoritmus, az egyes fejlődési lépések bemutatása és hatásuk vizsgálata céljából. Érdemes tehát összehasonlítani a hibafüggetlen és a hibafüggő megosztott útvédelmet, az útvédelmet és szakaszvédelmet (SPP vs. PDSP, SPP-LD vs. PDSP-LD), valamint egyazon módszerek dinamikus és adaptív változatait (SPP vs. SPP-LD, PDSP vs. PDSP-LD).

Minden hálózat esetén 10 különböző szimulációra támaszkodunk, elég hosszú forgalmi mintákkal ahhoz, hogy a kezdeti tranziens hatása elhanyagolható legyen. A korábban leírtaknak megfelelően a hálózathoz képest változó mértékű terhelést a hálózat éleihez tartozó kapacitás-értékek biztosítják, 10 lépésben egy olyan tartományt felölve mely a meglehetősen magas blokkolási arányoktól eljut a 0% közeli arányokhoz. Az eredmények bemutatásánál egyes esetekben mind a 10 értékhez tartozó adatokat láthatjuk, ahol pedig teljes szimuláció-sorozatára átlagolt eredmények kerültek bemutatásra, ott a 10 érték átlagát találjuk.

Természetesen minden útvonalválasztó algoritmus fontos jellemzője a hatékonysága, az elérhető átbocsátóképesség. Ennek mérése, megfigyelése során azonban szembe kell néznünk a lineáris programozási feladat bonyolultságából eredő nehézségekkel: az ILP-feladat megoldása sok esetben egyszerűen, viszonylag gyorsan meghatározható.

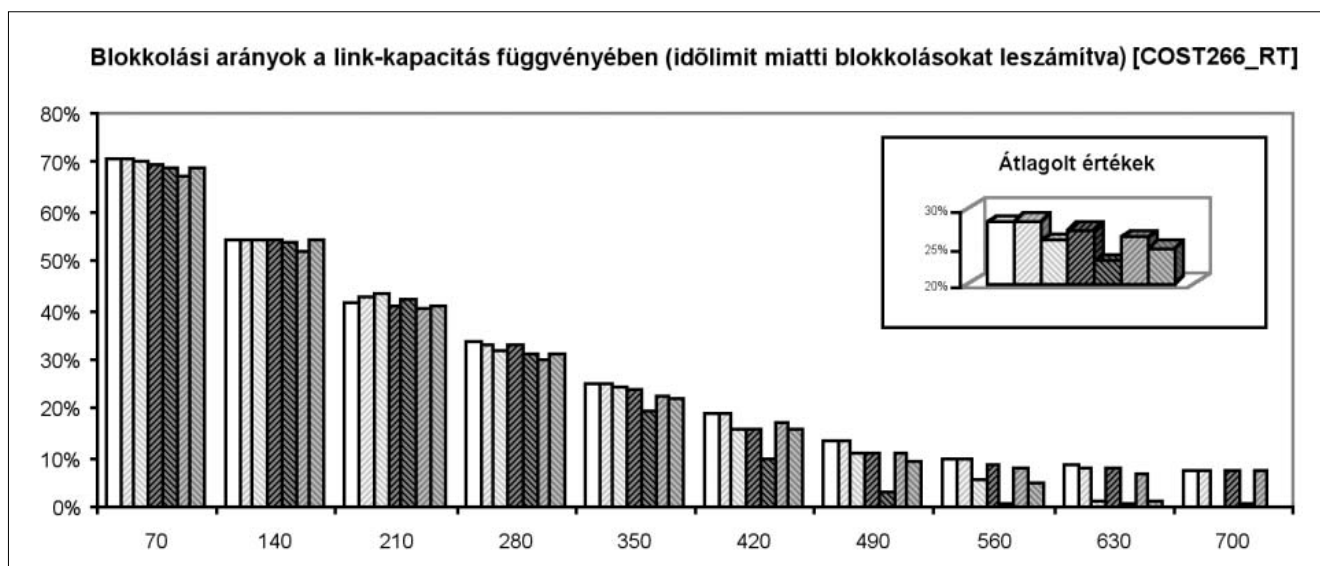
Néhány eset azonban, a hálózat speciális állapotának köszönhetően kiugróan hosszú számítási időt igényel. Annak érdekében, hogy ilyen esetben a folytonosan érkező igények kiszolgálása ne akadhatson el egy-egy igény miatt, a lineáris programozási feladat megoldásának kereséséhez szükséges egy időkorlátot rögzíteni.

Így persze egyes igények valójában azért kerülnek blokkolásra, mert nem lesz idő az érkezésük után megváltozó védelmi út rendszer kiszámítására, noha az ILP-feladat megoldható volna, tehát az igény számára elegendő szabad kapacitás rendelkezésre áll a hálózatban. Emiatt egyaránt hamis képet kapunk az algoritmus képességeiről, amennyiben ezen igényeket akár a blokkolt, akár a kielégített igények közé soroljuk, ezért a blokkolási arányok vizsgálatakor az adaptív algoritmusok esetében ezen forgalmi igényeket egyszerűen kihagytuk az eredmények összesítésekor – így nyílik leginkább lehetőségünk ezen módszerek elvi képességeinek vizsgálatára.

Valódi alkalmazások esetén természetesen a számítási idő korlát nem megkerülhető. A részben adaptív módszerek kifejlesztését éppen ez motiválta: amennyiben nincs lehetőség a védelem-átrendező rutin rendszeres futtatására, akkor az útválasztás gyorsítható a dinamikus és adaptív változatok kevert alkalmazásával, így az egy igényre eső számítási idő csökkenthető.

Az egyes módszerek teljesítménye közötti eltéréseket nagyobb hálózatok esetében szembetűnőbbek. Ha az egyik legnagyobb felhasznált hálózaton (COST266_BT) futtatott szimuláció eredményeit (4. ábra) vizsgáljuk, láthatóvá válnak a következők:

4. ábra Blokkolási arányok



- A hibafüggő útvédelem valóban alacsonyabb blokkolási szintet eredményez a hibafüggetlen változatnál.
(Hibafüggetlen SPP vs. Hibafüggő SPP)
- Az útvédelem helyett a szegmens-védelem alkalmazása valóban észrevehetően nagyobb mozgásteret adott az algoritmusnak, és ennek hatása a blokkolási arányokban is megjelent.
(SPP vs. PDSP, SPP-LD vs. PDSP-LD)
- Az adaptív módszerek egyértelműen felülmúlják a dinamikus változatokat.
(SPP vs. SLL-LD, PDSP vs. PDSP-LD)
- Amint várható volt, az adaptív védelmi út-kereső rutin részleges alkalmazása a dinamikus változatoknál jobb, az adaptív verzióknál rosszabb eredményt hozott (a blokkolási arányt és a későbbiekben bemutatott egyéb jellemzőket tekintve), rövidebb futási idővel.
(SPP+SPP-LD illetve PDSP+PDSP-LD)

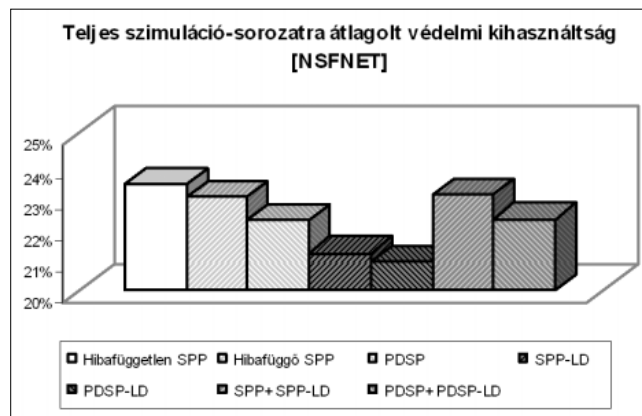
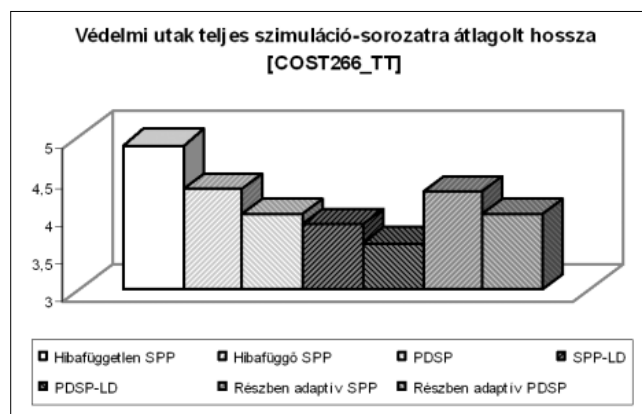
A COST266_RT hálózat felépítése (sok csúcs, kevés él) miatt kiválóan alkalmas egyben az útvédelem gyengeségeinek szemléltetésére. Ha ugyanis megnézzük, hogy a 4. ábra alsó diagramján az alacsonyabb blokkolást eredményező kapacitás-tartományokban melyik algoritmus hogyan teljesít, látni fogjuk, hogy a különböző adaptív és dinamikus SPP-verziók lényegesen gyengébben teljesítenek a leginkább szegmens-védelemként aposztrofálható PDSP változatoknál. Ennek oka a hálózat viszonylag alacsony fokú összekötöttsége – bizonyos esetekben gondot okozhat két pont között az üzemi és védelmi út számára két, egymástól elfüggetlen út kiépítése.

Ugyanakkor kiválóan megfigyelhető a dinamikus és adaptív módszerek kevert alkalmazásakor kötött kompromisszum eredménye: a részben adaptív változatok teljesítménye láthatóan felülmúlja a dinamikus változatokét, de alulmarad az adaptív módszerekkel szemben.

Az adaptív algoritmusok használatának valódi előnyei azonban nem is igazán a blokkolási arányokat nézve válnak nyilvánvalóvá. Érdekes megvizsgálni a hálózat állapotát leíró más jellemzőket is.

Vizsgáljuk meg az előálló üzemi és védelmi utak hosszát. Amint az algoritmusok leírásánál láttuk, az üzemi utak keresésekor használt eljárás megegyezik az összes módszernél. Így tehát e téren nem is kell szignifikáns különbségekkel számolnunk. Ugyanakkor a védelmi utak hosszának tekintetében már észrevehető eltérésekkel találkozunk. Az 5. ábrán, amely a COST266_TT hálózatban mért értékeket jeleníti meg, ez jól látszik: a védelmi utak hosszának vonatkozásában jelentős különbségek tapasztalhatóak az adaptív módszerek javára. A tendencia ismételtén igazolja a fejlesztési lépéseket, mind a hibafüggő működés, mind a szegmens-védelem, mind az adaptív megközelítés előrelépést hozott.

A rövidebb védelmi utak kialakulásának magyarázata a védelem átrendezésének lehetőségében keresendő: egyidejűleg több védelmi út számára optimális konfigurációt építünk ki. Ezzel elkerülhetők azok az ese-



5. és 6. ábra
Védelmi utak hossza és védelmi kihasználtság

tek, amikor egy-egy korábbi védelmi út által foglalt erőforrások miatt az újabb igények hosszú kerültre kényszerülnek. Emellett az adaptív módszerek védelmi célokra alacsonyabb erőforrás-igénnyel lépnek fel a hálózattal szemben, mint a 6. ábrán megfigyelhető (NSFNet hálózat, védelmi célra foglalt / összes erőforrás aránya). Így tehát elmondható, hogy ez esetben a rövidebb védelmi utak nem a kisebb mértékű tartalék-megosztás, hanem az optimálishoz közelítő konfiguráció következményei.

Természetesen a több szempontból is jobb teljesítmény árát meg kell fizetni – ez esetben elsősorban a számítási idő területén. Ez korlátozhatja az adaptív algoritmusok használhatóságát és ez adja a részben adaptív algoritmusok létjogosultságát is. A bevezetőben leírtaknak megfelelően e módszerek jelenleg központosított működésűek, és ez jelentős mértékben befolyásolhatja skálázhatóságukat.

Választ kell tehát találnunk arra a kérdésre, mekkora hálózatok, milyen topológia mellett, milyen korlátozásokkal használhatóak az itt bemutatott algoritmusok. A szimulációk során csupán a hálózatok topológiai jellemzőit hasznosítottuk, és nem támasztottunk egyes hálózat-típusokra jellemző elvárásokat. Nagy, akár európai méretű hullámhossz-kapcsolt optikai gerinchálózatok esetén nem feltétlenül követelmény a másodperces, vagy annak csak törtrészét kitevő számítási idő, ami viszont kisebb méretű, más felhasználású hálózatok esetén elvárás lehet.

Kiseb hálózatok esetén még elfogadhatóan rövid számítási időket kapunk (2. táblázat), a nagyobb (28 csomópont/35-41-61 él) hálózatok esetén mért értékek bizonyos alkalmazások esetén már erősen korlátozzák a tisztán adaptív módszerek használhatóságát. Megfigyelhető, hogy döntően a hálózat csomópontjainak száma befolyásolja a számításigényt: a 13 csomópontból álló NSFNet hálózat esetén mért érték tízszeresével találkozunk az alig több, mint kétszer annyi pontból álló, hasonló sűrűségű COST266_BT hálózattal. Ugyanakkor a három egyforma csomópontszámú, jelentősen különböző élszámú hálózathoz tartozó eredmények közötti eltérés lényegesen csekélyebb.

Nem kell azonban végleg lemondani az adaptív működés nyújtotta előnyökről nagyobb hálózatok vagy sebesség-kritikus alkalmazások esetén sem: ez a részben adaptív megoldások területe lehet. Ezek egy igényre eső számítási ideje még a legnagyobb hálózatok esetén sem lépi túl a 0,1 másodperces határt (8. ábra), kisebb gráfok esetén pedig 0,01 másodperc nagyságrendű (7. ábra). Emellett, mint korábban láttuk, bizonyos mértékig képesek ötvözni a bonyolultabb működés előnyeit, teljesítményét a dinamikus módszerekre jellemző alacsony számításigénnyel.

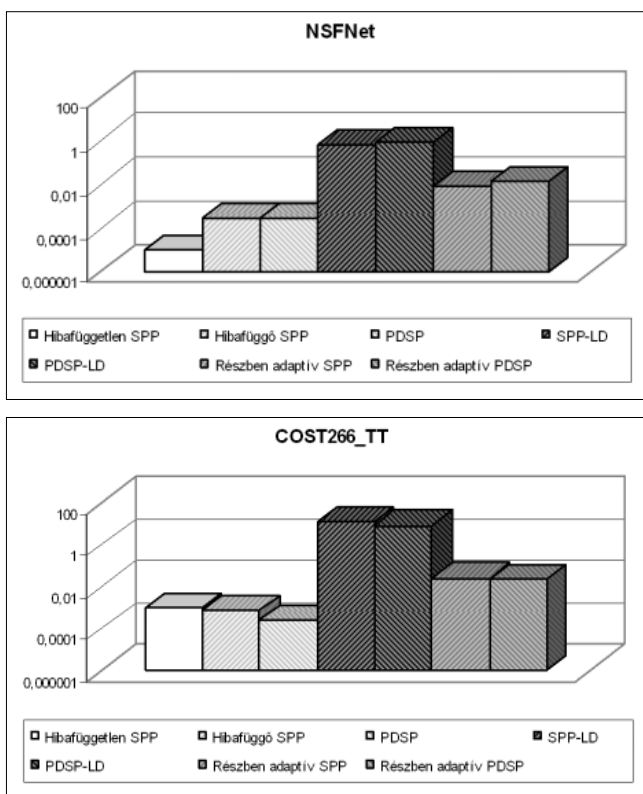
8. Összegzés

8.1. Következtetések

Bemutatásra került hét különböző, megosztott védelmet megvalósító algoritmus. Ezek egy hosszabb fej-

7. és 8. ábra

Egy igényre eső számítási idő a legkisebb (NSFNet) és a legnagyobb hálózatban (COST266_TT)



lesztési út egyes állomásai, illetőleg az egyszerűbb és bonyolultabb módszerek kevert használatán alapuló átmeneti megoldások voltak.

Elsőként a dinamikus módszerek talaján maradván láthattunk hibafüggetlen és hibafüggő, valamint út illetve szegmens-védelmet megvalósító módszereket. A szimulációk eredményeit vizsgálva igazolást nyert mindkét változtatás pozitív hatása: kisebb számításigény mellett alacsonyabb blokkolási szintet eredményeztek és a kiépített védelmi utak hosszát, valamint a védelmi célú erőforrás-használatot illetően is jobban teljesítettek.

Igazán nagy változást pedig az adaptív módszerek jelentenek. Teljesítményüket elemezve megállapítható, hogy némiképp alacsonyabb blokkolási arányok mellett jelentős előrelépést hoztak több fontos területen. Megfigyelhettük, hogy a kiépített védelmi utak hossza, és ezzel párhuzamosan a védelem céljára foglalt erőforrások aránya tekintetében is sikerült előrelépni a dinamikus módszerekhez képest. Az adaptív algoritmusok igazi előnye pedig azok rugalmasságában rejtezik: a nagymértékű átalakítási, átrendezési képesség következtében akár hibák, akár szűk keresztmetszetek megjelenése esetén megvan a lehetőségünk a terhelés ezt elkerülő elosztására, ezáltal csökkentve a kritikus terhelésű élek számát.

Emellett szembe kell néznünk a jelentős többletszámításokat igénylő adaptív működés negatív következményével, a megnövekedett futási idővel is. Láttuk, hogy a hálózat mérete erősen befolyásolja az egy igényre eső számítási időt, ezért nagyobb hálózatok vagy sebesség-kritikus alkalmazások esetén csak korlátozottan alkalmazhatóak ezek a módszerek. E problémára jelenthet megoldást a dinamikus és adaptív algoritmusok kevert használata, a kettő előnyeinek, az adaptív módszerek jobb teljesítményének és a dinamikus változatok rövidebb futási idejének ötvöztetésére. A megkövetelt kompromisszumot az előálló összetett algoritmusmal szembeni igényeink kell, hogy meghatározzák, a gyorsaság érdekében kevesebb, vagy a jobb teljesítmény érdekében több újraprendezési lépést engedélyezve.

8.2. Kitekintés

A bemutatott módszerek számtalan továbblépési lehetőségét rejtenek magukban.

Az egyik legizgalmasabb kérdés az adaptív módszerek átrendezési lépésének időzítése és az ebbe bevont védelmek csoportjának kiválasztása. Jelenleg minden igény üzemi és védelmi útjának elvezetése között, utóbbival egyidejűleg az egy adott élet használó védelmeket rendezzük át. Megtehetjük azonban, hogy már az üzemi út elvezetése előtt, vagy azzal párhuzamosan teszünk így – ily módon feltehetőleg tovább csökkenthető az üzemi blokkolások száma.

Megpróbálkozhatunk valamilyen küszöbérték átlépése által kiváltott újraprendezési, terhelés-kiegyenlítési rutinnal is, például: szűk keresztmetszetek kialakulása, egymást követő többszörös blokkolások stb. Ekkor nem kell minden igényt követően lefuttatni az időigényes

adaptációs lépést, így csökkenthető a futási idő. Különösen az utóbbi esetben igényel alapos átgondolást az átrendezni kívánt védelmek csoportjának kiválasztása. Csábító lehetőség például a szűk keresztmetszetté vált éleket használó útvonalak felszabadítása, áthelyezése.

A mind alaposabb terhelés-kiegyenlítés további eszköze lehet aprólékosan kidolgozott (de az ILP kötöttsége miatt lineáris) költségfüggvények alkalmazása, például a szabadabb élek használatának elősegítése a terheltebbek helyett.

Köszönetnyilvánítás

Ez a munka az Európai 6. Kutatási Keretprogram IST IP NOBEL projektjének keretében készült.

Irodalom

- [1] Andrew S. Tanenbaum:
Számítógép-hálózatok, Panem, 2004.
- [2] T. Cinkler:
On Multi-Layer Multi-Domain Networks,
Winterschool Tutorial at NoE e-Pohoton/ONE
Winter School, Aveiro, Portugal, 2005.
- [3] Wayne D. Grover:
Mesh-Based Survivable Networks,
Prentice Hall, 2004.
pp.149–172, 173–268, 377–467.
- [4] Internet Software Consortium (ISC),
<http://www.isc.org>
- [5] London Internet Exchange (LINX),
<http://www.linx.net>
- [6] J.-P. Vasseur, M. Pickavet, Piet Demeester:
Network Recovery, Elsevier, 2004.
pp.39–131, 203–297, 297–423.
- [7] Harry G. Perros:
Connection-Oriented Networks,
John Wiley and Sons, 2005.
pp.19–46, 47–130, 131–180, 220–229.
- [8] Zs. Pándi, M. Tacca, A. Fumagalli:
A Threshold Based On-line RWA Algorithm with
Reliability Guarantees ONDM 2005 Conference,
February 2005, Milan, Italy
- [9] Ramesh Bhandari:
Survivable Networks – Algorithms for diverse Routing,
Kluwer, 1999.
- [10] Szigeti J., Ballók I., Cinkler T.:
Hatékony információfrissítési stratégiák
automatikusan kapcsolt optikai hálózatokban,
Híradástechnika, 2005/2; pp.45–50.
- [11] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti,
James B. Orlin:
Network Flows, Prentice Hall, 1993.
pp.108–113, 649–695.
- [12] Mokhtar S. Bazaraa, John J. Jarvis, Hanif D. Sherali:
Linear Programming and Network Flows,
John Wiley and Sons, 1977. pp.587–601.
- [13] Schrijver:
Theory of Linear and Integer Programming,
Wiley, 1998.
- [14] M. Pióro, D. Medhi:
Routing, Flow and Capacity Design in
Communication and Computer Networks,
Elsevier, 2004.
pp.105–148, 151–169, 353–400.
- [15] G. Ausiello, P. Crescenzi, G. Gambosi, V. Kann,
A. Marchetti-Spaccamela, M. Protasi:
Complexity and Approximation,
Springer-Verlag, 1999. pp.65–69.
- [16] B. M. E. Moret, H. D. Shapiro:
Algorithms from P to NP, Volume I,
Design and Efficiency,
The Benjamin/Cummings, 1991.
- [17] G. Nemhauser, L. Wolsey:
Integer and Combinatorial Optimization,
Wiley, 1988.
- [18] Felhasznált hálózatok rajza:
<http://opt.tmit.bme.hu/~mitcsenkov/networks>
- [19] T. Cinkler, D. Meskó, A. Mitcsenkov, G. Viola:
Adaptive Shared Protection Rearrangement,
Design of Reliable Communication Networks,
(DRCN) 2005.

