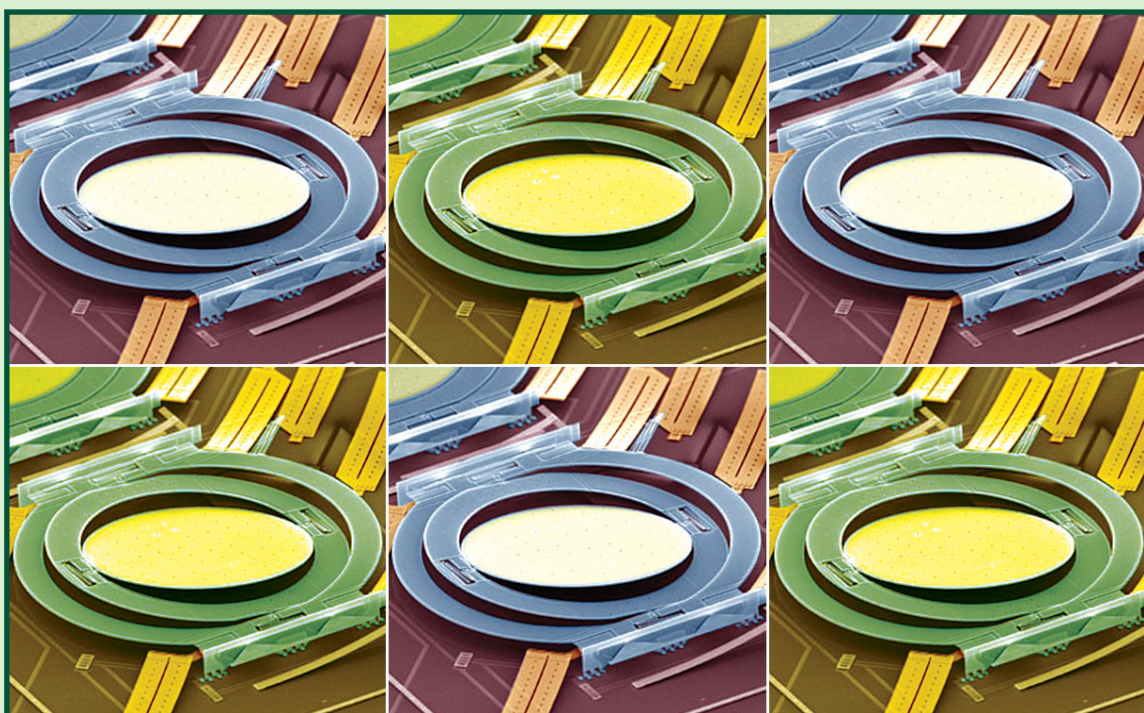


híradástechnika

VOLUME LIX.

2004/2

Február



Optikai aktív eszközök és hálózatok

Fénytváközlési berendezések

Hálózati technológiák, protokollok

A Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület folyóirata

Tartalom

Dr. Lajtha György, Dr. Zombory László

ÚJ ÉV, MEGÚJULT FOLYÓIRAT

1

Paksy Géza

A VENDÉGSZERKESZTŐ BEVEZETŐJE

2

OPTIKAI AKTÍV ESZKÖZÖK

Várallyay Zoltán, Jakab László, Richter Péter, Varga Gábor

Ritkaföldfémekkel adalékolt optikai szálerősítők és számítógépes modellezésük

3

Marozsák Tamás

VCSEL-ek alkalmazása és modellezése direkt modulált optikai összeköttetésekben

8

Kovács Gábor

Hullámhossz konverzió megvalósítása félvezetős optikai erősítők felhasználásával

15

FÉNYTÁVKÖZLÉSI BERENDEZÉSEK

Jeszenői Péter

40 Gbit/s-os átviteli rendszerek alkalmazhatósági kérdései

19

Kovács Attila, Deme Ildikó

Segédvívös címzésű, csomagkapcsolt optikai router

25

HÁLÓZATI TECHNOLÓGIÁK, PROTOKOLLOK

Frigyes István

Kódosztás az optikai távközlésben

28

Deme Ildikó, Kovács Attila

Hullámhossz-osztásos, csomagkapcsolt optikai hálózatok

37

Szigeti János, Tapolcai János, Rétvári Gábor, Láposi Levente, Cinkler Tibor

Útvonalkijelölés és forgalomelvezetés több tartományú kapcsolt optikai hálózatokban

42

OPTIKAI HÁLÓZATOK

Lakatos Zsolt

Automatikusan kapcsolt optikai hálózatok

50

Andreas Antonopoulos

Fejlődési trendek az optikai hálózatok piacán

60

Címlap: A MEMS mikrotükrök lehetnek a Vezérelt Optikai Rendezők optikai kapcsolói (Forrás: www.lucent.com)

Főszerkesztő
ZOMBORY LÁSZLÓ

Szerkesztőbizottság
Elnök: LAJTHA GYÖRGY

BARTOLITS ISTVÁN
BOTTKA SÁNDOR
CSAPODI CSABA
DIBUZ SAROLTA

DROZDY GYŐZŐ
GORDOS GÉZA
GÖDÖR ÉVA
HUSZTY GÁBOR

JAMBRIK MIHÁLY
KAZI KÁROLY
MARADI ISTVÁN
MEGYESI CSABA

PAP LÁSZLÓ
SALLAI GYULA
TARNAY KATALIN
TORMÁSI GYÖRGY

Új év, megújult folyóirat

lajtha.gyorgy@ln.mata.v.hu, zombory@mht.bme.hu

Minden év vége és új év kezdete alkalom a számvetésre a múlttól, és a jövőre vonatkozó elképzelések végiggondolására.

Az elmúlt évben a Híradástechnika az előzőekben lefektetett elvek, elképzelések alapján működött. A számok két-három tematikus blokkot tartalmaztak, úgy, hogy mindegyik blokk néhány azonos témájú cikket gyűjtött össze. A válogatás úgy történt, hogy a blokk cikkei együtt lehetőleg széles áttekintést és mégis árnyalt képet adjanak a témáról. A szerkesztés igyekezett figyelemmel lenni arra is, hogy a folyóirat olvasóinak szűk szakmai területei nagyon eltérőek a körüljárt témától. Ennek ellenére – vagy éppen ezért – a blokkok lehetőség szerint különböző szintű cikkeket tartalmaztak, hogy minden olvasó találjon érdeklődésének megfelelő és ismereteihez kapcsolódót.

Minden lapszámban van néhány olyan cikk, amelyik nem csatlakozik az említett blokkokhoz. Ezek összességükben általában egy-egy, a szakmához kapcsolódó, de nem szűken szakmai kérdést ismertetnek. Ez lehet gazdasági, társadalmi, szakmatörténeti, pedagógiai és még számtalan egyéb indíttatású hosszabb-rövidebb értekezés.

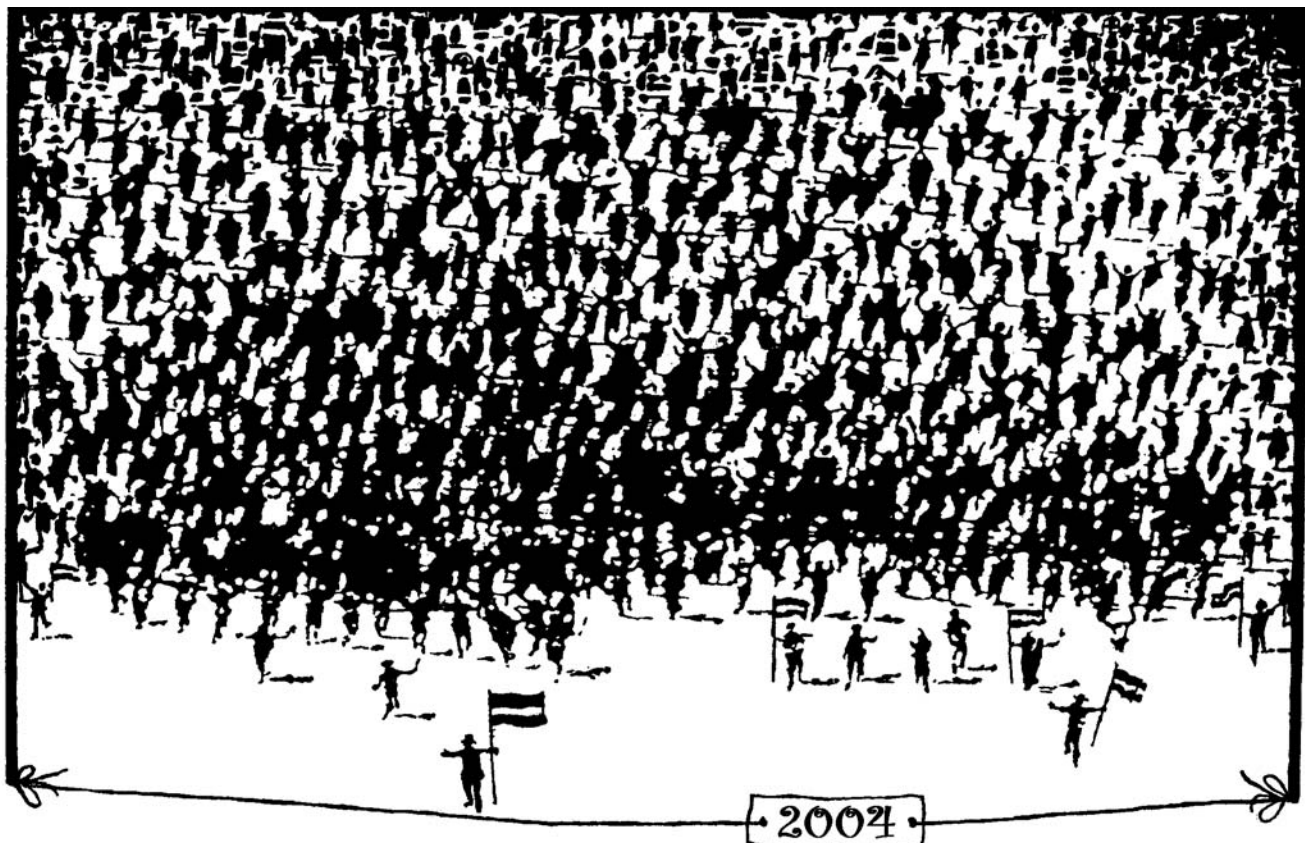
Az elmúlt évben is megjelent az a két számunk, amely angolul közölte az év legjelentősebbnek ítélt cikkeit. A nem magyar nyelvű olvasó számára további segítséget jelent, hogy a címen felül a cikkek kulcsszavai és kivonatai is megjelennek angol nyelven minden egyes szám végén.