Optikai alapú transzport architektúrák összehasonlító költségelemzése

SZEGEDI PÉTER

Magyar Telekom, PKI Távközlésfejlesztési Intézet
szegedi.peter3@t-com.hu

Lektorált

Kulcsszavak: dinamikus optikai hálózatok, ASON/GMPLS, CAPEX modell

A domináns IP kliens kiszolgálására tervezett hálózati architektúrák költség-hatékony kialakítása a távközlési szolgáltatók számára létkérdés. Annak eldöntése, hogy a jellemzően tisztán IP alapú architektúráról mikor és milyen feltételek mellett érdemes átmozogni az optikai alapú architektúrák irányába kritikus. A következőkben egyszerű forgalmi elemzések során meghatározható paramétereken alapuló költségmodelleket ismertetünk, amelyek alkalmazása segítheti a beruházási döntések meghozatalát. A különböző optikai alapú hálózati architektúrák analitikus költségmodelljeinek összehasonlítás után szimulációs mintapéldákkal támasztjuk alá a modellek jóságát.

1. Bevezetés

Napjainkban a transzportálózatok fényvezető kábeleinek szálpárjain hullámhosszosztásos multiplex (WDM – Wavelength Division Multiplex) rendszerek növelik a kihasználtságot. A WDM berendezések optikai multiplexerei leggyakrabban transzponder kártyákon keresztül fogadják a kliens oldali jeleket, amelyek többnyire SDH (Synchronous Digital Hierarchy) és Ethernet keretizésekkel rendelkeznek. Egyre elterjedtebb megoldás a kliens réteg eszközeiben (kapcsolók, útvonalválasztók) az ITU-T grid [1] alapján színezett interfész kártyák használata. Ebben az esetben a WDM berendezések transzponder kártyák nélkül, közvetlenül multiplexálhatják össze a hullámhosszakokat egy szálpáron.

Ennek megfelelően egy „tisztán IP” (Internet Protocol) alapú architektúrában az útvonalválasztók (routerek) között pont-pont jellegű optikai összeköttetések találhatók. A „tisztán IP” alapú hálózati architektúra koncepciója szerint, amennyiben az útvonalválasztó berendezések elegendően nagy kapacitásúak (szokás őket terra router-nek vagy big-fat router-nek nevezni), és a pont-pont WDM összeköttetések kellően túlméretezettek (például 10 Gigabit Ethernet) az architektúra költség-hatékony módon képes kiszolgálni a jellemző IP igényeket a megfelelő minőségi (QoS) követelmények garantálása mellett.

Amennyiben viszont a forgalmi igények szerkezete – úgy forgalmi volumen és logikai topológia, mint megbízhatósági követelmény szempontjából – kritikusan változik, elengedhetetlen bizonyos hálózati funkciók (például védelmi átkapcsolás) optikai rétegbe történő átmozgatása. Ennek kulcseleme a WDM multiplexerekkel együttműködő optikai kapcsolók (OXC – Optical Cross-Connect) alkalmazása.

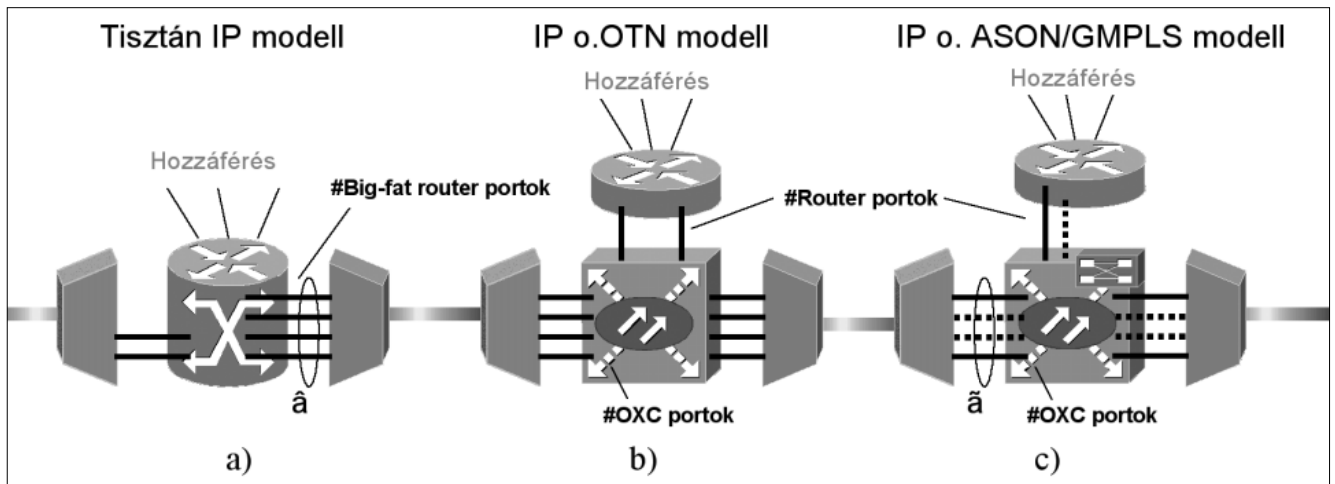
Az optikai kapcsolók lehetnek tisztán optikai eszközök, de manapság jellemzően elektronikus kapcsoló funkcióval integrált, úgynevezett Multi-Service Switch-ek látják el ezt a szerepet. A hálózati funkciókkal felvér-

tezett optikai réteget nevezik OTN-nek (Optical Transport Network). Az „IP over OTN” hálózati architektúrában a pont-pont WDM linkek felett fizikai hullámhossz utak megvalósítására nyílik lehetőség az OXC-k segítségével. A logikai IP linkek ezeket a transzparens hullámhossz utakat egyetlen összeköttetesként látják. Az „IP over OTN” architektúra jelentős tranzit forgalmak esetén – különösen védelmi irányokban – költségelőnyvel bírhat a drágább, színezett IP interfészeket alkalmazó „tisztán IP” architektúrával szemben.

A menedzselő rendszerből konfigurálható hullámhossz utak alkalmazásának hátránya, hogy a manuális beavatkozások miatt dinamikája lényegesen kisebb, mint egy tisztán IP hálózaté. Amennyiben a nagyfokú dinamizmust vagy a dedikált 1+1 védelemnél kifinomultabb helyreállítási megoldások meglétét követelő forgalmi igények dominálnak, az „IP over OTN” architektúra hatékonysága csökken. Ha a jellemző dinamikus forgalmak volumene is meghatározó a „tisztán IP” alapú architektúra is kompromisszumokkal alkalmazható.

A fenti problémára az ITU-T G.8080 (ASON – Automatically Switched Optical Network) [2] architektúrája kínál megoldást. A koncepció lényege, hogy az OXC berendezésekben külön vezérlő síkot implementálnak, amelyben útvonalválasztó, erőforrás lefoglaló és menedzselő protokollok (GMPLS – Generalized Multi-Protocol Label Switching protokollok) [3] látják el az elosztott, dinamikus vezérlési funkciókat.

Az „IP over ASON/GMPLS” hálózati architektúrában az IP kliens igényeinek megfelelően dinamikusan létesíthetők és bonthatók le az optikai hullámhossz utak, valamint különböző védelmi/helyreállítási megoldások implementálhatók az optikai rétegben. Az „IP over ASON/GMPLS” architektúra költség-hatékonyságának fő eleme az időbeli statisztikus multiplexálási képesség, amely lehetővé teszi, hogy a permanens optikai összeköttetésekkel szemben a kapcsolt összeköttetések statisztikusan kevesebb erőforrást igényeljenek a hálózattól.



1. ábra

a) „tisztán IP” csomóponti modell, b) „IP over OTN” csomóponti modell, c) „IP over ASON/GMPLS” csomóponti modell

A továbbiakban azt tűztük ki célul, hogy egyszerű költségmodelleket alkotva elemezzük a fent ismertetett három hálózati architektúra beruházási igényeit különböző forgalmi szcenáriók mellett. A második fejezetben bemutatjuk az egyszerűsített költségmodelleket, a harmadik fejezetben analitikus módszerek segítségével összehasonlítjuk az architektúrákat, majd a negyedik fejezetben szimulációkkal bizonyítjuk az analitikus költségmodellek helyességét, és CAPEX (CAPital EXpenditures – teljes beruházási költség) szempontjából értékeljük az egyes architektúrákat.

2. Modellalkotás

A bevezetőben ismertetett három hálózati architektúra egyszerűsített CAPEX modelljét tárgyaljuk ebben a fejezetben. A teljes hálózat kiépítéséhez szükséges költségek elemzéséhez egy összehasonlító modellt választottunk, amelyet elsőként a Telcordia mérnökei publikáltak [4]. A modellben csak az IP és OXC port szükségletek, valamint ezek költsége szerepel, így az összes többi költségösszetevőt arányosan kell figyelembe venni. A Telcordia alapmodellje a „tisztán IP” és az „IP over OTN” architektúrák összehasonlító elemzésére alkalmas, mi a modellt kiterjesztettük az „IP over ASON/GMPLS” architektúra elemzésére is. A három modell az 1. ábrán látható.

A „tisztán IP” csomóponti architektúra egy big-fat router-t tartalmaz (1/a. ábra). Az útvonalválasztó portjai a WDM multiplexerek transzpondereihez csatlakoznak. Mivel feltételezésünk szerint a WDM berendezések mindhárom modellnél jelen vannak, ezek költségét az összehasonlítás során elhanyagoljuk. Az útvonalválasztó közös hardver és szoftver komponenseinek költségét a teljes kiépítésű berendezés portjaira arányosan levetítjük. Azt feltételezzük, hogy egy interfész kártya (Line Card) több ilyen portot tartalmaz. Ezek után a csomóponti architektúra költsége az alábbi módon számítható:

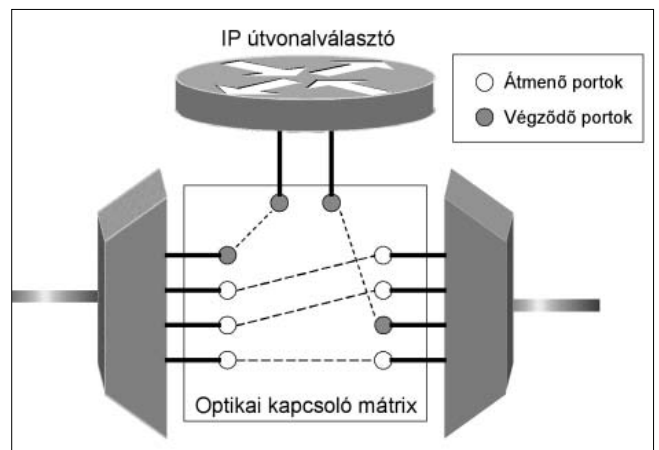
ahol:

C_{HW}	közös hardver komponens költsége
C_{SW}	közös szoftver komponens költsége
C_{LC}	interfész kártya költsége
K	interfész kártya típusa
$N^{(K)}$	K típusú interfész kártyák darabszáma
$N_{teljes_kiépítés}$	teljes kiépítésű berendezés kártyáinak száma
C_{IP}^{port}	IP port költsége (beleértve a közös komponenseket)
P_{IP}	összes IP portok száma (minden interfész kártyán)

A portok szempontjából megkülönböztetünk az adott csomópontban végződő forgalmakat és átmenő forgalmakat szállító portokat (2. ábra).

A „tisztán IP” architektúrában a forgalmak minden csomóponti útvonalválasztó berendezésben elektronikus tartományban is hozzáférhetők, így az átmenő forgalmak oszthatóknak közös porton a végződő forgalmakkal.

2. ábra Átmenő és végződő OXC portok



$$C_{tisztan_IP} = C_{IP_router} = C_{HW} + C_{SW} + \sum_K C_{LC}^{(K)} \cdot N^{(K)} = \sum_K \left(\frac{C_{HW} + C_{SW}}{N_{teljes_kiépítés}} + C_{LC}^{(K)} \right) \cdot N^{(K)} = C_{IP}^{port} \cdot P_{IP} \quad (1)$$

Ezt a képességet egy statisztikus multiplexálási faktor (β) bevezetésével vesszük figyelembe a modellben:

$$C_{\text{tisztán_IP}} = C_{\text{IP_router}} = C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{át}} \cdot \beta \quad (2)$$

Az „IP over OTN” csomóponti architektúrában az útvonalválasztó mellett egy optikai kapcsoló is helyet kapott. Az optikai kapcsolók képesek tranzitálni az átmenő forgalmakat anélkül, hogy azok az IP rétegben végződnenek. Azáltal, hogy nem minden forgalom férhető hozzá elektronikusan, kevesebb IP port szükséges, de egyben elveszítjük a statisztikus multiplexálási képességet is. Az optikai kapcsolók és az útvonalválasztók közös hardver és szoftver komponenseinek költségét az előző modellnél ismertetett módon, arányosan vesszük figyelembe. Az „IP over OTN” csomóponti architektúra költsége a következő módon számítható:

$$C_{\text{IP_OTN}} = C_{\text{IP_router}} + C_{\text{OXC}} = \sum_K \left(\frac{C_{\text{HW}}^{\text{IP}} + C_{\text{SW}}^{\text{IP}}}{N_{\text{teljes_kiepítés}}^{\text{IP}}} + C_{\text{LC}}^{(K)} \right) \cdot N^{(K)} + \sum_O \left(\frac{C_{\text{HW}}^{\text{OXC}} + C_{\text{SW}}^{\text{OXC}}}{N_{\text{teljes_kiepítés}}^{\text{OXC}}} + C_{\text{LC}}^{(O)} \right) \cdot N^{(O)} \quad (3)$$

Az útvonalválasztó berendezésnek csak végződő forgalmakat szállító portjai vannak, míg az optikai kapcsolóknak külön portjai viszik a végződő és az átmenő forgalmakat a WDM transzponderek irányába. Ezeknek megfelelően az egyszerűsített költségmodell a következőképpen alakul:

$$C_{\text{IP_OTN}} = C_{\text{IP_router}} + C_{\text{OXC}} = C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} (P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{át}}) \quad (4)$$

Az „IP over ASON/GMPLS” csomóponti modell egyedül az OXC vezérlési funkcióban különbözik az előző architektúrától. Modellünkben a vezérlési funkciók költségét egy egyszerű addicionális komponensként vesszük figyelembe. Ezt megtehetjük, hiszen számos gyártó berendezésében a vezérlőik implementálása pusztán egy szoftverfrissítést igényel, a vezérlési információk pedig a sávon belüli jelzescsatornákon haladhatnak, a fizikai sík módosítása nélkül. Az „IP over ASON/GMPLS” csomóponti architektúra költsége a következő módon számítható:

$$C_{\text{IP_ASON}} = C_{\text{IP_router}} + C_{\text{OXC}} + C_{\text{CP}} \quad (5)$$

Az optikai vezérlőik alkalmazása lehetővé teszi, a hullámhossz utak dinamikus felépítését és lebontását az aktuális forgalmi igényeknek megfelelően. Ennek következtében nem szükséges a permanens összeköttetések fenntartása, hanem időben átlapolható ezek használata. Ezt az időbeli statisztikus multiplexálási képességet a modellben egy külön faktorról (γ) vettük figyelembe.

A költségmodell a következőképpen alakul:

$$C_{\text{IP_ASON}} = C_{\text{IP_router}} + C_{\text{OXC}} + C_{\text{CP}} = C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} (P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{vég}}) + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{OXC}}^{\text{át}} \cdot \gamma \quad (6)$$

A továbbiakban az egyszerűsített költségmodellek analitikus összehasonlító elemzését végezzük el.

3. Költségmodellek analitikus összehasonlítása

Az előző fejezetben ismertetett költségmodellek alkalmasak arra, hogy a forgalmi jellemzők és a különböző kiinduló paraméterek (költségek, portszámok, multiplexálási faktorok) ismeretében meghatározzuk azt az elméleti határt, amelyen túl egyik architektúra kialakítási költsége kisebb a másikénál. Amennyiben a paramétereket és a forgalmi jellemzőket nem ismerjük, függvényként ábrázolhatjuk az azonos költségű architektúrákat, így összehasonlító eredményeket kaphatunk. Mi ez utóbbit megoldást választottuk, ahol az ábrázolt függvény alatt az egyik, felette a másik architektúra költsége az olcsóbb. Elsőként a „tisztán IP” és az „IP over OTN” architektúrát vetettük össze, egyenlővé téve költségmodelleiket (7):

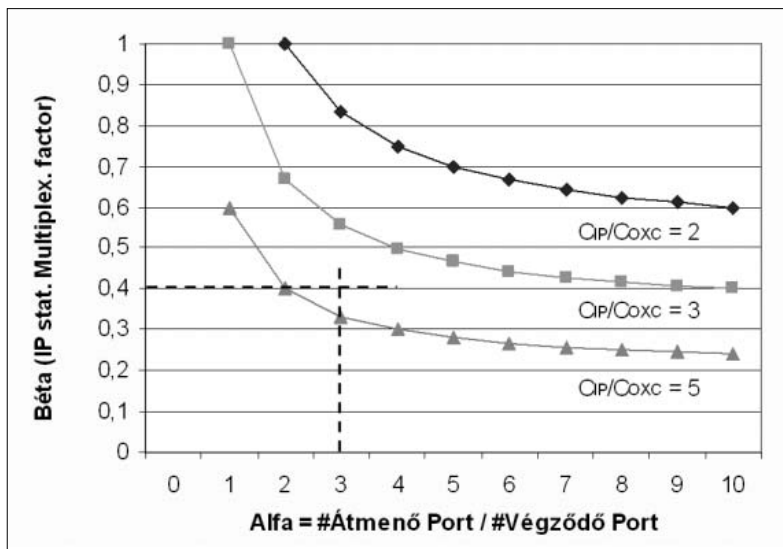
$$\begin{aligned} C_{\text{tisztán_IP}} &= C_{\text{IP_OTN}} \\ C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{át}} \cdot \beta &= C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} (P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{át}}) \\ \frac{C_{\text{IP}}^{\text{port}}}{C_{\text{OXC}}^{\text{port}}} &= \frac{2 + \alpha}{\beta \cdot \alpha} \\ \text{ahol } \alpha &= \frac{P_{\text{át}}}{P_{\text{vég}}} \text{ és } \beta = \text{stat.multip.faktor}_{\text{IP}} \end{aligned}$$

A „tisztán IP” és az „IP over ASON/GMPLS” architektúra összehasonlításakor ugyan így jártunk el (8):

$$\begin{aligned} C_{\text{tisztán_IP}} &= C_{\text{IP_ASON}} \\ C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{át}} \cdot \beta &= C_{\text{IP}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} (P_{\text{IP}}^{\text{vég}} + P_{\text{OXC}}^{\text{vég}}) + C_{\text{OXC}}^{\text{port}} \cdot P_{\text{OXC}}^{\text{át}} \cdot \gamma \\ \frac{C_{\text{IP}}^{\text{port}}}{C_{\text{OXC}}^{\text{port}}} &= \frac{2 + \gamma \cdot \alpha}{\beta \cdot \alpha} \\ \text{ahol } \alpha &= \frac{P_{\text{át}}}{P_{\text{vég}}} \text{ és } \beta = \text{stat.multip.faktor}_{\text{IP}} \\ &\quad \gamma = \text{stat.multip.faktor}_{\text{OXC}} \end{aligned}$$

A „tisztán IP” modellben az útvonalválasztó port költségeit és statisztikus multiplexálási faktorát vettük figyelembe. Az „IP over OTN” modellben az optikai kapcsoló port költségei is szerepeltek, de multiplexálási képesség nélkül. Az „IP over ASON/GMPLS” modellben már az OXC berendezésben is számoltunk időbeli multiplexálási képességgel.

A számítások során 2-szer, 3-szor illetve 5-ször drágább portköltséget feltételeztünk az IP útvonalválasztónál, mint OXC kapcsoló esetén. A 3. ábrán az áthaladó és a végződő forgalmak arányának függvényében (α) az útvonalválasztó statisztikus multiplexálási faktora (β) látható. A függvények különböző portköltség arányok mellett az egyenlő összköltségű architektúrákat ábrázolják. Az aktuális forgalmi viszonyok meghatározzák a vizsgálandó szcenáriók paramétereit.



3. ábra

A „tisztán IP” és az „IP over OTN” architektúra költség-összehasonlítása különböző szkenáriókban

Például ha az átlagos átmenő forgalom 3-szor nagyobb, mint a csomópontokban végződő forgalom ($\alpha=3$), illetve az IP útvonalválasztó 0,4-es multiplexálási faktort ér el az OXC-hez képest (a forgalmak elektronikus feldolgozása következtében $\beta=0,4$), akkor a kirajzolt pont (2. ábra) a 3-szoros portköltség arányhoz tartozó görbe alatt, és az 5-szörös portköltség arányhoz tartozó görbe felett van. Ez azt jelenti, hogy az előbbi költség-arány mellett az „tisztán IP” architektúra az olcsóbb, míg az utóbbi esetén az „IP over OTN” architektúra kialakítása a gazdaságosabb.

Az „IP over ASON/GMPLS” architektúra esetén az alapmodellt a dinamikus optikai hálózatokra jellemző kitöltési tényezővel, mint harmadik paraméterrel egészítettük ki. A kitöltési tényező arányos az optikai rétegben érvényesülő statisztikus multiplexálási faktorttal (γ), fizikailag viszont egyszerűbben értelmezhető, ezért választottuk az ábrázoláshoz. A kitöltési tényező valójában azt adja meg, hogy a kapcsolt optikai csatornák az idő hány százalékában vannak ténylegesen kihasználva. A 4. ábrán a 3-szoros költség-arányhoz tartozó görbét ábrázoltuk a kitöltési tényező függvényében. Látható, hogy a kitöltési tényező csökkenésével a görbe alatti terület, vagyis a „tisztán IP” architektúra költség-előnyének valószínűsége csökken.

A következő fejezetben valós hálózati mintapéldákon végzett szimulációkkal ellenőrizzük az egyszerűsített, analitikus költség-összehasonlító modellek helyességét.

4. ábra
A „tisztán IP” és az „IP over ASON/GMPLS” architektúra költség-összehasonlítása különböző szkenáriókban

4. Szimulációs CAPEX-elemzés

A bevezetőben ismertetett három hálózati architektúra teljes CAPEX költségének kiszámítását tűztük ki célul. A választott mintahálózat az európai GÉANT2 kutatóhálózat [5] topológiája (19 csomóponttal és 28 linkkel), a forgalmat pedig a TERENA Compendium 2005 felmérése [6] alapján számított forgalmi mátrix reprezentálja. A szimulációk során a szükséges útvonalválasztó és optikai kapcsoló portszámok meghatározása volt a cél. A relatív portköltségekre, gyártói adatok figyelembevételével, a következő feltételezésekkel éltünk:

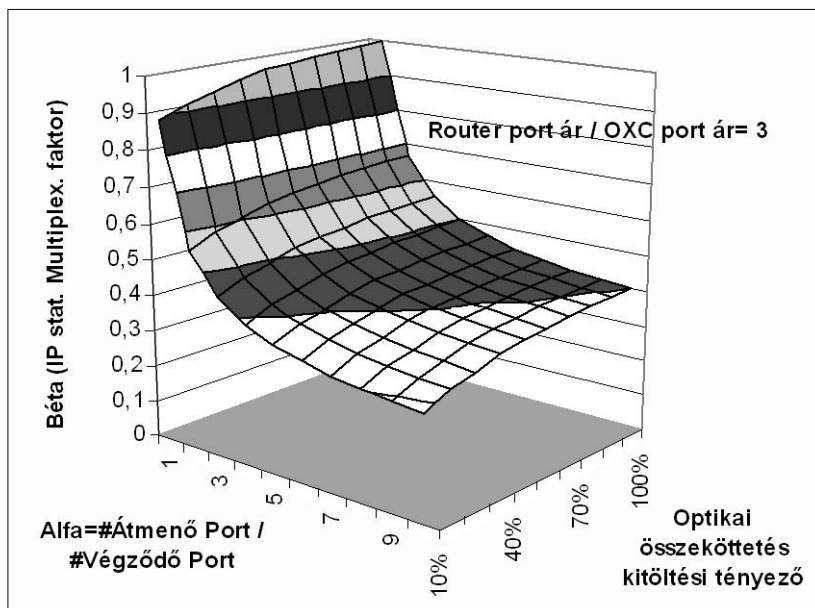
- Egy 10 GbE OXC port költsége (C_{OXC}^{port}) az „IP over OTN” modellben (beleértve a közös komponensek ráeső költségrészt is) 1 Unit.
- Egy 10 GbE OXC port költsége ($C_{OXC_CP}^{port}$) az „IP over ASON/GMPLS” modellben 1,05 Unit, mivel a szoftveres vezérlő sík megvalósítása körülbelül 5%-os plusz költséget jelent.
- Egy 10 GbE IP port költsége (C_{IP}^{port}) 3 Unit (beleértve a közös komponensek ráeső költségrészt is).

A szimulációk során a „tisztán IP” architektúrát tekintettük referenciának. Az útvonalválasztók között pont-pont 10 GbE linkeket feltételeztünk a fizikai topológia mentén, és OSPF útvonalválasztó algoritmust alkalmaztunk. A szimuláció eredménye a szükséges router portok száma (N_{router}).

A teljes CAPEX az alábbi képlet alapján számítható:

$$C_{tisztan_IP} = C_{IP}^{port} \cdot \sum_{router} N_{router} \quad (9)$$

Az „IP over OTN” architektúra elemzéséhez elsőként a forgalmi mátrixot elemeztük. Azonosítottuk a jelentős átmenő forgalmakat és közvetlen hullámhossz utakat



rendeltünk hozzájuk az optikai rétegben. A többi forgalmat OSPF algoritmus szerint vezettük el. Az OTN méretezéséhez legrövidebb utas elvezetést (kilométer alapján) és a definiált utak felett optimalizált hullámhossz kiosztást alkalmaztunk.

A szimuláció eredménye a szükséges IP portok száma (N_{router}), valamint az optikai kapcsolók átmenő és végződő portjainak száma ($N_{OXC_vég}$, $N_{OXC_át}$).

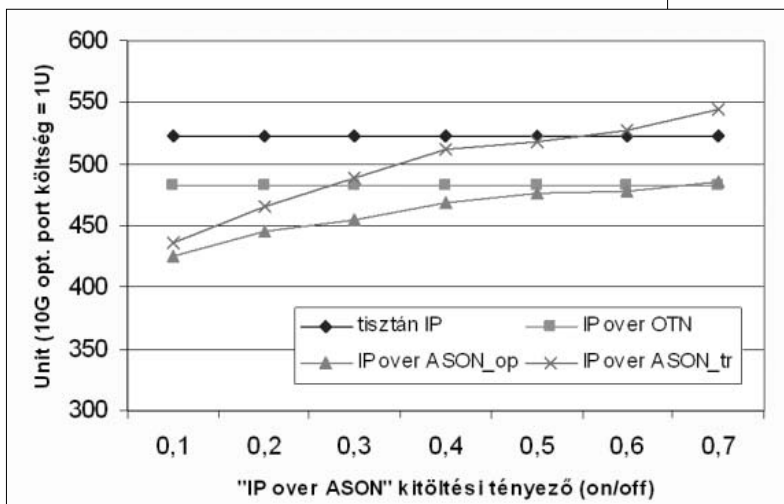
A teljes CAPEX a következő alapján számítható (10):

$$C_{IP_OTN} = C_{IP}^{port} \cdot \sum_{router} N_{router} + C_{OXC}^{port} \cdot \sum_{OXC} N_{OXC_vég} + N_{OXC_át}$$

Az „IP over ASON/GMPLS” architektúrában a dinamikus kapcsolat felépítést és bontást szimuláltuk. A statikus szimulációkban használt forgalmi mátrix alapján feltételeztünk minden összeköttetéshez egy kitöltési tényezőt. Ez a tényező meghatározza, hogy az adott összeköttetést milyen valószínűséggel kell felépített állapotban tartani, és az idő mely hányadában lehet lebontani.

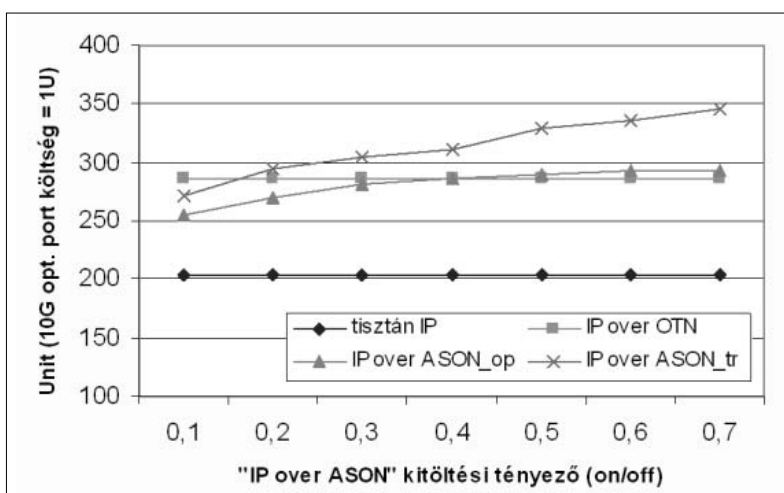
5. ábra

CAPEX elemzés 20%-os forgalmi töltöttségénél (sok átmenő forgalom)



6. ábra

CAPEX elemzés 80%-os forgalmi töltöttségénél (kevés átmenő forgalom)



Hálózati szempontból megfelelően nagy időintervallumot vizsgálva statisztikus nyereség tapasztalható a szükséges OXC portok számát tekintve. A dinamikus forgalmi modellben konstans várható tartási időket feltételeztünk az egyes forrás-nyelő párok között. A forgalmakat a legrövidebb úton vezettük el, transzparens esetben a legalacsonyabb számú szabad hullámhossz (first-fit) hozzárendelésével.

Az architektúra teljes CAPEX-e a következő képlet alapján számítható (11):

$$C_{IP_ASON} = C_{IP}^{port} \cdot \sum_{router} N_{router} + C_{OXC_CP}^{port} \cdot \sum_{OXC} N_{OXC_vég} + N_{OXC_át}$$

A három architektúra relatív CAPEX költségei a következő grafikonokon hasonlíthatók össze. Az első esetben azt feltételeztük, hogy az IP linkek átlagosan csak 20%-ig terheltek, tehát a „tisztán IP” architektúrában a <2 GbE pont-pont forgalmakhoz külön 10 GbE linkeket rendeltünk (5. ábra).

A forgalmak elvezetéséhez így 174 db IP port szükséges. Az „IP over OTN” architektúrában direkt 10 GbE hullámhossz utakat rendeltünk a 2 GbE-nél nagyobb forrás-nyelő párokhoz, a többi igényt pedig pont-pont jelleggel vezettük el. Ebben az esetben 75 db IP port szükséges az igények végződtetéséhez és 257 OXC port az OTN rétegben az átmenő és végződő forgalmak számára.

Az „IP over ASON/GMPLS” architektúrában a kitöltési tényező változtatásával szimuláltuk azt, hogy az átlagosan 20%-ig terhelt 10 GbE linkek az idő milyen arányában vannak jelen a hálózatban. Feltételezéseink szerint az IP portok 3-szor drágábbak az OXC portoknál. Az architektúrák teljes CAPEX költsége a 4. ábrán látható. A forgalmi viszonyokból adódóan (átmenő forgalmak aránya), az „IP over OTN” architektúra valamivel olcsóbbnak bizonyult a „tisztán IP” architektúránál.

Az „IP over ASON/GMPLS” architektúra költsége a hullámhossz konverziós képességek mellett gyakorlatilag mindig alacsonyabb az „IP over OTN” architektúráénál, transzparens esetben viszont csak 25%-os kitöltöttség alatt éri meg alkalmazni, ráadásul 55%-os kitöltöttség felett még a „tisztán IP” architektúránál is drágább.

A 3. ábrán ellenőrizhető, hogy a számított átmenő forgalmak aránya ($\alpha=1,452$) és a multiplexálási faktor ($\beta=0,925$) mellett éppen a 3-szoros költséghez tartozó görbe felett vagyunk egy kicsivel, tehát az „IP over OTN” architektúra a gazdaságosabb. Nagyobb átmenő forgalmi arány mellett, a költség-hatékonyság markánsabban jelentkezik.

A második esetben azt feltételeztük, hogy a 10 GbE IP linkek 80% feletti telítettséggel rendelkeznek, ezzel csökkentettük az átmenő forgalmak arányát (6. ábra). A „tisztán IP” architektúrában így csupán 68 db 10 GbE port szükséges. Az „IP over OTN” architektúrában 40 db IP port kell a forgalmak végződteséhez, plusz még 166 db OXC port az OTN rétegben. Ugyanazt a 3-szoros költségarányt feltételezve, az eredmények az 5. ábrán láthatóak. A magasabb átlagos IP link kitöltöttség miatt ebben az esetben kevesebb IP port kellett, és azok az átmenő IP forgalmak sem voltak jelentősek, amelyek az optikai rétegben megvalósítható tranzitja költség-hatékony lenne.

Ezáltal a „tisztán IP” architektúra olcsóbbnak bizonyult az „IP over OTN” architektúra kiépítésének költségénél. Az alacsony tranzit forgalmi volumen következtében az „IP over ASON/GMPLS” architektúra alkalmazása sem tudott jelentős statisztikus nyereséget produkálni. Látható, hogy 10% és 70% kitöltöttség között gyakorlatilag mindig drágább marad a „tisztán IP” architektúránál.

Az „IP over OTN” architektúrával összevetve transzparens esetben csak 15%-os kitöltöttség alatt lenne érdemes használni, míg hullámhossz konverziós képességeket feltételezve is csak 45%-os kitöltöttség alatt lesz olcsóbb az „IP over ASON/GMPLS” architektúra.

A 3. ábrán ellenőrizhető, hogy a számított átmenő forgalmak aránya ($\alpha=0,8$) és a multiplexálási faktor ($\beta=0,325$) mellett jóval a 3-szoros költségarányhoz tartozó görbe alatt vagyunk, tehát a „tisztán IP” architektúra sokkal gazdaságosabb.

Végeredményben elmondható, hogy az egyes optikai alapú architektúrák költségelőnyei nagymértékben függnnek a hálózati környezettől, topológiától és a forgalmi volumentől, eloszlástól stb. Mindazonáltal az IP útvonalválasztó berendezéseket terhelő átmenő forgalmak aránya az, ami markánsan befolyásolja egy-egy architektúra gazdaságosságát.

5. Összegzés

A különböző optikai architektúrák alkalmazásának nem csak műszaki, hanem gazdasági vonatkozásai is vannak. Ezért még a megvalósítás előtt fontos látni, hogy mely architektúra választása lesz hosszú távon költség-hatékony.

Ennek érdekében egyszerű, analitikus CAPEX modelleket dolgoztunk ki, amelyek segítségével a kiinduló paraméterek, topológiák, forgalmi viszonyok ismeretében összevethetőek az architektúrák változatok. A modellek alkalmazhatóságát szimulációkkal is leellenőriztük, amelyek a várt eredményekkel szolgáltak.

Irodalom

- [1] ITU-T G.692,
Table A.1 Nominal central frequencies
- [2] ITU-T G.8080/Y.1304,
„Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)”
- [3] IETF RFC 3471,
„Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description”
- [4] A.V. Williams:
„IP and Optical: Better Together”,
Telcordia/LTS Seminar Series, Mar 11, 2002.
- [5] GÉANT2 Topology August 05,
<http://www.geant2.net>
- [6] TERENA Compendium of Research and Education Networks in Europe, 2005 Edition,
<http://www.terena.nl/compendium/>

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 átbocsátóképességének 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 kiterjeszthetők.

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.

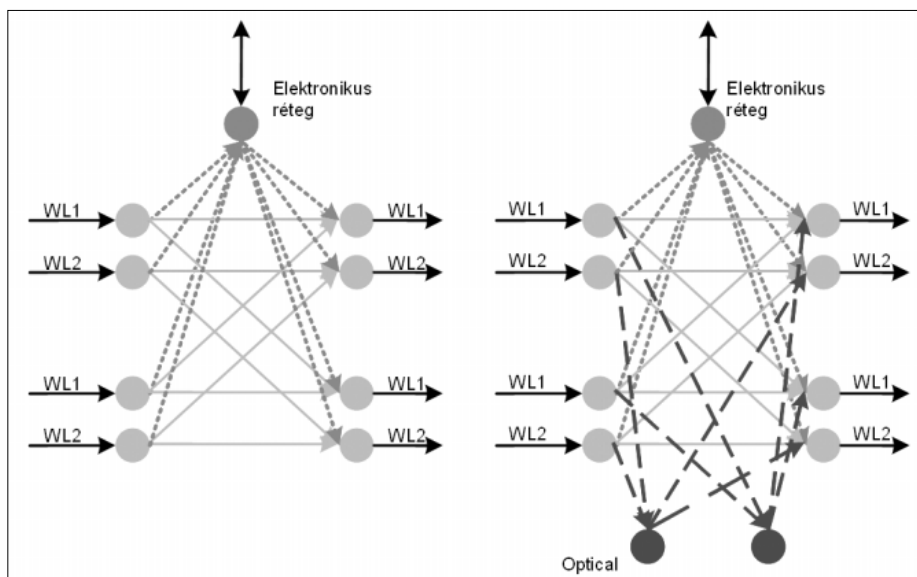
Számos eltérő típusú hálózati kapcsolót különböztethetünk meg: *Optical Add-and-Drop Multiplexers* (OADM), *Optical Cross-Connect* (OXC: optikai maggal), *Opto-Electrical Cross-Connect* (OEXC: elektronikus mag), melyek teljes vagy részleges, illetve tiszta optikai vagy elektronikus hullámhossz konverziót 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 élek 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). Hullámhosszt 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.

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

(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 fölöslegesen ne foglaljunk le kapacitást. (4) biztosítja, hogy igény ne tűnhesen 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 haladhasson át egy igény, ha az használatra le van foglalva. (8) ismét a fölösleges 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 gyorsíthatja 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 kényszer 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:

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

Az osztási korlátot α_r -vel jelöltük, mely eszközönként más és más lehet.

Az igények tisztán optikai osztása – még ha csak kétfelé 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 elterő lehet. A jel minőségromlását a nyelőig vezető úton elszorított optikai osztások száma határozza meg. Ez az érték az alábbi formulával korlátozható:

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

ahol L^{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*):

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

A β^{or} segítségével más-más érték adható meg az egyes igényekhez, részigényekhez. Ugyanakkor a β^{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:

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

μ^r konstans a fa méretének maximuma.

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

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

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

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

Változók:

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

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 ($v_i^r=1$). κ_i egy alkalmasan megválasztott, nagy konstans, η^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 átkezik 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:

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

Célfüggvény:

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

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

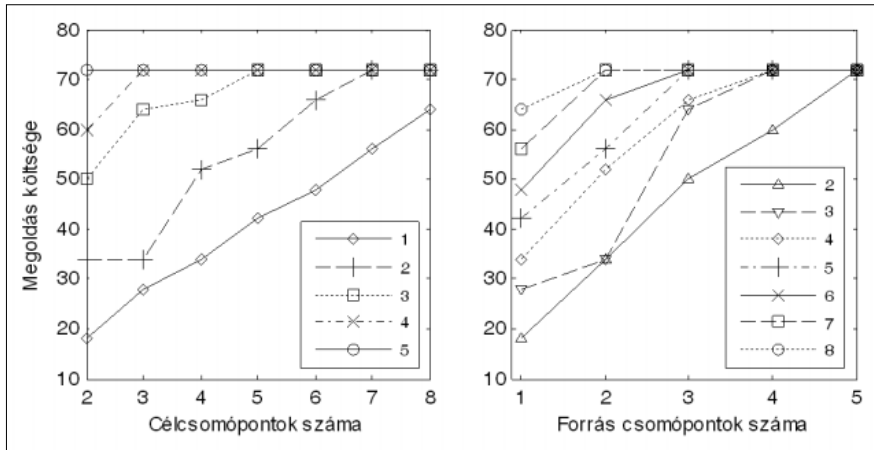
q^{or} egy pozitív változó, mely az előírt étéktől való eltérést reprezentálja, míg c^{or} a büntetősúly. A többi korlát hasonló módon fogalmazható át.

6. Eredmények

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

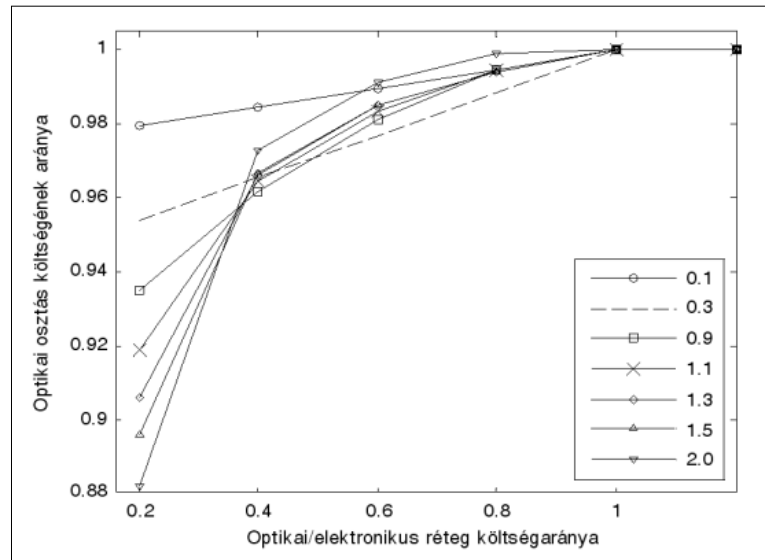
A 2. ábra azt mutatja, hogy a multicast forgalomelvezetés jól skálázódik mind a forrás, mind a nyelő csomópontok számának növelésével. A költségfüggvény mindig egy adott küszöb alatt marad, fokozatos telítődik. Tehát egy újabb fa hozzáadásának, vagy egy új végpont meglévő fába való beillesztésének költsége 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 célsomópontok számának
függvényében
különböző számú nyelőre (bal)
és
az útválasztás költsége
a forrás csomópontok számának
függvényében
különböző számú célsomópontra (jobb)

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

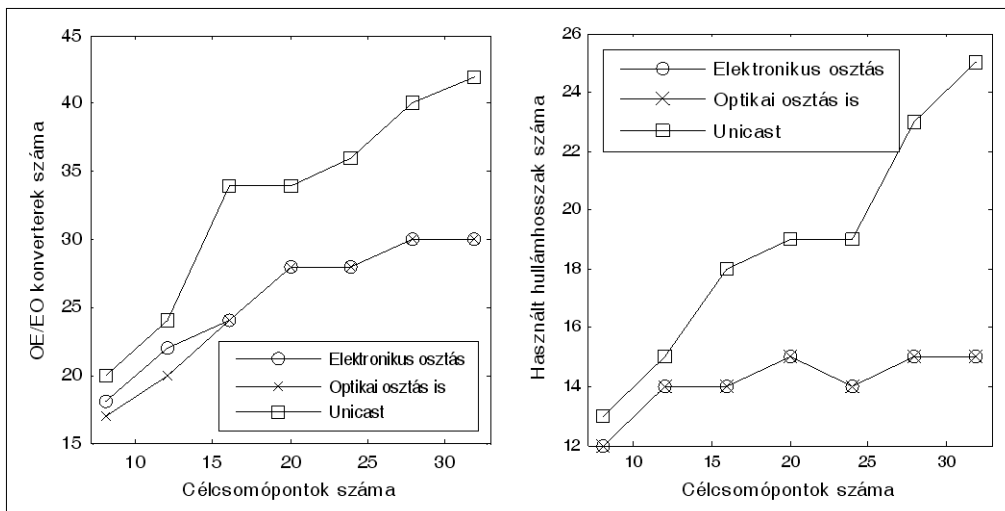


képes hálózatban. Jól látható, hogy minél olcsóbb az optikai réteg használatának költsége, annál nagyobb lehet a megtakarítás. Az optikai osztás tehát főleg akkor kedvező, ha az elektronikus réteg használata drága, ami a jelenlegi hálózatokra igaz. A nyereség minde mellett nagymértékben függ az igények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