A 2004-es évben két nagyobb szabású tervünk van a lappal. Először: szeretnénk, ha a lap visszanyerné régi helyét a nemzetközi porondon és a Science Abstracts ismét referálná. Erre szolgáló formai lépések voltak az előbb említettek is.

A másik elképzeléssel először ebben a számban találkoznak olvasóink: ez a vendégszerkesztők felkérése. Tervünk szerint minden második szám tematikus szám lesz, így tartalmának nagyobb részét egyetlen szakmai terület közleményei töltik ki. Ezeket a számokat az adott témakör egy-egy közismert művelője szerkeszti majd. Azt reméljük és várjuk, hogy ez a megoldás a cikkek mennyiségét és színvonalát egyaránt biztosítja és így olvasóink is fokozottan elégedettek lesznek.

Köszönjük a lap iránt folyamatosan megnyilvánuló érdeklődést. Kívánjuk, hogy a továbbiakban is sok örömet találjanak, amikor kézbe veszik a Híradástechnikát.

Dr. Lajtha György, Dr. Zombory László



A vendégszerkesztő bevezetője

paksy.geza@ln.mtav.hu

Megtisztelő feladat számomra, hogy a Híradástechnika februári, fénytávközléssel foglalkozó tematikus számának szerkesztője lehetek. A szerkesztésnél célul tűztem ki azt, hogy átfogó képet adjak a szűkebb szakterülettel nem foglalkozó, de a távközlésben jártas olvasók számára is a távközlés e speciális, de sok szempontból meghatározó fontosságú részterületéről. Szerencsére több rangos szerzőt is sikerült megnyernem a kitűzött célnak megfelelő cikkek megírására. Ugyanakkor fontosnak tartottam, hogy jelenjenek meg a tématerülethez kapcsolódó, új kutatási eredményeket bemutató publikációk is. Ebben a számban megjelennek olyan cikkek, amelyek bemutatnak egy-egy részterületet, mint pl. az optikai CDMA vagy az optikai csomagkapcsolás. Olvashatunk olyan új tématerületekről is, ahol még csak most alakulnak ki az alapelvek, vagy az ITU, IETF ajánlások. Ilyen – vélhetőleg közérdeklődésre számító terület – a GMPLS vagy az ASON.

Az új kutatási eredményekről főként doktorandusz hallgatók és fiatal oktatók számolnak be. Érdemes megjegyezni, hogy ezek a publikációk európai kutatási projektek keretében folyó munkák eredményeiről adnak számot.