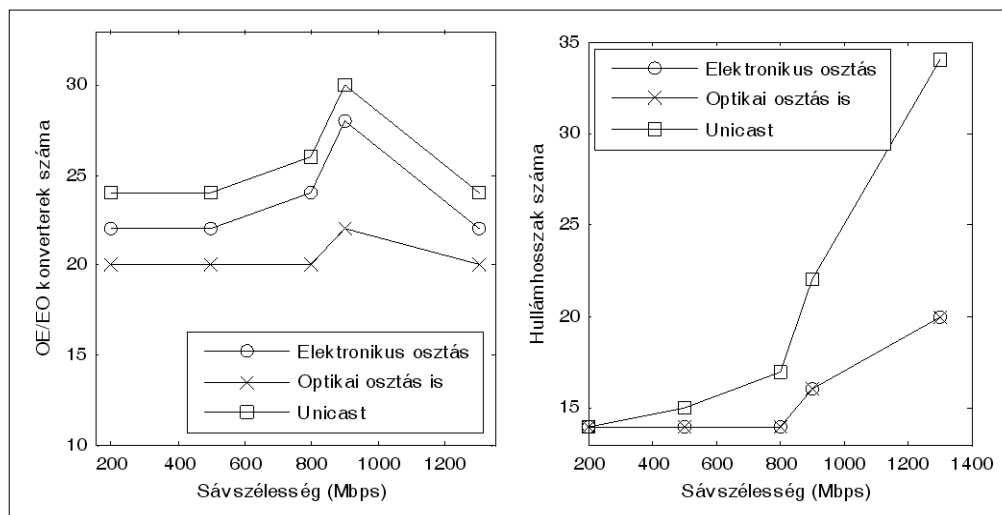
A 4. ábra alapján megállapítható, hogy az elvezetéshez szükséges konverziós portok és a felhasznált hullámhosszok száma nő a nyelő csomópontok hozzáadásával. Az optikai osztással is rendelkező hálózat csak akkor használ kevesebb konverziós portot, ha a résztvevő csomópontok száma kicsi – a hálózatban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

Az 5. ábra szintén a szükséges hullámhosszak és konverziós portok számát mutatják, de az igények növekvő sávszélességének függvényében. A szimuláció során négy fát vezettünk el egyenként három nyelővel. 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 célsomópontok
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

Virtuális hangtér-szimuláció és a binaurális technológia

WERSÉNYI GYÖRGY

Széchenyi István Egyetem, Győr
wersenyi@sze.hu

Lektorált

Kulcsszavak: virtuális valóság, lokalizáció, hangtér szimuláció, binaurális hallás

A virtuális valóság szimulátor gyűjtőnév alatt megtaláljuk a látvány, a hangélmény, sőt a tapintás szimulációját is modern rendszerek esetében. Ennek részeként a hangtér létrehozása fejhallgatón keresztül történik és célja az autentikus hangtér-leképezés. Hangforrásokat hozunk létre, irányinformációval látjuk el őket és olyan akusztikus környezetet igyekszünk megvalósítani, amely a lehető legjobban hasonlít a valóságra. A legfontosabb paraméter ebben a hangforrások helyének meghatározhatósága, a lokalizáció, az irányinformáció pontos átvitele. A binaurális, kétfülű hallás alapvető működése, leírása, a műszaki paraméterek definíciója és mérése alapvető feladat. Ez a cikk bemutatja az ide vonatkozó fogalmakat, mérési eljárásokat, a szimuláció lényegi lépéseit és korlátait, elsősorban a fejhallgatók lejátszás szemszögéből.

1. Bevezetés

A binaurális technika magába foglalja azokat a hangfelvételi, lejátszási, és szintetizálási technikákat, ahol a kérdéses jel a dobhártyán fellépő akusztikus jel. Ha ezeket megfelelő pontossággal elő tudjuk állítani a hallgató dobhártyáján, autentikus hangélményben lesz része. Azaz, ha képesek vagyunk reprodukálni azt a hangnyomás időfüggvényt a dobhártyákon, melyek egy adott hangtérben keletkeztek egy korábbi felvétel során, akkor tökéletesen át tudjuk vinni az akusztikai információt. Ennek legfontosabb része az irányinformáció, azaz a hangforrások helyének meghatározhatósága, melyet lokalizációnak hívunk.

Mindez csak elméleti felvetés, hiszen a fülek jeleinek ilyen reprodukálása nehéz, gyakorlatban szinte lehetetlen. Az elméletet nevezhetjük kétfülű hallásnak is, hiszen a fülek kétcsatornás bementét tekinti hasznos jelnek, melyet mérni, illetve reprodukálni kell tudni. A felvételeket a hallgató fülében kell végezni, elméletileg a dobhártyán, gyakorlatban a hallójárat bementén. Lejátszáskor számítógép által generált hangforrást kell „elhelyeznünk” egy virtuális térben, mesterségesen létrehozva az átviteli utat a dobhártyáig. A binaurális technológia olyan metódusok összefoglaló neve, mely magába foglalja az akusztikus bemenő jelek gyakorlati kezelését mindkét fül számára, mint például a felvétel, szintézis, feldolgozás, kisugárzás és kiértékelés.

Ez a cikk röviden bemutatja az emberi térhallás és irányérzékelés alapjait, a leíró átviteli függvények értelmezését és használatát, különös tekintettel azok mérési nehézségeire. Bemutatja a kapcsolatot a mérhető átviteli függvények és a helymeghatározhatóság között. A következő fejezet a binaurális szintézis lépéseit tárgyalja: felvételi lehetőségek műfejjel, illetve igazi emberekkel, a rögzített adatok feldolgozása és fejhallgatón történő lejátszása. Utóbbi problematikája külön fejezetben kerül összefoglalásra. Végül az összefoglalásban néhány alkalmazásra hívjuk fel a figyelmet.

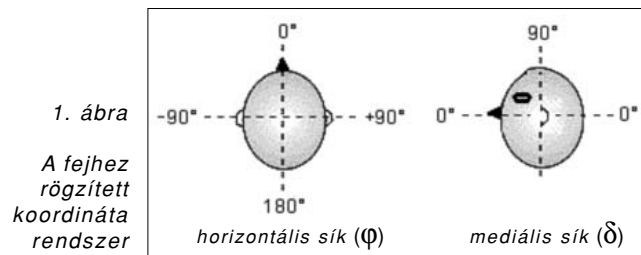
2. Az emberi térhallás és lokalizáció

2.1. A leíró függvények

A hallásfolyamatban részt vesz a külső fül, a középfül, a belső fül és az agy [1,2]. A külső fül a dobhártyáig tart, a beérkező akusztikai hullám mechanikai rezgésbe hozza azt. A középfülben ez a mechanikai rezgés terjed a hallócsontokon át a csigáig. A belső fülben a csigában található folyadék és a baziláris membrán rezgései végzik a frekvenciatranszformációt és az idegi impulzusok előállítását az agy számára. A térbeli hallás számára a külső fül vizsgálata a legfontosabb [3-5].

A külső fül műszaki leírása, mérnöki megragadása annak átviteli függvényével történik. A komplex átviteli függvényt HRTF-nek rövidítjük (*Head-Related Transfer Function*), mely leírja az átvitelt a szabadtér bármely pontjától a dobhártyáig, a beesési iránytól függően [6-9]. Így minden térirányhoz más HRTF tartozik. Ez a szűrőhatás határozza meg lényegében az irányinformációt. Mivel a HRTF komplex, létezik amplitúdó- és fázismenete is, sőt, gyakran az időtartományban értelmezett változatát használjuk. Ennek neve HRIR (*Head-Related Impulse Response*), ami az impulzusválasz [10].

Az átviteli függvényeket, mivel irányfüggők, speciális, fejhez rögzített koordináta-rendszerben értelmezzük [11]. Origója a fej közepében található és az egyes függvényeket gömbi koordinátákkal (r , φ , δ) paraméterezzük. Az oldalirányú kitérést a horizontális síkban φ -vel jelöljük, neve azimút. A függőleges kitérést a mediális síkban δ -val jelöljük, neve emelkedés vagy eleváció (1. ábra).



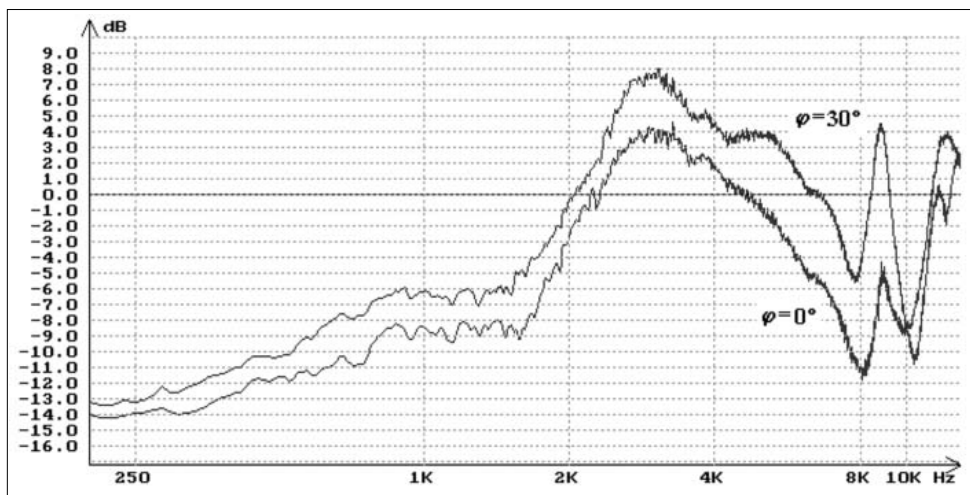
A távolságinformáció, mint harmadik paraméter általában nem szerepel, mert egyrészt gyakran állandó távolsággal dolgozunk (a fej körül gömbfelületet vagy kört elképzelve), másrészt a távolsághallás szinte kizárólag a hangerősség függvénye. A HRTF függvények tehát egy készletet alkotnak; minden térirányhoz léteznek egy-egy a bal és a jobb fülhöz is. Ez a szűrőhatás tartalmazza elsősorban a fülkagyló (alak, méret, szög), másrészt a fej (méret, orr, alak stb.) és a felsőtest geometriájának hatását, beleértve az akusztikus környezetet is (visszaverődések, teremméret stb.) [12-14]. Éppen ezért, ha csak nem hangsúlyozzuk az ellenkezőjét, a HRTF függvényeket a szabadtérben (free-field) értelmezzük, amikor nincsenek visszaverődések (süket szobai mérések).

A 2. ábra horizontális síkban mért HRTF függvényeket mutat. Ilyen értelemben a hallás szétbontható irányhallásra és távolsághallásra, amelyből mi az előbbire fókuszálunk.

2.2. Helymeghatározás

A lokalizáció annyit jelent, hogy képesek vagyunk a hangforrások helyzetét hozzánk viszonyítva (a fejhez rögzített koordináta rendszerben) meghatározni. Ez csak véges pontossággal lehetséges, így az úgynevezett lokalizációs bizonytalanság meghatározása az elsődleges cél. Ez nagyjában függ a jel és a környezet paramétereitől és általában a helyes iránytól való eltérés fokában adjuk meg [16-18].

Az irányérzékelés két legfontosabb paramétere a füljelek közötti (interaurális) szint- és időeltérések. Amelyik fülben hangosabb és/vagy előbb érkezik be a jel, azt közelebbinek fogjuk érzékelni. Ez a folyamat nyilvánvalóan megjelenik a két fül impulzusválaszában és a frekvencia-tartománybeli képen is (3. ábra).

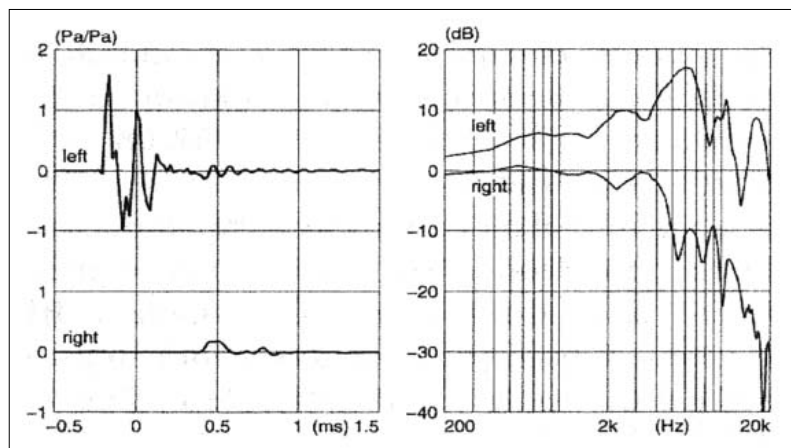


2. ábra HRTF függvények a horizontális síkból a bal fül dobhártyájának helyén mérve (Brüel Kjaer 4128 műfej) [15]

A hallás lehető legjobb felbontóképessége a szemben irányban található. Mivel a vízszintes (horizontális) síkban a füljelek idő- és szinteltérése nagy lehet, itt 3-5 fok körüli a bizonytalanság mértéke. Mivel a fej szimmetriájában (mediális) a két fülbe azonos időben és erősséggel érkezik a jel, a lokalizáció nehezebb. Itt csak a HRTF függvények szűrőhatása érvényesül és nagyságrendekkel rosszabb az eredmény: 10-25 fok is lehet a hiba [1,20]. Ráadásul, gyakran előfordul, hogy ebben a síkban található forrásokat összekeverünk, és nem tudjuk eldönteni előlről vagy hátulról érkeznek-e. Ez az úgynevezett elől-hátul döntési hiba.

Az interaurális és binaurális kifejezéseknek létezik ellentéte is: a monaurális hallás és feldolgozás. Ezt magyarul egyfülűnek is nevezhetjük. Olyan paraméterek tartoznak ide, melyeket egy füllel, egy csatornával is fel tudunk dolgozni. Ilyen például a hangerősség vagy az egyik fül HRTF függvénye, amely önmagában is képes némi irányinformációt szolgáltatni.

Jegyezzük meg még, hogy a hangforrások helyének meghatározása abszolút és relatív is történhet. Abszolút vizsgálatnál a kísérleti alanyra rá kell mutatnia a hangforrásra, illetve az érzékelt irányra, míg relatív vizsgálatnál két hangforrás irányát kell összehasonlítani egymással, hogy az azonos-e vagy eltérő. Utóbbi könnyebb feladat, ezért az eredmények is jobbak [21-23].



3. ábra

A külső fül rendszerleíró függvényei. Balra az impulzusválasz (HRIR), jobbra az abból számított átviteli függvény (HRTF) a bal és a jobb fülhöz, élő ember blokkolt hallójáratának bejáratán mérve „bal” ($\varphi = -90^\circ$) irányból [19].

Különösen lényeges a fejárnyék hatása. Egy a bal fül tengelyébe eső (-90°) forrás esetén a bal fülbe akadálytalanul terjed a hang, míg a jobb fül teljesen a fejárnyékban van. A jobb fül jele amplitúdóban is lényegesen kisebb, hiszen csak másodlagos utakon érkezik be a hang, visszaverődések és elhajlások során (ld. 3. ábra). Ennek a fülnek a jele sokkal zajszzerűbb és körülbelül 3 kHz felett szinte alig szállít értékelhető akusztikai információt [19,24]. A fej és egyéb tárgyak árnyékoló hatása az egyik legrosszabb, ami a fület érő akusztikai jellel történhet! Éppen ezért oly jelentős a kétfülű hallás: míg az egyik fül alig képes információhoz jutni, a másik a lehető legtöbbet próbálja kinyerni. A fejárnyék tehát aluláteresztő hatású. A HRTF, illetve a HRIR függvények tartalmazzák ezeket az időbeni és szintbeli hatásokat.

2.3. HRTF mérés

Mivel a HRTF definíciója feltételezi a síkhullámú terjedést és beérkezést a fülbe minden frekvencián, a valóságban a mérések hibát fognak tartalmazni. A süket-szobában véges távolságra, néhány méterre van a mérendő személy a forrástól, így a gömbhullámok csak részben tudnak kisimulni. A süketszoba önmagában is csak közelíti a szabad hangteret, különösen alacsony frekvencián. Szék, állvány stb. szintén okoz visszaverődéseket, melyek részben kiküszöbölhetők, például a mért HRIR függvény ablakolásával és időbeli csonkolásával. Lehetőleg minél kevesebb ilyen szerkezetet alkalmazunk és azokat is érdemes hangelnyelő anyaggal borítani.

A mérés során referenciamérést végzünk, így a felhasznált hangszóró, erősítők, sőt a süketszoba fent említett eszközeinek hatása eliminálható [11]. Műfejes mérés tipikus elrendezése, amikor a műfejet egy vezérelhető forgóasztalra helyezzük, mely adott fokkal forgatható. Ehhez képest egy rögzített, de állítható emelkedésű hangszórót helyezünk el. Kezdetben a referenciajelet kell megmérni. Ekkor egy irányfüggetlen mikrofont helyezünk a forgóasztalra, melynek membránja a műfej fejének közepével megegyező magasságban (a képezetbeli origóban) található. A megmért jel spektrumát, mint referencia spektrum tároljuk. Ezután lecserélvén a mikrofont a műfejre, ugyanolyan környezeti paraméterek, beállítások mellett megismételjük a mérést.

Az így mért átviteli függvény és a referencia spektrum komplex hányadosa pontosan a HRTF függvény adja. Az ugyanis nem más, mint a műfej – ami egy speciális iránykarakteristikával rendelkező kétcsatornás mikrofonrendszer – átviteli függvénye az irányfüggetlen mikrofonhoz képest. A műfej – és vele együtt az emberi test is melyet modellez – egy egyszerű antenna, mikrofon, adott átvittel (HRTF), ábrázolható iránykarakteristikával. Ez utóbbi a HRTF függvényekből számítható polár diagram.

Ennek tükrében érthető, hogy elvben a hangszóró átviteli függvénye nem lényeges, hiszen az osztás során kiesik a számításokból. Annyiban azonban téves ez a megállapítás, hogy mélyfrekvencián, ahol már rossz az átvitel, ott a kiesés ellenére is rossz lesz a jel-zaj-viszony, így az alkalmazott hangsugárzó átviteli függvé-

nyét érdemes megvizsgálnunk. Ráadásul, a jó mélyfrekvenciás átvitelű hangszórónak általában hosszú az impulzusválasza, ami megnehezíti a mért eredményekben történő ablakolást, hiszen a hasznos rezgés időben át fog lapolódni a káros reflexiókkal.

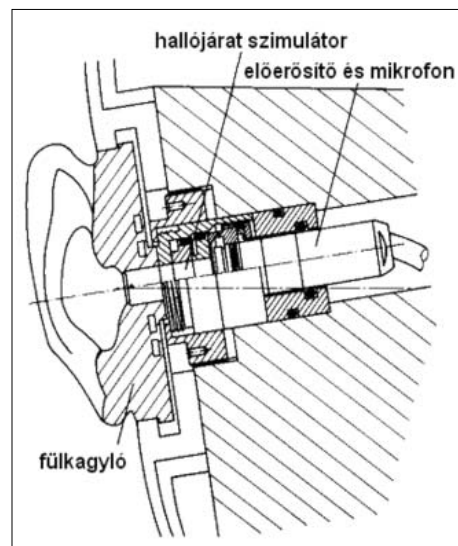
3. A binaurális technológia

A binaurális jelfeldolgozás első lépése a rögzítés, a felvétel. Amikor binaurális jeleket rögzítünk, az összes, a hangtérre jellemző paraméter bele van sűrítve a két fül jelébe. Elvileg, ezek helyes és tökéletes reprodukciója a teljes akusztikai információt hordozza [25]. A kutatók jó része irányul itt arra, hogy megtudjuk, az akusztikai információban mely részek miként hordozzák az irányinformációt. Az irányinformáció megléte, átvitele megfelel annak, hogy a hallgató nem vét nagyobb lokalizációs hibát a virtuális térben, mint egyébként tenné.

A szakirodalomban megtalálható, hogy nem csupán a dobhártyán, hanem a hallójárat közepvonala mentén – beleértve a bejárat pontot is – ez az információ állandó, mérhető [26,27]. Továbbá igazolták, hogy a hallójárat bejáratán végzett mérés és információgyűjtés független attól, hogy a hallójárat bejárata szabad-e vagy blokkolt (kitömött, azaz hang nem is terjed tovább a dobhártya felé) [19,28,29]. Más szóval, az irányinformáció előáll és teljes a fülkagyló „után”, közvetlenül a hallójárat bementén.

Ez jó, hiszen méréseket sokkal kényelmesebb itt végezni. Ezzel a műfejeket is egyszerűsíthetjük, nincs szükség a hallójárat (Zwislocki coupler) vagy a dobhártya impedanciájának modellezésre (4. ábra). Ez az elv arra épít, hogy a hallójárat szűk bemente pontforrásként működik, azaz a hallójáratban egydimenziós hangterjedés lép fel, abban már az irányinformáció nem változik.

Ha ezt elfogadjuk, az alábbi modellt állíthatjuk fel. Létezik a hallásnak egy irányfüggő és egy irányfüggetlen része. Ebben a modellben a hallójárat bemenetétől kifelé lévő teret egy Thévenin-helyettesítéssel írjuk le, melynek része a hangnyomás (P_{blokkolt}) és egy generá-



4. ábra

Műfej keresztmetszeti képe a fülkagylóval, a hallójárat és a dobhártya szimulálásával

tor impedancia (5. ábra). Ez utóbbi megfelel a sugárzási impedanciának, mely a hallójáratból a külvilág felé látszik. P_{blokkolt} nem létezik normál hallásfolyamat során, de ha a bejárat blokkolt és a hallójárat üregében mérhető térfogatsebesség értéke zérus, akkor P_{blokkolt} éppen a fizikai akadály előtt mérhető hangnyomás. $P_{\text{dobhártya}}$ a hangnyomás a dobhártyán, P_{nyitott} pedig a nyitott hallójárat bementén mérhető. A hallójárat egy kétkapu, melyet $Z_{\text{dobhártya}}$ terhel. E kétkapu bemeneti impedanciáját a hallójárat bejárata felől látjuk ($Z_{\text{hallójárat}}$). A HRTF definíciója tehát helyesebb, ha nem a dobhártyáig, hanem a hallójárat bármely pontjára kiterjesztjük [25].

3.1. Felvétel

A binaurális szimuláció része tehát a felvétel, amikor a HRTF függvényeket mérjük meg, a jelfeldolgozás, amikor a megfelelő kiegyenlítést és szűréseket elvégezzük, végül a fejhallgatón keresztül történő lejátszás (6. ábra).

Binaurális felvételnél a rögzítés a hallgató hallójáratában történik. Ez lehet ténylegesen a dobhártya (a rá ragasztott mikrofon segítségével), a hallójárat valamely pontja, illetve a hallójárat bejárata. Kényelmi szempontból utóbbi a legelőnyösebb. Felmerül a kérdés, hogy maga a mikrofon mennyire zavarja meg a hangteret. A vizsgálatok azt igazolták, hogy a térbeli információtartalom (a hangforrások iránya, lokalizáció) szempontjából a méréseket lehetséges a blokkolt hallójárat bementén végezni. Másik elterjedt módszer a műfejek használata. A műfejek műanyag bábuk, felsőtesttel, fejvel, orral és gumí fülkagylóval [30-32]. Dobhártyájuk helyén mikrofonok találhatóak, és a hallójárat impedanciája is modellezett.

3.2. Jelfeldolgozás

Lejátszás fejhallgatón keresztül történik, mert ez képes tökéletes bal-jobb csatorna szétválasztásra (áthallásmentesítés) és kellően jó hangszigetelésre, mely a külvilág zavarát csökkenti. Természetesen, elengedhetetlen a teljes átviteli út, kábelek, erősítők és különösen a fejhallgató komplex átviteli függvényének kiegyenlítése, linearizálása [27,33,34].

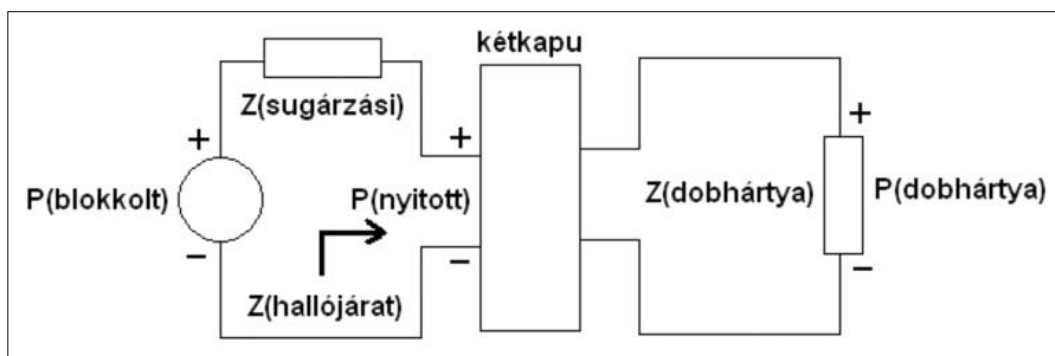
Ha méréshez és felvételhez műfejet vagy más embert használunk, mint a hallgató, a füljelek nem fognak megegyezni azzal, amit a saját fülével érzékelt volna. Ennek az oka a külső fül átviteli függvényeiben is keresendő [7,28].

A binaurális szintézis tehát nem más, mint egy hangforrás (hangjel) megfelelő szűrése a HRTF függvényekkel, az átviteli út kiegyenlítése és a jelek fejhallgatón át történő kibocsátása. Ennek minőségét a különböző lokalizációs feladatok elvégzésével vizsgálhatjuk [35]. Ha tehát valamilyen módszerről azt állítjuk, hogy rosszabb egy másiknál, akkor azt értjük rajta, hogy a vizsgálatok eredménye rosszabb: a lokalizációs problémák megoldása gyengébb, a térbeli felbontóképesség romlik.

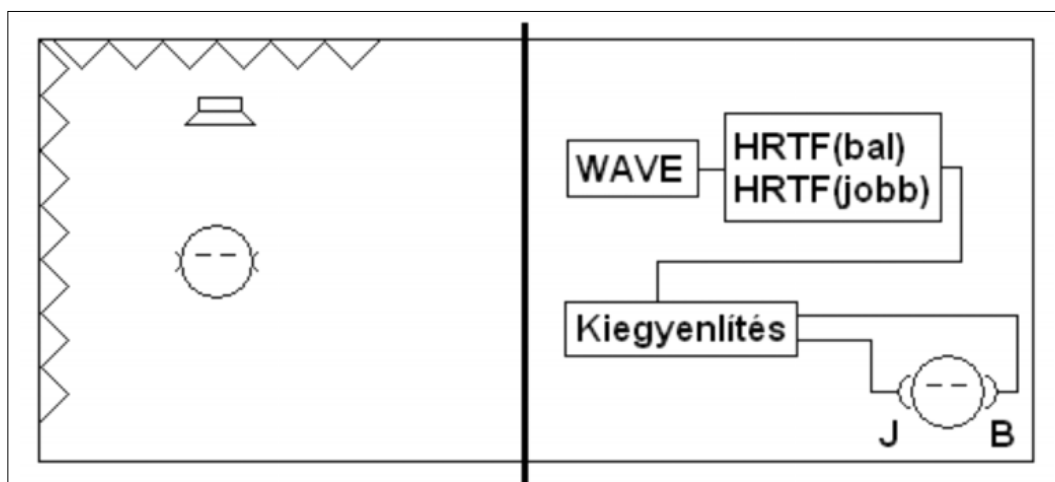
3.3. Fejhallgató kiegyenlítés

Tekintettel arra, hogy a HRTF mérésekhez és a hallójáratban végzett felvételekhez alkalmazott kisméretű mikrofonok átvitele kellően lapos, a kiegyenlítéshez tulajdonképpen elégséges a fejhallgató inverz átviteli függvényét előállítani. Ezt az átviteli függvényt ott kell mérni, ahol a felvétel is készül, tipikusan a blokkolt bejáraton (ugyanazon a kísérleti személyen).

5. ábra
A külső fül modellje
és Thévenin-képe



6. ábra
Szabadtéri hallás
a süketszobában és
binaurális szimuláció
fejhallgatóval



Idáig feltételeztük, hogy akin a mérést végezzük, az ugyanaz a személy, akin a fejhallgató átviteli függvényét is megmérjük, majd akin a kiegyenlítés után a lejátszást is megvalósítjuk. Ez azonban a valóságban körülményes és drága is lehet. Be kell vezetnünk az *individualitás* fogalmát, amelyet elveszítünk akkor, amikor más ember HRTF függvényeit használjuk lejátszáshoz [36]. De bármilyen módosítás és eltérés a fenti ideális képtől rontani fogja az eredményt. Az individuális eltérések oka elsősorban a fülkagylók, a test alakja és mérete különbözőségében rejlik. Minden embernek más a testmérete és már egész kis méretbeli eltérések a fülkagyló esetében vagy a fejhez közeli akusztikus környezetben kihatnak a HRTF függvényekre [37,38]. Az ilyen HRTF készletet ezért nem individuálisnak nevezzük.

A fenti elvhez tehát kiegészítésként jegyezzük meg, hogy egy ilyen folyamat csak egy ember számára lesz korrekt és az is csak elvben. Ettől függetlenül léteznek egyszerű, többé-kevésbé használható módszerek arra, hogy meglévő függvényeket individualizáljunk, például azzal, hogy a visszajátszáskor a hallgató fejméretét (hallójáratának távolságát) megadjuk, vagy hogy frekvenciában a spektrumot megfelelő módon módosítjuk [39-41].

HRTF mérésakor ügyelnünk kell arra, hogy nem csak az emberek között, hanem egy adott ember esetében is különböző függvényeket fogunk mérni ismételt mérések során: kénytelenek leszünk több mérés átlagát figyelembe venni. Belátható és mérésrel igazolható, hogy a blokkolt hallójárat bementén mért HRTF-kben a legkisebb az ilyen jellegű eltérés és a szórás [19]. Ugyanakkor az ilyen jellegű spektrális szórások, melyek adott irányból történő ismételt mérésekből adódnak, erősen irányfüggőek is. Szemből irányból lényegesen kisebb, mint hátulról vagy a fej átellenes oldaláról. Ennek oka a csökkent jelszint, a fej különböző árnyékoló hatása stb.

Élő emberekkel ilyen vizsgálatot végezni nehézkes, hiszen még rögzített fejű mérések esetén is mozognak, valamint a jel-zaj viszony sem magas az általánosságban használt impulzusválasz mérésekben. Ezzel szemben a műfejeket nagy jel-zaj viszonyú fehérzajú, sweep jelű méréseknek is kitehetjük, nagy átlagolási idővel, hiszen ők türelmesen „végigülnek” az akár több órás vizsgálatokat is. Műfejes méréseink igazolták, hogy ismételt mérések során szemből irányból képesek vagyunk adott rendszerrel 0,5 dB eltéréseken belül újramérni a HRTF függvényeket, míg más irányokból, például a fej árnyékban elhelyezkedő fül esetén ez csak óriási (akár a 20 dB-t is meghaladó) eltérésekkel lehetséges [15, 37,38]. Ez rámutat arra a problémára, hogy az élő emberekkel végzett mérések eredményei eltérhetnek a műfejes mérésektől.

Tekintettel arra, hogy egy fejhallgató átviteli függvénye a lezáró impedanciával együtt értelmezett, annak mérését üzemi körülmények között kell végezni. Ez vagy emberi fejet vagy műfejet jelent, továbbá azt is, hogy ugyanannak a fejhallgatónak más és más lesz az átviteli függvénye, ha más ember teszi a fejére [42,43]. En-

nek individuális mérése és rendszerbe igazítása rendkívül körülményes. Megfigyeltük a mérések során, hogy az így mért átviteli függvények nagy szórást mutatnak (ugyanazon a fejen végezve is, ha azt többször levezük-felhelyezzük) és még a legjobb hifi fejhallgatóknak sem elég lapos az átvitele tudományos vizsgálathoz. Egyszerű, alacsony rendű digitális szűrőt tervezni ennek kiegyenlítésére tehát nem egyszerű feladat, 7 kHz felett válnak erősen individuálissá a mérési eredmények.

A fejhallgató kiegyenlítését úgy képzelhetjük el, mint az átviteli függvényének inverzével való komplex szorzást a frekvenciatartományban. Így azok szorzatának eredője egységnyi lesz a kívánt sávban. Manapság a számítási kapacitás lehetővé teszi, hogy az ilyen műveleteket, beleértve a HRTF szűrést is, ne a frekvenciatartományban végezzük, hanem az időtartományban. Ehhez a konvolúciót és a dekonvolúciót hívjuk segítségül, a bemenő jel időfüggvényét, valamint a rendszerleíró függvények közül az impulzusválaszokat (HRIR) használjuk fel. Ezeket vagy közvetlen méréssel vagy számítással határozhatjuk meg.

Megjegyezzük, hogy teremakusztikai szimulációnál a manapság alkalmazott elv az, hogy rögzítik az adott terem impulzusválaszát (az úgynevezett Room Impulse Response Function függvényt) és ezt is beleveszik a számításokba úgy, hogy konvolválják a lejátszandó jellel. Így el tudjuk érni, hogy ugyanazt a jelet egy zengő templom, vagy egy nagy stadion tulajdonságaival ruházzuk fel.

A fejre való felhelyezés következtében beálló átviteli függvény változása kevésbé jelentős annál, mint a személyek közötti, így reális cél az, hogy adott fejhallgatót adott hallgatóra kiegyenlítsünk, de nem reális az, hogy egy fejhallgatót minden hallgatóra kiegyenlítsünk egy függvénnyel (feltehetőleg ezt meg is tennék a gyártók, ha így lenne). A túl nagy leszívások és csúcsok az átviteli függvényben veszélyesek, hiszen ezek kompenzálása hasonló magasságú kiegyenlítővel történik, és ha ezek helye változik a frekvencia-tengely mentén ismételt felhelyezéskor, akkor nagyobb hibát okozhatunk a végeredményben, mint előtte. Ezért túl gyenge minőségű fejhallgató kiegyenlítése elég reménytelen feladatnak tűnik.

3.4 Lejátszás

Mint már volt róla szó, a HRTF mérés és reprodukció, valamint a kiegyenlítés sikerét azon mérhetjük, miként teljesítenek az alanyok a virtuális térben történő lokalizációs feladatok során. Ezek az eredmények minősítik a felhasznált HRTF-eket. A kísérletek elején tehát referenciamérést kell végezni a szabadtéri hallással. Ilyenkor az alanyok a süketszobában valóságos hangforrás helyét vagy gyakrabban, korlátozott számú (néhány tucat) hangszóróból álló rendszer jeleit értékelik, lokalizálják.

Érezhető, hogy utóbbi esetben csak a hangszórók tényleges helye lehet valódi hangforrás, a hallgatók mégis érzékelhetnek hangszórók közötti forrásokat. Később, ugyanezek az emberek a fejhallgatók szimulációban is

elvégezzük a feladatokat. Továbbá a látás is erősen befolyásolja a döntést, így általában eltakarják a hangszórókat az alanyok elől. A válaszokban előforduló hibákat az alábbi csoportokba szokás sorolni:

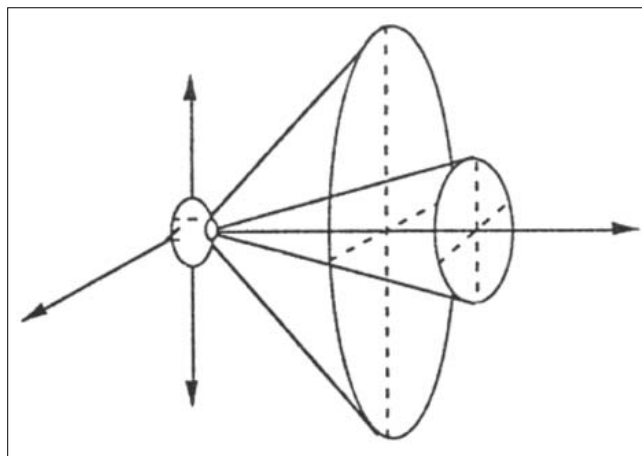
- Távolság hiba, ha jó az irány, de rossz a távolság érzékelése. Ezt csak ritkán mérik, ezért nem mindig paraméter a távolság a kísérletekben.
- Mediális síkbeli hiba, ha a szimulált és az érzékelt irány eltér, de mindkettő a mediális síkban van (ide tartozik az emelkedési szög rossz érzékelése, vagy az elől-hátul döntések összekeverése).
- „Kúpon belüli hiba” akkor fordul elő, ha a valós irány és az érzékelt eltér, de rajta vannak ugyanazon az úgynevezett interaurális kúpon [44]. Megállapítható ugyanis, hogy az interaurális időeltérések lehetnek azonosak különböző irányok esetén is. Az azonos időeltéréshez tartozó pontok egy kúpon helyezkednek el, adott távolság esetén pedig a kúppal való metszésponton, ami egy kör (7. ábra). A különböző források, melyek egy ilyen képzeletbeli kúpon vannak, könnyen összetéveszthetők.
- Kúpon kívüli hiba az összes többi hibalehetőség.

A kísérletek azt mutatták, hogy a felhasznált HRTF függvények alapján létezik egy minőségi sorrend [30-32]. Legjobb eredményeket az individuális, saját HRTF-vel érhetünk el. Ezt követi egy olyan emberi fej függvényei, aki alapján jól tud lokalizálni (egy jó lokalizátor). Ezt követi a véletlenül választott emberi fej és az „átlagos” emberi fej, mely átlagos méretekkkel rendelkezik.

Végül, a sor végén a különböző gyártók műfői találhatók. Látható, hogy a műfaj sok előnnyel rendelkezik a mérés technikában, de virtuális szimulációhoz nem a legmegfelelőbb. Ennek oka, hogy egyszerre próbálja modellezni az összes emberi testet méretben, mely csak részben sikerülhet; azaz ami jó mindenkinek, az nem jó senkinek... Összehasonlításképpen, egy átlagos emberi fejen elért 26%-os mediális hibaérték 60%-ra nőtt műfaj esetén.

3.5. Fejhallgató hibák

A fejhallgató lejátszásnak önmagában is van több hibaforrása. Az a tény, hogy elveszítjük a légtérjedés hatását (hiszen az átalakító és a membrán valójában néhány cm-re van a fültől), az áthallást a két fül között (hacsak direkt nem szimuláljuk) és a fejmozgás hatását, máris rontja a lokalizációt. Különösen utóbbi lényeges, hiszen a normál életben a lokalizációhoz nagyon fontos elem a fejünk forgatása. Ennek során állítjuk ugyanis be fejünket a legérzékenyebb irányba, hasonlóan ahhoz, ahogy egy antennát is ráfordítunk az adóra. Fejhallgató esetén ezt a lehetőséget elveszítjük, mert a fej forgatásával a teljes szimulált hangkép is együtt mozog. Ennek hatása az lesz, hogy a hallgatókban gyakran úgynevezett *fejközép-lokalizáció* alakul ki: úgy érzik, a hangforrás a fejük belsejében, középen helyezkedik el, nem pedig azon kívül [29,45-47]. Az ilyen hiba nagyon gyakori és jelentősen ronthatja a lokalizációt vir-



7. ábra

*Az interaurális időeltérések kúpja.
A kúpon, illetve a körön elhelyezkedő pontok azonos hallásérzet kialakuláshoz vezethetnek [44].*

tuális térben. Modern rendszerek képesek ezt a hatást számítással módosítani, és visszacsatolás révén érzékelni a fej helyzetét (a fejhallgatóra szerelt lézeres adóval), majd valós időben a megfelelő HRTF függvények cserélgetésével a hangképet stabilan tartani [41,48]. Ez valóban csökkenti a fejközép-lokalizációt, ugyanakkor költséges és nehézkes feladat megvalósítani. Az ilyen fejmozgás érzékelő rendszerek a komoly virtuális valóság szimulátorok szükséges kellékei.

Általánosságban elmondható, hogy a lokalizáció a virtuális térben rosszabb, mint a valóságban. Ennek oka a fejhallgatók hibái, a HRTF függvények tökéletlensége, és egyéb paraméterek melyek az akusztikai irányinformációt hordozzák és a virtuális szimuláció során sérülnek. A kutatások jó része irányul arra, hogy az ilyen szimulátorok minőségét, lokalizációs képességeit feljavítsuk.

4. Összefoglalás

A cikk röviden bemutatta a virtuális hangtérszimuláció eszközeit, lépéseit. Bevezette a halláskutatás néhány alapfogalmát, a használatos átviteli függvényt és mérési módszereit, a lokalizációs vizsgálatok jelentőségét. A szimuláció során hangforrásokat hozunk létre, látunk el irányinformációval egyszerű digitális szűrési eljárásokkal, végül prezentáljuk a hangteret fejhallgatón keresztül. A fejhallgató hibái erősen befolyásolhatják a szimuláció sikerét, a lokalizáció eredményességét és az egész virtuális szimuláció összbeműködését. A különböző paraméterek vizsgálata, az eltérő peremfeltételek megvalósítása és a szimulációk pszichoakusztikus lehallgatási teszteken történő kiértékelése az emberi térfhallás-kutatásnak ma is érvényes és használatos módszere.

A bemutatott binaurális technológia áttekintést ad a hangtechnika legmodernebb virtuális szimulációs lehetőségeiről, mely mitsem veszített aktualitásából. Különösen érdekes ez a tudományos kutatás számára, ahol az emberi érzékelés határait vizsgáljuk. Nem elhanya-

golható szempont az orvosi alkalmazás, halláskárosultak és vakok tájékozódását elősegítő rendszerek fejlesztése.

Végül, a legmodernebb virtuális valóság szimulátorok képességei mára meghaladják a korábban elképzelhetlent: egyszerre alkalmazza a hallás, a látás, sőt a tapintás és hőérzékelés lehetőségeit is, különböző kesztyűk és sisakok, bonyolult visszacsatolt eszközök segítségével melyek egyelőre a repülőgép- és űrkutatás eszközei.

Irodalom

- [1] J. Blauert:
Spatial Hearing.
The MIT Press, MA, 1983.
- [2] W. M. Hartmann:
How we localize sound.
Physics Today, pp.24–29., 1999.
- [3] E. A. G. Shaw:
Transformation of sound pressure level from the free-field to the eardrum in the horizontal plane.
J. Acoust. Soc. Am. 56(6), pp.1848–1861., 1974.
- [4] S. Mehrgart, V. Mellert:
Transformation characteristics of the external human ear.
J. Acoust. Soc. Am. 61(6), pp.1567–1576., 1977.
- [5] D. Hammershøi, H. Møller:
Free-field sound transmission to the external ear; a model and some measurement.
DAGA'91, Bochum, pp.473–476., 1991.
- [6] C. B. Jensen, M. F. Sorensen, D. Hammershøi, H. Møller:
Head-Related Transfer Functions: Measurements on 40 human subjects.
Proc. of 6th International FASE Conference, Zürich, pp.225–228, 1992.
- [7] H. Møller, M. F. Sorensen, D. Hammershøi, C. B. Jensen:
Head-Related Transfer Functions of human subjects.
J. Audio Eng. Soc. 43(5), pp.300–321., 1995.
- [8] J. Blauert:
Untersuchungen zum Richtungshören in der Medianebene bei fixiertem Kopf.
Dissertation, Techn. Hochschule Aachen, 1969.
- [9] C. I. Cheng, G. H. Wakefield:
Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency and Space.
J. Audio Eng. Soc. 49, pp.231–249., 2001.
- [10] V. Mellert, K. F. Siebrasse, S. Mehrgardt:
Determination of the transfer function of the external ear by an impulse response measurement.
J. Acoust. Soc. Am. 56, pp.1913–1915., 1974.
- [11] P. Berényi, Gy. Wersényi:
A külső fül feje vonatkoztatott átviteli függvényeinek vizsgálata. Akusztikai Szemle (Acoustical Review), Budapest, Vol. IV., Nr.1-4., pp.35–41., 1999.
- [12] H. Fisher, S. J. Freedman:
The role of the pinna in auditory localization.
J. Audiol. Research 8, pp.15–26., 1968.
- [13] A. Illényi, Gy. Wersényi:
Discrepancy in binaural tests and in measurements of sound field parameters.
Proc. of the International Békésy Centenary Conference on hearing and related sciences, Budapest, pp.160–165., 1999.
- [14] Gy. Wersényi:
On the amplification-damping-effect of the pinnae and of the head.
Akusztikai Szemle (Acoustical Review), Budapest, Vol. VI., Nr.2., pp.23–28., 2005.
- [15] Gy. Wersényi:
HRTFs in Human Localization: Measurement, Spectral Evaluation and Practical Use in Virtual Audio Environment.
Ph.D. doctoral thesis, BTU Cottbus, 2002.
- [16] J. Blauert:
Sound Localization in the median plane.
Acoustica 22, pp.205–213., 1969/1970.
- [17] J. C. Makous, J. C. Middlebrooks:
2-dimensional sound localization by human listeners.
J. Acoust. Soc. Am. 87(5), pp.2188–2200., 1990.
- [18] J. C. Middlebrooks, D. M. Green:
Sound localization by human listeners.
Ann. Rev. Psychol. 42, pp.135–159., 1991.
- [19] D. Hammershøi, H. Møller:
Binaural Technique – Basic Methods for Recording, Synthesis, and Reproduction.
In J. Blauert (Editor) Communication Acoustics, Springer Verlag, pp.223–254., 2005.
- [20] R. H. Domnitz, H. S. Colburn:
Lateral position and interaural discrimination.
J. Acoust. Soc. Am. 61, pp.1586–1598., 1977.
- [21] W. M. Hartmann, B. Rakerd:
On the minimum audible angle – A decision theory approach.
J. Acoust. Soc. Am. 85, pp.2031–2041., 1989.
- [22] D. R. Perrott, A. D. Musicant:
Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sources.
J. Acoust. Soc. Am. 62, pp.1463–1466., 1977.
- [23] Gy. Wersényi:
Localization in a HRTF-based Minimum Audible Angle Listening Test on a 2D Sound Screen for GUIB Applications.
Audio Engineering Society (AES) Convention Preprint Paper, Nr. 5902., Presented at the 115th Convention, NY, 2003.
- [24] A. Illényi, Gy. Wersényi:
Environmental Influence on the fine Structure of Dummy-head HRTFs.
Proc. of the Forum Acusticum 2005, Budapest, pp.2529–2534.
- [25] H. Møller:
Fundamentals of binaural technology.
Applied Acoustics 36, pp.171–218., 1992.