Több cikk foglalkozik a fénytávközlő berendezések működési elveivel is. Reméljük, hogy ezen elméleti kutatásokban szerzett tapasztalatok később magyar ipari eredményekké válnak. Kiemelkedő helyet foglalnak el a hálózatokkal, hálózati technológiákkal, protokollokkal foglalkozó cikkek. Ez azt jelzi, hogy a távközlésben kialakult verseny hatására a szolgáltatók érdekeltek a versenyképes, a hosszú távú, stratégiai célkitűzéseknek megfelelő, ugyanakkor csekély beruházási és üzemeltetési költséggel járó hálózatok kialakításában. E szolgáltatói igény hatására hazánkban magas színvonalú hálózattervezési kultúra alakult ki. Ez nemcsak különféle optimalizálási módszerek kidolgozásában nyilvánul meg, hanem abban is, hogy az e területen dolgozó szakemberekben meg van az érzékenység a legújabb hálózattechnológiák befogadására, bevezetésére. A cikkek sorát végül egy olyan gazdasági elemző cikk zárja, mely analizálja, – főként nemzetközi piackutató cégek jelentései alapján – a fénytávközlő berendezések piacán jelentkező trendeket.

Ma már közhelyé vált, hogy a fényvezető szál önmagában „végtelen sávszélességet”, és az eddig ismert átviteli közegekhez képest „végtelen távolságot” jelent. Még ha a fizikai jelenségek mélyebb vizsgálatától eltekintünk, és durva közelítésként elfogadjuk a fényvezető szálak gyakorlatban létező információforrásokhoz és a földi lépésekhez viszonyítható relatív „végtelenségét”, akkor is szembe kell néznünk a jelenleg vagy a közeljövőben rendelkezésre álló optikai és elektronikus eszközök nagyon is korlátos teljesítő képességével, és a „végtelen” képeségű hálózat infrastruktúrális megvalósíthatatlanságával.

Az idealisztikus „végtelenséggel” szemben melyek valójában a fénytávközlés reális lehetőségei ma és a nem távoli jövőben? A kitűzött cél az optikai átviteli kapacitások és az optikai lefedettség igény szerinti növelése, az előfizetők lehetőség szerinti megközelítése, illetve elérése, az FTTH (Fiber-to-the-Home) koncepció megvalósítása a nem távoli jövőben.

A kitűzött célok eléréséhez ma olyan optikai-optoelektronikai elemek kutatása van súlypontban (hangolható lézerek, optikai kapcsolók, optikai 3R regenerátorok stb.), melyek segítségével megvalósíthatóvá válik a teljes mértékben optikai tartományi hálózattechnika. A ma elfogadott koncepció szerint a vezérelt optikai rendezők vagy útvonal irányítók (OXC-k) lesznek a fényvezető hálózatok magjának kulcselemei. Ez azért fontos, mert az átviteli korlátok többsége a kényszerből alkalmazott optikai-elektromos átalakítások nagy számából, és az elektronikus eszközök „lassú” működéséből adódik. Erre a koncepcióra alapozzák a Kapcsolt Optikai Hálózat (ASON) modellt és az Általánosított Címke Kapcsolást, a GMPLS-t. Mindkettő alkalmas az IP és a WDM integrációjára is.

Az előfizetői hálózatban a koncepciók közel sem ilyen egységesek. Az előfizetők optikai elérését akadályozza a szükséges fényvezető infrastruktúra kiépítésének megdöbbentően magas költsége, ezért az előfizetői vonal utolsó szakaszában átmenetileg még fel kell használnunk a meglévő rézhálózatot. Különös módon a szélessávú vezeték nélküli fix és mobil rendszerek (pl. UMTS, W-LAN stb.) várható elterjedése nem akadályozza, sőt erősíti a fényvezető hálózatok kiterjesztését, ugyanis a szükséges sok bázisállomás kiszolgálása és forgalmi aggregálása elképzelhetetlen fényvezető hálózat nélkül.

Mit várhatunk tehát a fénytávközlő hálózatoktól az elkövetkezendő években? A tudományos publikációk és konferenciák sokasága azt bizonyítja, hogy az információtechnológiát ért gazdasági csapások lényegében nem fékeztek a fénytávközléshez kapcsolódó kutatásokat. Az elért tudományos eredményeket azonban a gyártókat és szolgáltatókat ért sokkhatás miatt a 2000. év környéki eufórikus tervekhez képest csak lassabb ütemben sikerül működő rendszerekké transzformálni, de az elkövetkezendő években várható lassú gazdasági javulás reálissá teheti az előzőekben vázolt koncepciók valós megoldásá alakítását, a valódi szélessávú szolgáltatások bevezetését. Ehhez a fénytávközlésben világszerte folyó landadatlantalan kutató-fejlesztő munka megfelelő technológiai hátteret tud biztosítani.