- [26] D. Hammershøi, H. Møller:
Sound transmission to and within the human ear canal.
J. Acoust. Soc. Am. 100(1), pp.408–427., 1996.
- [27] J. Kawaura, Y. Suzuki, F. Asano, T. Sone:
Sound localization in headphone reproduction by
simulating transfer functions from the sound source
to the external ear.
J. Acoust. Soc. Japan, E12, pp.203–215., 1991.
- [28] H. Møller, M. F. Sorensen,
C. B. Jensen, D. Hammershøi:
Binaural Technique:
Do We Need Individual Recordings?
J. Audio Eng. Soc. 44(6), pp.451–469., 1996.
- [29] M. Kleiner, B. I. Dalenbäck, P. Svensson:
Auralization – an overview.
J. Audio Eng. Soc. 41, pp.861–875., 1993.
- [30] H. Møller:
On the quality of artificial head recording systems.
Proc. of Inter-Noise'97,
Budapest, pp. 1139–1142, 1997.
- [31] P. Majjala:
Better binaural recordings using the real human head.
Proc. of Inter-Noise'97,
Budapest, pp.1135–1138., 1997.
- [32] H. Møller, D. Hammershøi, C. B. Jensen,
M. F. Sorensen:
Evaluation of artificial heads in listening tests.
J. Acoust. Soc. Am. 47(3), pp.83–100., 1999.
- [33] F. L. Wightman, D. J. Kistler:
Headphone Simulation of Free-Field Listening I.-II.
J. Acoust. Soc. Am. 85, pp.858–878., 1989.
- [34] P. Minnaar, S. K. Olesen, F. Christensen, H. Møller:
Localization with Binaural Recordings from
Artificial and Human Heads.
J. Audio Eng. Soc. 49(5), pp.323–336., 2001.
- [35] K. D. Jacob, M. Jorgensen, C. B. Ickler:
Verifying the accuracy of
audible simulation (auralization) systems.
J. Acoust. Soc. Am. 92, p.2395., 1992.
- [36] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler,
F. L. Wightman:
Localization using nonindividualized head-related
transfer functions.
J. Acoust. Soc. Am. 94(1), pp.111–123., 1993.
- [37] Gy. Wersényi, A. Illényi:
Differences in Dummy-Head HRTFs Caused by
the Acoustical Environment Near the Head.
Electronic Journal of „Technical Acoustics” (EJTA),
Russia, January 2005 (1), pp.1–15.
<http://ejta.org/en/wersenyi1>
- [38] A. Illényi, Gy. Wersényi:
Evaluation of HRTF data using the Head-Related
Transfer Function Differences.
Proc. of the Forum Acusticum 2005,
Budapest, pp.2475–2479.
- [39] J. C. Middlebrooks:
Individual differences in external-ear transfer
functions reduced by scaling in frequency.
J. Acoust. Soc. Am. 106(3), pp.1480–1491., 1999.
- [40] J. C. Middlebrooks:
Virtual localisation improved by
scaling nonindividualized external-ear
transfer function in frequency.
J. Acoust. Soc. Am. 106(3), pp.1493–1510., 1999.
- [41] M. Cohen, E. Wenzel:
The design of Multidimensional Sound Interfaces.
In W. Barfield, T.A. Furness III (Editors):
„Virtual Environments and Advanced Interface Design”,
Oxford Univ. Press, NY, Oxford, pp.291–346., 1995.
- [42] J. V. Hudebøll, K. A. Larsen, H. Møller,
D. Hammershøi:
Transfer characteristics of headphones.
Proc. of 6th International FASE Conference,
Zürich, pp.161–164., 1992.
- [43] H. Møller, D. Hammershøi, C. B. Jensen,
M. F. Sorensen:
Transfer Characteristics of Headphones Measured
on Human Ears.
J. Audio Eng. Soc. 43(4), pp.203–216., 1995.
- [44] B. G. Shinn-Cunningham, S. Santarelli, N. Kopco:
Tori of confusion: Binaural localisation cues for
sources within reach of a listener.
J. Acoust. Soc. Am. 107(3), pp.1627–1636., 2000.
- [45] F. E. Toole:
In-head localization of acoustic images.
J. Acoust. Soc. Am. 48, pp.943–949., 1969.
- [46] N. Sakamoto, T. Gotoh, Y. Kimura:
On „out-of-head localization” in headphone listening.
J. Audio Eng. Soc. 24, pp.710–716., 1976.
- [47] D. R. Begault, E. Wenzel, M. Anderson:
Direct Comparison of the Impact of Head Tracking
Reverberation, and Individualized Head-Related
Transfer Functions on the Spatial Perception of
a Virtual Speech Source.
J. Audio Eng. Soc. 49(10), pp.904–917., 2001.
- [48] J. Blauert, H. Lehnert, J. Sahrhage, H. Strauss:
An Interactive Virtual-environment Generator for
Psychoacoustic Research I:
Architecture and Implementation.
Acustica 86, pp.94–102., 2000.

A játékelmélet lehetséges szerepe a távközlésben

DULAI TIBOR

Pannon Egyetem, Műszaki Informatikai Kar, Információs Rendszerek Tanszék
tibor.dulai@irt.vein.hu

Lektorált

Kulcsszavak: self-adaptive ügynök, stabilitás, játékelmélet, Nash-egyensúly

Ma már nem elég egy adott funkciót megvalósítani, hanem igyekezni kell a működést is minél hatékonyabban véghez vinni. Ez távközlési rendszerekben sincs másképp. Az ezirányú fejlesztések egyik pillére, hogy a rendszer saját viselkedését adott pillanatban a legmegfelelőbbben tudja az érvényben lévő környezeti paraméterekhez igazítani. Egy hálózatban ugyanakkor a számos felhasználó önző maximalizmusa közepette meg kell találnunk az egyensúlyt jelentő állapotot(ka)t. E cikk azt igyekszik megmutatni, miképpen használhatók a játékelmélet eredményei az egyensúly meghatározásában néhány (főleg mobil) távközlési szituáció esetén.

1. Bevezetés

A technika mai fejlettségi szintje mellett már senki nem lepődik meg azon, hogy szinte valós idejű videó-üdvözlést kaphat ismerőse egyiptomi vakációjáról, vagy akár a világ bármely pontjáról bekapcsolódhat cégének váratlanul összehívott videokonferenciájába. Egyre összetettebb, komplexebb rendszerek szolgálják ki növekvő igényeinket. Ezen igények sokrétűek és gyakran egymásra ellentétes hatást gyakorló mennyiségekre vonatkoznak, gondoljunk csak az átviteli idő és a minőség kapcsolatára. A komplexitást csak fokozza, hogy nem csak egy felhasználót kiszolgáló rendszerről van szó, hanem olyan rendszerről, melyet egyszerre többen vesznek igénybe. Mindeközben persze a többi felhasználót az egyéni igények nem veszik figyelembe. Ezen igények miatt újabb és újabb felmerülő problémákat kell megoldani, illetve a megszületett megoldásokat mind hatékonyabbá tenni.

Jelen cikkben leginkább a mobil távközlés területére koncentrálna feltérképezünk néhány olyan problémakört, melyek esetében a self-adaptive rendszerek és szoftverek a hatékonyságot nagymértékben tudják növelni, illetve megmutatjuk, hogyan alkalmazhatók játékelméleti módszerek ezen ön-adaptív elemek stabil hálózatban történő működésének egy megoldásaként.

2. A telekommunikáció aktuális kihívásai

A mobil, illetve hordozható eszközök felvetnek az akkumulátor-élettartam rövidségére vonatkozó kérdéseket. Ugyanakkor ezek az általában vezeték nélküli eszközök gyakran a hatókörükbe kerülő más eszközökkel ad hoc hálózatba szerveződnek. Ez az önszerveződés, a kialakított hálózaton belüli erőforrás-megosztás, a megbízhatóság további problémát jelent. Természetesen a piacon lévő gyártók termékei nem azonosak, emiatt ál-

talában egy-egy kialakított rendszer erősen heterogén, melyben a hordozhatóságot ugyanakkor biztosítani kell. És mindeddig csupán a technikai hátterét tárgyaltuk annak a rendszernek, melynek célja a felhasználói adatok átvitele. Persze ezen adatok összetettsége is széles skálán mozog: az egyszerű szöveges üzenetektől kezdve a komplex multimédia-tartalmakig, melyekre ugyanakkor egyöntetűen igaz, hogy átvitelüktől megfelelő szolgáltatási minőséget várunk el.

Mindezen problémákra kihat az a tény, hogy az átviteli közeg mobil rendszerek esetén az elektromágneses spektrum valamely része. A mobil távközlés egyik fontos kérdése ezek alapján a következő: Hogyan használható hatékonyan egy változékony, nem-determinisztikus közeg megfelelő QoS biztosítására, késés-érzékeny és egyre komplexebb adatok átvitelére?

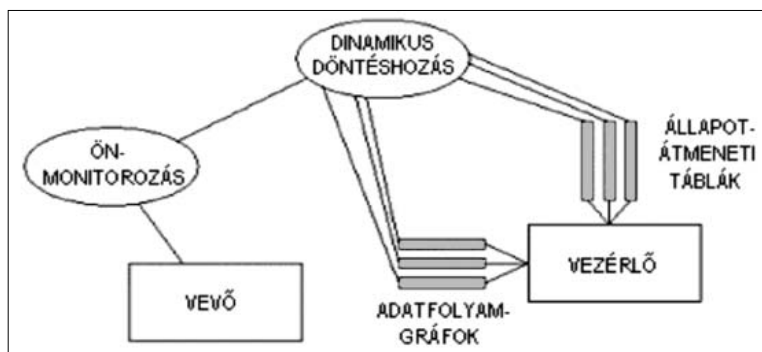
3. Az ön-adaptivitás és a játékelmélet szerepe

A hatékony átvitelt elősegítő fontos tényező lehet az, hogy a környezet pillanatnyi állapotát figyelembe véve, ahhoz legjobban igazodó módon viselkedjen a távközlési rendszer. Emiatt célszerű olyan távközlési szoftvereket alkalmazni, melyek monitorozzák környezetüket, kiértékelik saját viselkedésüket és változtatnak azon, amennyiben a kiértékelés azt jelzi, hogy nem a kívánt módon működik a szoftver, illetve ha jobb funkcionalitás vagy teljesítmény érhető el a változtatás által [2,3].

Általánosan egy ilyen szoftver az 1. ábrán látható, amely a [3]-ban közölt ön-adaptív protokollmodellnek megfelelően viselkedik.

Az ön-adaptivitás azonban annál hatékonyabban vihető véghez, minél több információ áll rendelkezésre az alkalmazkodáshoz. Épp emiatt nem biztos, hogy a hálózati programozásban megszokott, tradicionális protokoll-architektúra a legalkalmasabb az ön-adaptív protokollok számára. Sokkal több információt tudnak sze-

1. ábra
Ön-adaptív protokoll



rezni az egyes protokollok a rétegeken keresztüli tervezés módszerével lehetővé váló lefelé, illetve felfelé irányuló információ-megosztás által. Erről az újabb megközelítésről bővebben [1]-ben olvashatunk.

Ugyanakkor képzeljünk el egy olyan rendszert, melynek erőforrásait minden felhasználója a számára éppen legkedvezőbb módon próbálja használni. Egy olyan kommunikációs rendszerben, melynek minden felhasználói ügynöke önző módon változtathatja meg saját ön-adaptív szoftverének paramétereit saját nyereségének maximalizálása érdekében, rögtön adódik a kérdés: Hogyan találjuk meg a kommunikációs hálózat stabil egyensúlyi pontjait? Egy lehetséges választ erre a kérdésre a játékelmélet területének eredményei adhatnak [4].

Egy általános kommunikációs játék elemei a következők: a játék maga a kommunikáció, a játékosok a kommunikációs ügynökök, akik által választható lehetséges stratégiák az alkalmazott protokollok paramétereinek lehetséges értékei, továbbá kifizetések az adott beállítás által eredményezett valamely kommunikációs tulajdonság(ok) számszerűsítése. Természetesen az egyes játékosok célja a saját kifizetés maximalizálása.

A szituációk nagy részében egy kommunikációs folyamat egyes ügynökei (például egy közös csatornán osztózó felhasználói folyamatok) egymással versengenek saját céljaik minél eredményesebben történő elérése érdekében, a kommunikációs játék ezen esetekben nem kooperatív játék. A nem kooperatív játékok Nash egyensúlyát azon állapotok jelentik, melyekben egyik játékosnak sincs olyan más stratégiaprofilja, mely számára nagyobb kifizetést jelentene, amennyiben a többi játékos stratégiaprofiljai nem változnak. Nash tétele szerint kevert stratégiák esetén minden nem kooperatív játék rendelkezik (legalább egy) Nash egyensúlyi ponttal.

A nem kooperatív kommunikációs játékok esetében célunk, hogy az alkalmazott ön-adaptív távközlési szoftverek találjanak Nash egyensúlyi pontot. (A cikk keretein belül több egyensúlyi pont közül történő választás esetével nem foglalkozunk.)

4. Nem kooperatív kommunikációs játékok

Mielőtt megnézzük, miképpen határozhatjuk meg egy nem kooperatív kommunikációs játék egyensúlyi pontjait, nézzünk néhány konkrét példát ilyen típusú játékokra!

4.1. Véletlen közeghozzáférés ad-hoc vezeték nélküli hálózatokban

Vezeték nélküli ad-hoc hálózatok esetében a hatékony működést segíti elő, ha az egyes állomások tevékenységük során figyelembe veszik környezetük állapotát és dinamikusan alkalmazkodnak ahhoz (self-adaptivity), miközben megfelelően működő hálózatba szerveződnek más eszközökkel (self-organization). Egyre inkább természetessé válik, hogy a mobil távközlési eszközök ezen folyamatot minimális emberi beavatkozással is képesek végrehajtani (self-configuration). Eközben számos problémakörben kell az eszközökben futó szoftvereknek döntést hozniuk.

Az egyik ilyen probléma a közösen használt átviteli közeghez való hozzáférési politika meghatározása. A forgalmazni kívánt eszköz és a hálózat számára is fontos, hogy minél kevesebb ütközés csökkentse a hálózat teljesítményét [5]. Ebben a játékban az egyes ügynökök stratégiáit hozzáférési politikájuk, ütközés esetén történő újradaadási akcióinak paramétereit jelentik. Egyéni céljuk saját kifizetésüknek, az egységnyi adatmennyiségre jutó átviteli idő inverzének maximalizálása lehet. MacKenzie és Wicker a réselt Aloha közeghozzáférési protokollt módosította játékelméleti módszerekkel [6].

4.2. Mobil eszközök energiagazdálkodása

Vezeték nélküli rendszerek esetében rendkívül fontos kérdés az eszközök energiaellátása. Az akkumulátor élettartama folyamán a mobil átvitel ráadásul nem is minden időpillanatban megbízható. Az elektromágneses hullámok esetében fellépő torzító hatások miatt az átviteli csatorna változó jósági paraméterekkel bír. Ez azt jelenti, hogy nem mindegy, mely időpillanatban bocsátjuk ki a csatornára az elküldeni kívánt adatot, mely jellemzően löketszerűen adó üzenetforrásból származik. Erre a szituációra épülő játék esetében az egyes játékosok stratégiáit a rádiókapcsolattól függő átviteli politika jelentheti, míg kifizetéseiket az akkumulátor élettartama alatt sikeresen átvitt bitek számaként számolhatjuk. A cél itt is a saját kifizetés maximalizálása minden játékos esetében.

4.3. Kapacitás-megosztás megfelelő QoS biztosítása mellett

A felhasználói elégedettség minden szolgáltató számára fontos paraméter. Ehhez többek között megfelelő minőséget kell biztosítanunk az átvitel eredménye-

ként. Mindezt úgy, hogy általában egy csatornán több felhasználó adata továbbítódik gyakran véletlen hozzáféréssel, és a hálózatot alkotó eszközök többnyire decentralizált rendszerben működnek. Az átvinni kívánt adatok komplexitása pedig széles skálán mozog, más és más követelményeket támasztva a távközlési rendszerre nézve.

A rendelkezésre álló korlátos erőforrásokat mégis oly módon kell igénybe venniük az egyes ügynököknek, hogy a lehető legjobban megfeleljen a tényleges működés a felhasználók által támasztott minőségi követelményeknek.

Ebben a játékban az egyes ügynökök által választott közeghozzáférési és átviteli sebesség-választási politika jelentősen meghatározza az elérhető maximális kifizetés értékét, amit az elért QoS értékének és annak árának különbségeként kaphatunk.

A távközlés területére felvázolt néhány lehetséges játék mindegyikére igaz, hogy az egyes ügynökök individuális céljait elérni kívánó, önző viselkedése ellenére célunk egy stabil állapot elérése, melyből egyoldalúan egyik ügynöknek sem éri meg kilépni, azaz meg kell határoznunk ezen nem kooperatív játékok Nash egyensúlyát.

5. A Nash egyensúly meghatározása folytonos stratégiájú játékok esetében

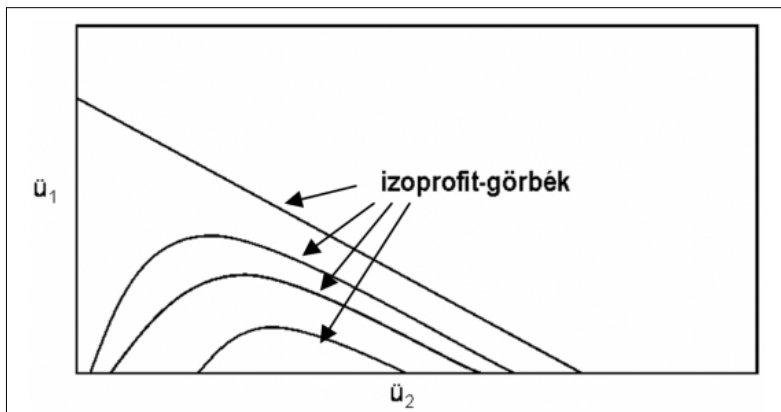
Folytonos stratégiájú játékok esetében az egyes ügynökök végtelen számú akció közül választhatnak egy-

egy döntési pontjukban. Céljuk természetesen saját kifizetésük – mely, mint a játékelméletben megszokhattuk, nem csak az adott ügynök döntésétől, de a többi játékos választásától is függ – maximalizálása. Ilyen körülmények között kell meghatározni a játék egyensúlyi pontját. A problémát – mint sejthető – szélsőérték-feladat alakjában is felírhatjuk, s ennek megoldását keressük [7].

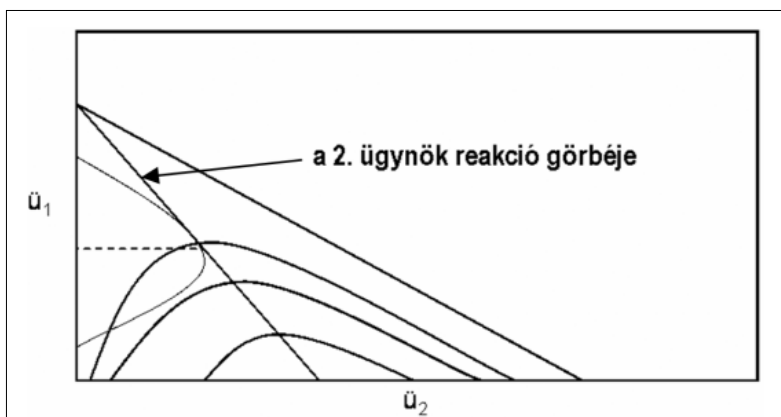
Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban a megoldást tekintjük egy olyan feladat esetében, melyben csupán két játékos szerepel. Első lépésként meg kell határoznunk azt a függvényt, mely az egyes játékosok kifizetését jellemzi a saját, valamint a másik játékos által választott paraméter-érték függvényében. Például a választott paraméter-érték lehet az ügynök által alkalmazott adatátviteli sebesség, míg ebből a profit az így eredményezett átvitel értékének és árának (ami a másik ügynök által választott átviteli sebességtől is függ) különbsége. Amennyiben az egyes ügynökök adott konstans profitszintjeihez tartozó görbéket meghatározzunk, megkapjuk az ügynökök izoprofit-görbéit. A 2. ábra a 2. ügynök lehetséges izoprofit-görbéit ábrázolja.

Mint az látható, az 1. ügynök adott paraméter-választásához a 2. ügynöknek azt a paramétert érdemes választania, mely saját profitját maximalizálja. Ez nem lesz más, mint az 1. ügynök által választott konstans értéket jellemző egyenest érintő izoprofit-görbének a maximumpontja.

Ezt természetesen az 1. ügynök is tudja, azaz tisztában van azzal, hogy bármely választásához a 2. ügynök az érintő izoprofit-görbéjének maximumpontját választja. Ebből adódóan az 1. ügynöknek nincs más te-



2. ábra
A 2. ügynök lehetséges izoprofit-görbéi



3. ábra
Az 1. ügynök stratégiájának megválasztása

endője, mint meghatározni a 2. ügynök izoprofit-görbéinek maximumai által alkotott egyenest (reakció görbe) – mint a 2. ügynök várható választásait összegyűjtő ponthalmazt –, és erre optimalizálni saját választását. A 2. ügynök reakció görbéjének pontjai közül az a pont jelenti az 1. ügynök számára a maximális profitot, melyben a reakció görbe érinti az 1. ügynök valamely izoprofit görbéjét. Ezt a pontot az 1. ügynök izoprofit-görbéit meghatározó egyenletbe behelyettesítve a 2. ügynök reakció-görbéjének egyenlete könnyen kiszámítható (3. ábra).

A leírt módszer jól alkalmazható folytonos stratégiájú nem kooperatív játékok Nash egyensúlyának meghatározására. Ugyanakkor léteznek egyéb helyzetek, melyek megoldására a játékelmélet egyéb területének eredményei lehetnek hasznosak. Versengő felhasználók útválasztása esetén (például autós üldözés) – mivel egy-egy útkereszteződésben véges számú akció közül választhat a felhasználó – a nem kooperatív diszkrét stratégiájú játékok elmélete alapján a visszagöngyölítés módszere hozhat megoldást, míg egy fuvarozási vállalat flottájának valós időben történő, adaptív menedzselésére a kooperatív játékok elméletének eredményei alkalmazhatók jól.

6. Összefoglalás

Látható, hogy a közgazdaság területéről több mint 50 éve elinduló játékelmélet a távközlés területén is jól alkalmazhatónak tűnik.

Cikkünkben néhány lehetséges kommunikációs játék felvázolása mellett a távközlési rendszerekben talán leginkább felhasználható nem kooperatív folytonos stratégiájú játékok Nash egyensúlyi pontjának meghatározására adtunk útmutatást. Mindemellett nem feledkezhetünk meg arról sem, hogy mind a diszkrét stratégiájú játékok, mind a kooperatív játékok elméletének eredményeit a távközlési rendszerek bizonyos körére alkalmazva további eredmények érhetők el a rendszerhatékonyság növelésének irányában.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Dr. Tarnay Katalinnak rendkívül értékes tanácsaiért és útmutatásaiért.

Irodalom

- [1] Zygmunt J. Haas,
„Design Methodologies for Adaptive and Multimedia Networks”,
IEEE Communication Interactive, 39(11),
November 2001.
- [2] P. Robertson, R. Laddaga, H. Shrobe,
„Introduction: The First International Workshop on Self-Adaptive Software”, IWSAS 2000,
Springer-Verlag, New York, 2001.
- [3] Katalin Tarnay,
„Self-adaptive protocol”,
In Self-adaptive Software: Applications,
2nd International Workshop, IWSAS 2001,
Balatonfüred, Hungary, May 2001,
Revised Papers, Vol. 2614, pp.106–112.,
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [4] Roger B. Myerson,
„Game Theory – Analysis of Conflict”,
Harvard University Press, London, England, 1991.
- [5] A. B. MacKenzie, S.B. Wicker:
„Game Theory and the Design of Self-Configuring, Adaptive Wireless Networks”,
IEEE Communications Magazine, November 2001,
pp.126–131.
- [6] A. B. MacKenzie, S.B. Wicker:
„Selfish Users in Aloha: A Game Theoretic Approach”,
Proc. of the IEEE VTC, October 2001, pp.1354–1357.
- [7] H. Scott Bierman, Luis Fernandez,
„Game Theory with Economic Applications”,
Addison – Wesley Publishing Company, Inc.,
Massachusetts, 1993.

Mikrohullámú berendezés-fejlesztés a Totaltel Kft-ben

BENEDEK ANDOR, HAMMER GÉZA, KORMOS LÁSZLÓ, TÓTH TAMÁS, VÁLY LÁSZLÓ

Totaltel Kft.
totaltel@totaltel.hu

Kulcsszavak: mikrohullámú távközlés, állandóhelyű hálózat, hozzáférési hálózat

Cikkünkben a rádiórelé-technika néhány új módszerének ismertetése után bemutatjuk a mikrohullámú berendezések fejlesztésére és gyártására szakosodott Totaltel Kft. új digitális rádióberendezés-családját. Áttekintjük a berendezésfejlesztés kiinduló célkitűzéseit, az ezek megvalósítására alkalmazott megoldásokat és az elért eredményeket.

1. Bevezetés

A régebben rádiórelének, ma inkább állandóhelyű, vagy fix telepítésű vezeték nélküli összeköttetésnek nevezett rendszer, amely legtöbbször a mikrohullámú frekvenciasávban működik, a híradástechnika alapvető eszközei közé tartozik. Múltja 60-65 évre tekint vissza, megjelenése nem sokkal követte a radarét: a második világháború alatt katonai célra kidolgozott mikrohullámú technika alkalmazása a hírközlésben szinte magát kínálta.

Emlékeztet, hogy a rádiórelé rendszerek kezdetben analóg impulzusmodulációval működtek (minthogy az impulzusmodulált radar technikáját így tudták legkönnyebben közvetlenül alkalmazni), de hamarosan kidolgozták a frekvenciaosztású frekvenciamodulált (FDM-FM) technikát is, amely sokkal hatékonyabbnak bizonyult. Ugyancsak emlékeztet, hogy a magyar híradástechnikai kutatás és ipar viszonylag hamar bekapcsolódott az ezzel kapcsolatos tevékenységbe: a BHG, a TKI, az FMV és az Orion nemzetközileg is jelentős kutatási eredményeket és berendezés-gyártást produkált; az egyik első digitális rádiórelé berendezés a világpiacon éppen az Orionból került ki.

Az optikai távközlés megjelenésével a rádiórelé technika fejlődése megtorpant: a nagytávolságú hálózatokban – ahol addig szinte kizárólag rádióátvitelt alkalmaztak – az optikai kábeles átvitel minden műszaki szempontból előnyösebbnek bizonyult; sőt, kétségesse vált, hogy a rádióátvitel (a katonai hírközléstől eltekintve) egyáltalán fennmarad-e. Ez a helyzet hozzávetőleg egy évtizedig állt fenn, úgy 1980-tól 1990-ig.

Gyökeres változás a mobil hírközlés megjelenésével, majd tömegessé válásával következett be. Ennek során egyfelől a rádióhírközlés helye a távközlő hálózaton belül jelentősen megváltozott: a nagytávolságú hálózatban az optika egyeduralma nem csökkent, azonban a felhasználóhoz közelebbi hálózati síkokban a rádióhírközlés vagy az egyedül lehetséges megoldással (mobil hozzáférés), vagy egy igen előnyös alternatívává (fix hozzáférés, transzfer) vált. Másfelől jelentősége korábban elképzelhetetlen mértékben megnőtt. (Zárójelben megjegyezzük: az angol nyelvű irodalomban e

jelentős és lényegbeli változást a név megváltozása is kísérte. A korábban használatos *radio* helyett a *wireless* elnevezés terjedt el általánosan.)

A fix telepítésű rádiórendszerek jelentőségének csökkenése, majd megváltozott szerepének látványos emelkedése időben egybeesett az elektronika tudományának, technológiájának látványos fejlődésével. Így a mai berendezések számos gyökeresen új elemet, megoldást alkalmaznak.

Ebben a cikkben – teljességre nem törekedve – áttekintést adunk az új eredményekről. Majd kissé részletesebben ismertetjük egy hazai fejlesztésű és gyártású berendezéscsalád fejlesztési célkitűzéseit, valamint a megvalósítás műszaki megoldásait.

2. Néhány új módszer fix telepítésű, vezeték nélküli hírközlő berendezésekben

2.1. Digitális megvalósítás

Talán a legmesszebbmenő következményekkel a félvezető technológiának az a fejlődése járt, amely az analóg-digitál (AD) átalakítás pontosságának javítását tette lehetővé. Ez nyitotta meg az utat ahhoz, hogy a nagyfrekvenciás jelek (lineáris és nemlineáris) feldolgozását a korábbi – mondjuk, 20. századi – technikától lényegesen eltérő módon, numerikusan hajtsuk végre. Ehhez a nagyfrekvenciás – elvileg akár rádiófrekvenciás (RF), a mai gyakorlat szerint inkább középfrekvenciás (KF) – jel komplex burkolóját állítják elő, azt mintavételezik, majd digitalizálják; így a jelek számokká válnak, a műveleteket pedig matematikailag, mint mondtuk, numerikusan végzik el. E megközelítés olyan pontosságot tesz lehetővé, amelyet analóg módszerekkel – vagyis a jeleknek a megfelelő áramkörökön való átvitelével – nehezen, vagy ami ezzel egyenértékű, csak igen költségesen lehetne elérni.

A megfelelő (matematikai) műveleteket a digitalizált, mintavételezett komplex burkolón elvégezve, a transzformált számsorozat az igényeknek megfelelő alakban használható fel. Így analóg jellé visszakonvertálva min-

tákként, vagy a mintákból a folytonos alapsávi jeleket előállítva, vagy az analóg mintákból nagyfrekvenciás – KF vagy RF – jeleket előállítva dolgozható fel. (Utóbbival illetve a nagyfrekvenciás jelek mintavételezésével kapcsolatban emlékezzünk arra, hogy a legkisebb mintavételi frekvencia a jel *sávszélességétől*, és nem annak *maximális frekvenciájától* függ – konkrétan legalább a sávszélesség kétszerese. Alapsávi jeleket kapunk a mintasorozatból, ha azt aluláteresztő szűrőn vezetjük át, nagyfrekvenciás jeleket, ha sáváteresztő szűrőn.)

Ezen eszközök, eljárások segítségével létrehozható az, amit „szoftver rádióknak” vagy „át-konfigurálható rádióknak” neveznek. Ha egyszer a jelet numerikusan dolgozzuk fel, a szoftver határozza meg a feldolgozás tartalmát. De akkor egészen különböző szoftverek is állhatnak rendelkezésünkre, szükség szerint változtathatjuk, hogy éppen melyiket használjuk: így a jel sebessége széles határok közt változhat; a modulációk, kódolások, kiegyenlítések, zavar-elnyomások és egyéb funkciók széles választékát valósíthatjuk meg ugyanazzal a berendezéssel. E lehetőségek némelyikét ténylegesen alkalmazzák a szóban forgó – fixen telepített – rádióberendezésekben.

2.2. Vezérelhető átviteli kapacitás

Az előző pontban tárgyalt módszerek lehetővé teszik hogy egy rádióberendezés változó, különböző sebességű jeleket vigyen át. Erre különféle okokból lehet szükség. Egységesebbé lehet tenni a gyártmányválasztékot – bár ez távolról sem a legfontosabb felhasználás; mód nyílik egy telepített hálózat kapacitásának növelésére. Ennél is valószínűbb: a forgalom napszaktól is függ, munkaidő alatt a vállalati felhasználók generálnak nagyobb forgalmat, munkaidőn kívül az otthonok, a magán felhasználók. Mindezek, főleg az utóbbi igényelheti a változó, vezérelt átviteli kapacitást.

Szoftver rádiót alkalmazva az órafrekvencia, a kódolás, a moduláció (ezek együttesen határozzák meg a sávszélességet), a szűrők karakterisztikája, a kiegyenlítők beállíthatók illetve távvezérelhetők.

2.3. Interfész-választék

A klasszikus rádiórendszerek általában két nagy osztályba: kis- és közepes kapacitású PDH, és nagy kapacitású SDH rádió-berendezések osztályába sorolhatók. Ezek mindegyike az ITU-T G.703 ajánlás aktuális sebességhez tartozó interfészét alkalmazza, amelyek megfelelőek a hagyományos végberendezések (PCM multiplexer, digitális központ) csatlakoztatására. Az Internet terjedésével megjelent az igény LAN-ok (tipikusan Ethernet LAN-ok) közötti kommunikáció megvalósítására. Ehhez közbenső eszközökre, a kétféle interfészt illesztő média-konverterekre volt szükség.

Minthogy az Internet-átviteli képesség iránti igény, különösen ennek sebességével kapcsolatban fokozódik, egyre több, közvetlen Ethernet csatlakozást biztosító berendezés jelenik meg. A hagyományos és Ethernet típusú végberendezések együttélése miatt többféle típusú interfész egyidejű alkalmazása, és a rádiócsa-

torna rendelkezésre álló sávszélességének megosztása ezek között, reális igény és lehetőség. Ilyen módon, sok esetben hatékonyabb frekvenciafelhasználás biztosítható, mint különböző külső illesztő egységek alkalmazásával.

3. A Totaltel TDR-F berendezéscsaládja

3.1. Előzmények

A magyar mikrohullámú ipar kialakulása az 1950-es években kezdődött, két egymástól független fejlesztőhelyen: a BHG-ban és a Távközlési Kutató Intézetben (TKI). Az előbbit Uzsoki Miklós, az utóbbit Bognár Géza és Csibi Sándor neve fémjelzi. A BHG-beli fejlesztő gárda később az Orion-ba került, ahol kidolgozták az első hazai digitális mikrohullámú berendezéseket. A TKI elsősorban az analóg FDM-FM berendezések fejlesztése terén ért el jelentős eredményeket, a digitális rádiók fejlesztésébe – bár ezen a téren is folytak kutatások – intenzív módon csak később kapcsolódott be.

A berendezés-fejlesztés terén elért eredményeket jól jelzik az egyes témakörök művelői által írt monográfiák [1,2]. A digitális rádióberendezések fejlesztésében elért eredmények azonban a valaha nagy gazdasági sikereket produkáló iparvállalatoknak a nyolcvanas évek végén bekövetkezett rendszerváltással járó elsorvadása miatt nem válhattak terméké. Ebben a folyamatban a szocialista ipar általános működési jellemzői mellett objektív és szubjektív személyes okok is közrejátszottak (mint például a TKI-beli fejlesztés meghatározó személyisége, Róna Péter és nem sokkal később Szabó Zoltán 1989-ben bekövetkezett váratlan halála).

A fejlesztői kultúra megőrzése és továbbfejlesztése céljából alapítottuk meg 1991-ben a Totaltel Kft-t, melynek gerincét a TKI akkori vezető mikrohullámú berendezésfejlesztői alkották. Az így létrejött kisvállalkozás lehetőségeit természetesen erősen meghatározták a rendelkezésre álló erőforrások: a kis létszám, az eszközök teljes hiánya és a környezeti légkör. Ez utóbbit két egymással ellentétes tendencia jellemezte: egyrészt a szűkebb szakmai közösség jóindulatú támogatása, másrészt a volt kollégák egy részének ellenséges magatartása. A kezdeti nehézségeket a Totaltel kollektívájának sikerült legyőznie, részben saját áldozatkészsége révén, részben az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság és más szervek pályázatainak elnyert támogatás segítségével.

1991-92-ben megjelentek a TDR (Totaltel Digitális Rádióberendezések) család első, 15 és 23 GHz-es sávú tagjai, amelyeket később 5, 13, 18 és 38 GHz-es változatok követtek. Ezek a berendezések 2-34 Mbit/s sebességű átvitelt biztosítottak robusztus 4FSK moduláció alkalmazásával. A berendezések osztott kivitelűek, beltéri és az antennával egybeépített kültéri részből állnak, ilyen módon az előállított mikrohullámú teljesítmény veszteség nélkül, teljes egészében kisugározható. Digitális áramkörök FPGA technológián vannak megvalósítva. A TDR berendezésekből ezres nagyságrendű gyár-

tási széria készült, nyilvános és magánhálózatokban egyaránt alkalmazásra kerültek. A számos projekt közül a legnagyobb volumenűek: a Matáv Motorola RLL-rendszerében való részvétel, a Magyar Honvédség fix telepítésű hálózatának kiépítése [3], a PanTel, az Antenna Hungária és az NIIF hálózataiba történő szállítások, valamint regionális hálózatok, mint például az APEH vagy a Felső-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság magánhálózatának létrehozása emelhető ki.

3.2. Az új berendezéscsaláddal kapcsolatos célkitűzések

A 2000-es évek elején új, a korábbinál számos szempontból korszerűbb berendezéscsalád kifejlesztését határoztuk el. A legfontosabb követelményként a berendezések rugalmas alkalmazhatóságát fogalmaztuk meg, ezért a család a TDR-F (F, mint Flexibilis) nevet kapta.

A berendezéseket a TDR család gyártási és alkalmazási tapasztalatai alapján, ahhoz képest lényegesen jobb paraméterekkel és szolgáltatásokkal terveztük megvalósítani. Általános célként a konkurens berendezésekkel versenyképes, gazdaságosan gyártható és alkalmazható berendezések fejlesztését tűztük ki.

A műszaki követelményeket konkrétan a következő célokban fogalmaztuk meg:

- a berendezések osztott kivitelűek, kültéri és beltéri egységük között egyetlen koaxiális összekötő kábelrel;
- a berendezések kültéri egysége az átvitt jelek típusától és az átviteli kapacitástól független;
- a beltéri egység független az alkalmazott kültéri egység frekvenciasávjától;
- a berendezések kisebb és nagyobb állapotszámú modulációval (kisebb és nagyobb frekvenciahatékonysággal) egyaránt működnek;
- a berendezések átviteli kapacitása elektronikus úton változtatható;
- egy adott frekvenciasávú kültéri egység minimális számú törésváltozáttal fedi le a teljes sávot;
- a kültéri egység csatornafrekvenciája és adóteljesítménye elektronikusan változtatható (RFC és RTPC, távoli frekvencia és adóteljesítmény vezérlési funkció);
- a berendezések átviteli minőségi jellemzői lényegesen felülmúlják az ETSI szabványokban előírt minimális követelményeket;
- a berendezés a hagyományos G.703 E1 és E3 csatlakozások mellett, Ethernet interfészen közvetlen LAN-LAN kapcsolatra is alkalmas;
- a berendezések központi helyről menedzselhetők mind SNMP protokollt alkalmazó rendszerben, mind a TDR berendezésekkel kompatibilis módon;
- a konstrukció és az alkalmazott technológiák gazdaságos gyártást és nagy megbízhatóságot garantálnak.

3.3 A célkitűzéseket megvalósító műszaki megoldások

Az előző pontban részletezett követelmények teljesítésére a következő megoldásokat terveztük és valósítottuk meg.

Modulátor és demodulátor

A berendezések modulációs rendszeréül kvadratúra amplitúdómodulációt (QAM) választottunk. A középfrekvencián működő és digitális jelfeldolgozást alkalmazó univerzális modulátor és demodulátor 4...128 állapotú működésre alkalmas 20 Msymbol/s maximális szimbólumsebesség mellett. A modem ilyen minőségű működését az alkalmazott A/D és D/A konverterek, valamint az FPGA technológiában megvalósított DSP biztosítja. A modem $\alpha=0,4$ lekerekítési tényezőjű emelt cos karakterisztikájú átviteli csatornát realizál. Ilyen módon például egy 28 MHz sáv szélességű csatornán 40...140 Mbit/s aggregált bitsebességű jelet képes továbbítani. A moduláció állapotszáma és sebessége elektronikusan változtatható.

A modem ilyen jellemzői képezik az alapját az átviteli kapacitás változtathatóságának. A modemnek része az átviteli út esetleges torzításait kompenzáló adaptív időtartománybeli kiegyenlítő is.

Mikrohullámú aktív áramkörök

A moduláció állapotszámának növelése egyre szigorúbb követelményeket támaszt az adóteljesítményt előállító fokozatok, különösen a mikrohullámú végerősítő linearitásával és a középfrekvenciáról a mikrohullámú sávba illetve vissza transzponáló lokáljelforrások fáziszajával szemben. Ezen követelmények kielégítése kiváltképpen a milliméteres sávokban okoz nehézséget, minthogy ott az elérhető adóteljesítmény limitált, illetve a magas frekvencia miatt a kis fáziszaj követelménye csak különleges tervezéssel biztosítható.

A szükséges adóteljesítmény előállítására a technika mai szintjén az alacsonyabb mikrohullámú sávokban GaAs FET-ek, a magasabb, milliméteres hullámsávokban GaAs alapú MMIC-k (monolitikus mikrohullámú integrált áramkörök) állnak rendelkezésre. Az ezekkel elérhető teljesítményeket a QAM rendszerek nem használhatják ki, a teljesítmény-eszközök a telítési teljesítményükhöz képest csak alulvezéreltséggel (backoff) használhatók. A nagy kivezérléseknél fellépő nemlinearitásnak kétféle káros hatása van: egyrészt a modulátor által előállított sávkorlátos jel spektrumát kiszélesíti, másrészt a moduláció konstellációs képének torzítása által az átvitel teljesítőképességét rontja.

Minthogy a korszerű rendszerekben alkalmazott hibajavító kódolás az utóbbi hatást jelentékenyen csökkenti, a lényeges követelményt a spektrális jellemzőket meghatározó spektrum-maszk előírások jelentik. Ezek kielégítésére az általánosan elérhető MMIC-áramkörök esetén 4-16 QAM üzemmódban a teljesítmény-fokozatokat legalább 1-6 dB backoff-fal kell jártni. Ez konkrétan a 18-23-38 GHz-es sávokban 20, illetve 15 dBm adóteljesítményt jelent 4 QAM, illetve 16 QAM moduláció esetén. Minthogy az állapotszám további növelése még nagyobb adószintcsökkentést kívánna, a rendszerben alkalmazható maximális szintű modulációt 16 QAM-re korlátoztuk.

A nagy állapotszámú moduláció alkalmazása a rendszerben szükséges kis fáziszajú szintetizált lokáljelfor-

rásokra is komoly követelményeket ró. A gazdaságos megvalósítás érdekében ezért a berendezések adó-vevőiben közös lokállandósítást alkalmazunk.

Szélessávú megoldások

A FET- és MMIC-alapú mikrohullámú áramkörökkel széles sávú, adott esetben a teljes kommunikációs sávot átfogó aktív áramkörök: tükrölnyomásos keverők, kiszajú erősítők, teljesítményerősítők realizálhatók. Egy-egy mikrohullámú berendezés alkalmazási frekvenciasávjának szélességét az adás-vételt szétválasztó és a jelek fel- és letranszponálásához szükséges sávszűrők realizációs problémái korlátozzák. Hogy ez a sáv szélesség minél nagyobb legyen, mind adás-, mind vevőoldalon kettős keverést és magas, 1,5-3 GHz közötti középfrekvenciákat alkalmazunk. Az egyes berendezés-törésváltozatok sáv szélességét meghatározó mikrohullámú szűrők így kis veszteséggel realizálhatók. Ilyen módon elérhető, hogy egy-egy kültéri egység-törésváltozat a milliméteres sávokban a teljes sáv felét, az alacsonyabb sávokban, ahol az adási és vételi frekvenciák távolsága (DS, duplex távolság) kisebb, a sáv harmadát átfogja.

Vezérelhető mikrohullámú jellemzők

A szintetizált lokáljelforrások és a KF- és RF fokozatokban alkalmazott szabályozókori elemek lehetővé teszik mind a csatornafrekvencia, mind az adóteljesítmény távvezérléssel történő beállítását. Az adóteljesítmény szabályozásával ezen túlmenően ATPC (automatikus adóteljesítmény szabályozás) funkciót is megvalósítottunk. Ennek révén normál terjedési viszonyok mellett, tehát az idő nagy százalékában az adó leszabályozott, kis teljesítménnyel működik, ezáltal a környezetre gyakorolt zavaró hatás csökken, ugyanakkor a jobb linearitás kedvezőbb átviteli minőséget eredményez. Hullámterjedési okokból bekövetkező szintcsökkenés, fading esetén az automatikusan a névleges szintre emelt adóteljesítmény a csatorna előírt megbízhatóságát garantálja.

A forgalmi csatornák rugalmas multiplexálása

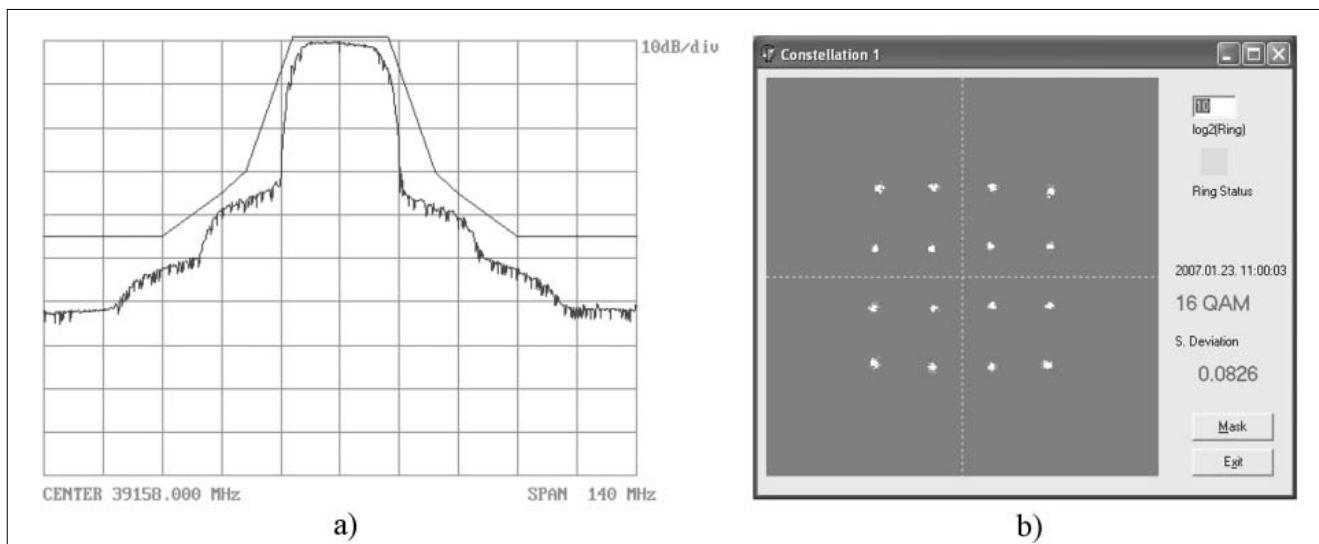
A berendezésekben a különböző átvinni kívánt jeleket (E1, E3 és Ethernet) egyetlen lépésben multiplexáljuk az átvitelre alkalmas soros bitfolyamba, amelyben a fenntartási információt hordozó segédjelek és a hibajavító kódolás redundáns bitjei is helyet kapnak. Az így előállított rádió-keretben az egyes időrések és forgalmi csatornák összerendelésével, illetve az összerendelés megváltoztatásával a rádiócsatorna rendelkezésre álló sáv szélességét dinamikusan oszthatjuk meg a forgalmi csatornák között. Ezáltal mind a rendszer kapacitása, mind a kapacitás egyes forgalmi csatornák közötti megosztása elektronikusan változtatható. Említésre érdemes, hogy a HDLC keretekbe ágyazott Ethernet keretek továbbítása nagyobb hatékonysággal történik, mint a hagyományos Ethernet-E1 vagy Ethernet-E3 átalakítók esetén, például a 16 E1 csatorna helyén továbbított Ethernet keretek RFC 2544 szerint mért maximális át-eresztőképessége (throughput) megközelíti a 40 Mbit/s értéket.

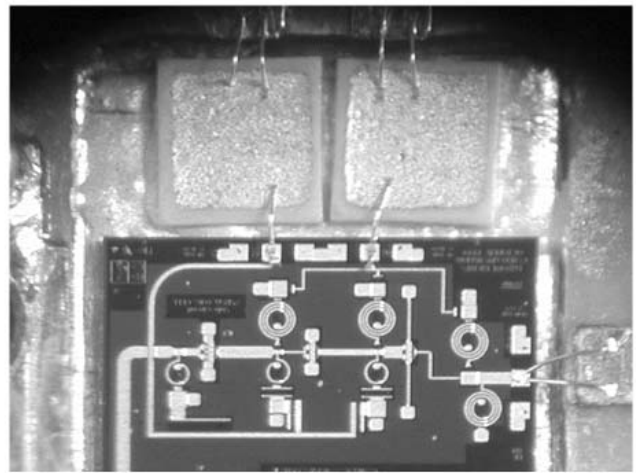
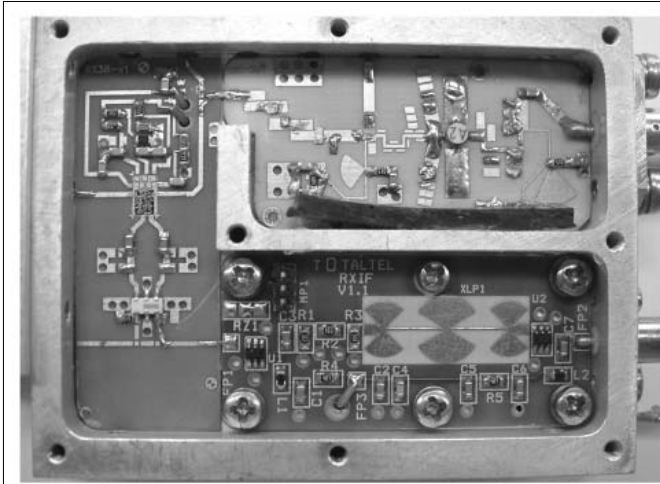
A rendszer felügyeleti funkciói és szoftverei

A rendszer belső állapotainak üzem közbeni figyelésére, diagnosztikai célokra számos olyan készséget építettünk be, amelyek lehetővé teszik bármilyen, rendszeren belüli vagy kívüli forrásból származó hiba vagy zavartatás esetén, a hiba jellegének feltárását a hatékony ellenlépések megtétele céljából. Erre a célra beépített, üzem közbeni bithibaaarány-mérés, a modulátor konstelláció-képének, a vett jel spektrumának üzem közbeni megfigyelése és teszt-hurkok állnak rendelkezésre. A berendezések sokféle információt szolgáltatnak az aktuális állapotokról (adó- és vevőszintek, egységek hőmérséklete, egységek típusa és sorozatszáma stb.), illetve regisztrálják és tárolják az átviteli minőségre vonatkozó paraméterek értékét és időstatisztikáit.

A berendezések állapotjelzőinek kiolvasását illetve a berendezések konfigurálását a rendszer beépített menedzsment-rendszere biztosítja, mely egyaránt lehető-

1. ábra TDR-F 38 berendezés
a) adó spektrum, b) demodulátor konstelláció





2. ábra Mikromodul és MMIC wire bonding technológiával

vé teszi a kezelést a hálózat valamely állomásáról, vagy centralizált hálózatfelügyeleti központból. A távfelügyeleti funkciók választhatóan szabványos SNMP protokoll-alapú működéssel, vagy a hazai hálózatokban több helyen is alkalmazott MX-MSS rendszerrel érhetők el.

Az 1. ábrán illusztrációképpen bemutatjuk egy 38 GHz-es rádiószakasz adó kimeneti spektrumát, a rá vonatkozó ETSI-maszkkal, 15 dBm névleges adóteljesítmény mellett, valamint a demodulátor konstellációs ábráját. A berendezés aktuális beállításában 32E1 csatorna, vagy két E3 és két E1 csatorna, vagy ezek egy részének és egy LAN-LAN kapcsolat Ethernet-jelének egyidejű átvitelét biztosítja.

Konstrukciós és technológiai jellemzők

A berendezések kültéri egységének konstrukciója kis méreteket és nagyfokú flexibilitást biztosít. Az alacsonyabb mikrohullámú sávokban a berendezés mikrohullámú áramkörei egyetlen modulban, a milliméteres sávokban egy-egy adó- vagy vevő részáramkört tartalmazó mikromodulokban vannak megvalósítva.

A milliméteres mikromodulok GaAs lapkákon realizált MMIC áramkörei termokompressziós kötéssel (wire bond-

ing) vannak a befogadó mikroszalagvonalas áramkörök-höz csatlakoztatva, az ehhez szükséges technológiát az utóbbi években honosítottuk meg.

Ilyen áramkör mikroszkópi képét mutatja a 2. ábra. Az antennával integrált teljes kültéri egység és beltéri egység (1+0 és 1+1 kivitelű) képe a 3. ábrán látható.

A beltéri berendezésben alkalmazott, FPGA-ban realizált DSP megoldások nagyfokú reprodukálhatóságot és kiváló minőségi jellemzőket eredményeznek.

Alkalmazási változatok

A beltéri egység konstrukciója lehetővé teszi a különféle interfészek cserélhetőségét és vegyes alkalmazását. A berendezés egy-egy – a benne elhelyezett interfész-egységek által megszabott – kiviteli változatában is számos alkalmazási változatot nyújt, a megfelelő kapacitás-kiosztás szoftveres konfigurációja útján.

A beállítható üzemmódokból példaképpen bemutatunk néhányat a következő oldali táblázatban, amely az egyes üzemmódokban egyidejűleg továbbítható G.703 (E1 vagy E3) csatornák számát és az Ethernet-kereteket hordozó bitfolyam sebességét mutatja. A táblázatból az is látható, hogy hogyan lehet a sávszélesség-

3. ábra TDR-F berendezés kültéri és beltéri egységei



csatorna sáv- szélesség	moduláció	lehetséges átviteli kapacitások			rendszerérték @ 10 ⁻³ BER	
		E1 csat.	E3 csat.	Eth. Mbit/s	13 GHz	38 GHz
28 MHz	4 QAM	1 16 12	1 – –	– – 11	108 dB	102 dB
14 MHz	16 QAM	8 4 –	– – –	19 27 37	99 dB	93 dB
28 MHz	16 QAM	2 32 24 20 16 1 –	2 – – – – 1 –	– – 23 31 39 37 74	96 dB	90 dB

Beállítható üzemmódok, az egyes üzemmódokban egyidejűleg továbbítható csatornák száma és az Ethernet-kereteket hordozó bitfolyam bitsebességei

hatékonyságot a teljesítmény-hatékonyság árán növelni, ami módot ad az adott alkalmazásban szükséges optimum elérésére.

A berendezés beltéri egységének 1+1 tartalékolt kiviteli változata beállíthatóan melegtartalékolt, frekvencia- vagy térdiverziti üzemmódot biztosít.

4. Összefoglalás

Cikkünk bemutatta a Totaltel Kft által kifejlesztett TDR-F flexibilis digitális mikrohullámú berendezéscsaládot. A berendezések mellett, hogy bármilyen piacon való megmérettetésre alkalmasak, a bevezetett megoldások továbbfejlesztésével számos további alkalmazás (újabb frekvenciasávok, más működési módok stb.) kidolgozásának alapját képezhetik.

Az elért eredmények a Totaltel fejlesztő kollektívájának eredményei. Az írás nem lenne teljes a résztvevők; Bakos Gyula, Béres Vilmos, Csánki Ferenc, Geleji Vilmos, Gyenes Imre, Kovács Gábor, Kovács Vendel, Nemcsics Elek, Tóth Ferenc, Vymeták József és Zakariás László felsorolása nélkül.

Irodalom

- [1] Frigyes István, Szabó Zoltán, Ványai Péter: Digitális mikrohullámú átviteltechnika, Műszaki Könyvkiadó, 1980.
- [2] Róna Péter: Analóg rádiórelé berendezések, Műszaki Könyvkiadó, 1983.
- [3] Kovács Attila: A Magyar Honvédség mikrohullámú hálózatának átalakítása, Haditechnika, 2003. November, pp.27–28.

Tájékoztató a Híradástechnika szerzőinek

A Híradástechnika szerkesztőbizottsága szeretné, ha egyre több szerzője lenne különböző területekről, így tovább bővülne az újságban megjelenő témák köre, és változatosabbá válna az eltérő szemléletű szerzők gondolatvilágától. Leendő szerzőink számára a cikkírással kapcsolatban szeretnénk néhány tájékoztató gondolatot közölni:

• **Témák:** A lap profilja egyfelől felöleli a távközlés „klasszikus” műszaki témaköreit, továbbá az informatika távközléshez, kommunikációhoz kapcsolódó vonatkozásait, a média-technológiák és média-kommunikáció kérdéseit, ezzel is elősegítve a távközlés-informatika-média konvergenciájának folyamatát. Másfelől helyet adunk a távközléshez és média-kommunikációhoz kapcsolódó gazdasági, szabályozási, marketing, menedzsment témáknak és a távközlés-informatika-média társadalmi vonatkozásainak is.

• **Terjedelem:** A szakmai cikkek az újságban általában 4-8 oldal terjedelemben jelennek meg. Ennél rövidebbek inkább csak a hírek vagy beszámolók lehetnek. 8-10 oldalnál hosszabban pedig csak olyan alapvető újdonságok írhatók le, ahol a megértéshez az elméleti alapok és a gyakorlati megvalósítás egyaránt szükséges. Ez azt jelenti, hogy ábrák nélkül 12-20 ezer karakter lehet egy cikk szövege. Nyomtatott oldalanként max. 1-3 ábra elhelyezése teszi az olvasó számára áttekinthetővé, vonzóvá az ismertetést.

• **Forma:** Sem betűtípus, sem rajzkivitel nem köti a szerzőket. Az újság egységessége kedvéért ugyanis az elektronikus érkező szövegeket a layoutban használt betűtípusban dolgozzuk fel. A cikkeket minden esetben elektronikus formában is kérjük, tehát e-mailen, vagy lemezen. A szövegeket *word formátumban* kérjük elkészíteni. Az ábrák megrajzolásánál egyetlen köztétel, hogy az újság *fekete-fehér kivitelben* jelenik meg, így a színes ábrák is szürkeárnyaltos képként lesznek láthatók az oldalakon. Ennek megfelelően kérjük a szerzőket, hogy lényeges dolgokra ne hivatkozzanak úgy, hogy a piros vonal, vagy a kék alapterületű rész, ehelyett szaggatott, pontozott, vastag és vékony vonalak legyenek megkülönböztethetők, illetve a területnél sraffozással lehet különbséget tenni. Fotóillusztrációk esetén lehetőség szerint nyágfelbontású, külön képfájlokat is kérünk.

• **Szerkezeti elvárások:** A cikk kötelező részei a Bevezetés (első fejezet) és az Összefoglalás (utolsó fejezet). A bevezetésben a szerzők röviden ismertessék a téma hátterét, a cikk fő mondanivalóját és azt, hogy a további részekben miről lesz szó. A cikkhez csatolni kell egy rövid, néhány mondatos tartalmi összefoglalót magyar és angol nyelven, továbbá meg kell adni néhány jellemző kulcsszót is, szintén magyarul és angolul. A cikk

végén kérjük a kapcsolatos, vagy előzményként felhasznált publikációkat megadni. A hivatkozásokat szögletes zárójelben számozzuk, amely után következik a szerző, majd a cikk vagy a könyv címe, a megjelenés helye és időpontja.

• **Lektorálás:** A cikkek különböző minősítési folyamatoknál értékes pontokat jelenthetnek. Az új eredményeket tartalmazó cikkeket a szerkesztőség bíraltatja. A bírálók véleménye alapján a cikket visszaadhatjuk a szerzőnek javításra, esetleg átdolgozásra. Minden félév végén az azt megelőző öt számból kiválogatjuk azokat a cikkeket, melyek a külföldi, nem magyar anyanyelvű olvasók számára is érdekesek lehetnek. Ezeket angolra fordítva az 1. és 7. számban „Selected Papers” címen jelentetjük meg, ami idegen nyelvű publikációnak számít.

• **Megjelenés:** A folyóirat minden hónap végén jelenik meg. A pontos időpont függ az ünnepektől és a hétvégek helyzetétől. Mindig az előző hónap utolsó napjáig végleges változatban beérkezett cikkeket vesszük számításba. Tematikus megfontolásokból előfordulhat, hogy egy későbbi számban előnyösebbnek látszik az adott téma tárgyalása. Általában a beküldést követő negyedévben helyet kap a munka az újságban. Kérés esetén az átnézés vagy lektorálás után a beküldéstől számított két héten belül a szerző visszaigazolást kaphat a cikk elfogadásáról.

• **Szerzői adatok:** Annak érdekében, hogy az olvasók problémáikkal, véleményükkel közvetlenül kapcsolatba léphessenek a szerzőkkel, a cikk előtt lévő szürke részben (a cím alatt) szerepel nevük, munkahelyük és e-mail címük. Célszerű tehát, hogy a cikkeket úgy küldjék be, hogy a felsorolt adatokat, valamint a szerzők telefonos elérhetőségét tartalmazzák. Ez utóbbi a szerkesztés, illetve a lektorálás közbeni esetleges kérdések tisztázásához elengedhetetlen.

• A beküldés módja:

A cikkek eljuttathatók a főszerkesztőhöz:

Szabó Csaba Attila

(BME, Híradástechnikai Tanszék, szabo@hit.bme.hu)

vagy a HTE titkárságára:

Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület

(Bp., Kossuth L. tér 6-8. IV.emelet, info@hte.hu).

Reméljük, hogy ezen ismeretek segítik kollégáinkat, hogy gondolataikat, új eredményeiket, műszaki megoldásaikat, számítási módszereiket közkinccsé tegyék. Várjuk tehát a cikkeket az oktatási intézményekből, fejlesztőhelyekről, gyártóktól, üzemeltetőktől, tanulóktól, szakértőktől, oktatóktól és mindenkitől, akinek mondanivalója van a közösség számára.

A Szerkesztőbizottság

Traffic adaptive protection networks

Keywords: adaptive, shared, protection, resilience, rearrangement

The bandwidth requirements of modern integrated networks solidly grow, and at the same time the reliability plays an increasingly important role. Various methods are known and under development to ensure survivability. Our methods deal with this issue. The main feature of the proposed protection rearrangement framework is that since the protection paths do not carry any traffic until a failure occurs they can be adaptively rerouted (rearranged) as the traffic and network conditions change.

Comparative cost analysis of optical transport architectures

Keywords: dynamic optical networks, ASON/GMPLS, CAPEX model

Cost-effective network architectures designed for serving a dominant IP client are essential for telecom service providers. It is a critical decision when and under what conditions the move to optical architectures is feasible. The cost models presented in the paper are based on simple traffic analyses and can help making these decisions. The different analytical models are compared and checked by simulation examples.

Multicast and traffic grooming in multilayer networks

Keywords: optical multicast, WDM, ILP

The papers deals with the efficiency of multicast traffic routing in optical WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks. Costs of unicast and multicast routing are compared. A new wavelength graph model is introduced to represent switching devices that are capable of pure optical branching. Good scalability of multicast is shown. Technical requirements are described by ILP and realized in a simulator.

Virtual auditory and binaural technology

Keywords: virtual reality, localization, binaural, headphone

Up-to-date virtual reality simulators include the simulation of visual, auditory and tactical aspects. The creation of a virtual auditory display using headphones corresponds to an authentic mapping between the simulated and the real sound field. Sound sources are spatially distributed by simulating the directional information. The most important parameter is the localization and the localization blur. The binaural technology includes the definitions, measurement techniques and systematic simulation of such signals using two-channel transmission. This paper presents the basic methodology for recordings, playback and evaluation of binaural signals focusing on headphone playback.

A possible role of game theory in telecommunications

Keywords: self-adaptive agent, stability, game theory, Nash-equilibrium

Game theory is widely used in economics for more than 50 years. Nowadays more and more sciences apply its results. For the improvement of telecommunication systems' performance the elements of the system should adapt to the environmental changes. However if competitive user agents did it in selfish way, the whole system may loose its stability. In my paper I introduced some problems of telecommunication where the results of game theory could be applied to find the Nash equilibrium of the system and I gave a method for it in the case of non-cooperative games with continuous strategy.

Totaltel's microwave equipment developments

Keywords: microwave telecommunication, fixed network, access network

Following the presentation of some new methods of the radio-relay techniques the paper introduces the new digital radio equipment family of Totaltel Ltd., a company specialized to develop and manufacture microwave equipment. A survey of the main starting objects of the development as well as solutions and results are given.