Jellemző megjegyzése volt az IEEE Communications Magazine 2003. szeptemberi számában megjelent „After the Optical Bubble: A Reality Check” cikksorozat címére az egyik felkért szerzőnek: „What bubble?”

Paksy Géza

Ritkaföldfémekkel adalékolt optikai szálerősítők és számítógépes modellezésük

VÁRALLYAY ZOLTÁN, JAKAB LÁSZLÓ, RICHTER PÉTER

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Atomfizika Tanszék
vz423@hszk.bme.hu, jakab@eik.bme.hu, richter@eik.bme.hu

VARGA GÁBOR

Fizika Tanszék, vargag@phy.bme.hu

Reviewed

Kulcsszavak: optikai szálerősítők, EDFA, populáció inverzió

Az optikai szálerősítők erősítési tulajdonságait a hordozó és szennyező anyagok együttesen alakítják ki. Az egyre szélesedő kommunikációs sávok erősítési problémái is a megfelelő fizikai tulajdonságokkal rendelkező adalékanyagok és szál alapanyagok kiválasztásában rejlik. Az ilyen rendszerek modellezése, tervezése visszavezethető az adott hordozóban jelenlevő szennyező hatáskeresztmetszetének mérésére és a terjedési egyenletek ezen mérési eredményekkel történő megoldására. A nemlineáris és diszperziós hatások figyelembevételére bizonyos csatornaszám és kommunikációs sebesség esetén fontossá válhat, amelyre közlünk egy lehetőséget.

Bevezetés

Az optikai erősítők megjelenése nagy előrelépés volt a fényvezető összeköttetések hatótávolságának növelésére. A földrészeket összekötő, óceánokat átívelő optikai telekommunikációs rendszerekben alkalmazott erősítők alkalmasak a csillapodott fény-impulzusok széles optikai tartományon történő erősítésére, lényegében az időegység alatt átvitt információ sebességétől függetlenül.

Az elektronikus ismétlők (regenerátorok) használata kényelmetlen, ugyanis a bit sebesség növelése nem oldható meg egyszerűen. A hullámhosszosztásos nyálbólási (WDM) technikák alkalmazása további problémákat ró az elektronikusan feldolgozandó jel detektálására, erősítésére és regenerálására, ha a kommunikációs csatornák számát növelni szeretnénk. Optikai erősítők használatával a fenti nehézségek kiküszöbölhetőek.

Működésük szempontjából két alapvető típust különböztethetünk meg:

- 1) lézer hatáson alapuló optikai erősítők, amelyek az indukált emisszió jelenségét használják fel a fény intenzitásának erősítésére, ilyen az egyik legközismertebb szálerősítő az erbium adalékolt szál erősítő (EDFA) [1]
- 1) és a nemlineáris szórás jelenségeket felhasználó erősítők, mint például a Raman-erősítők [2, 3].

Az első kategóriába tartoznak még a félvezető erősítő lézerek (SLA) és más ritkaföldfémekkel adalékolt szálak, míg a másodikba a Brillouin-szórás alapú erősítők.

Ezen cikk a ritkaföldfémekkel adalékolt szálerősítők fizikai tulajdonságairól, felhasználási lehetőségeiről, optikai rendszerekbe való integrálhatóságukról és számítógépes szimuláción keresztüli tervezhetőségükről ad áttekintést.

Ritkaföldfémekkel adalékolt szálak

Ahhoz, hogy az erősítő megfeleljen az optikai rendszerek által támasztott követelményeknek (részletek [2]-ben vagy [3]-ban) olyan anyagokat kell választani, melyeknek lehetőleg kicsi a vesztesége, diszperziója és nemlinearitása. Ezekhez a megfelelő anyagokat megtalálni az anyagtudomány feladata. Mi itt csupán összefoglaló áttekintést adunk a napjainkban használatos optikai szál alapanyagok és szennyezők tulajdonságairól. Az 1. táblázatban található néhány üveg, amelyben a legkisebb veszteségi értékeket is feltüntetjük a hullámhosszal együtt.

1. táblázat

Néhány üveg elméletileg jóslott minimális vesztesége és a hullámhossz, melyen ez elérhető.

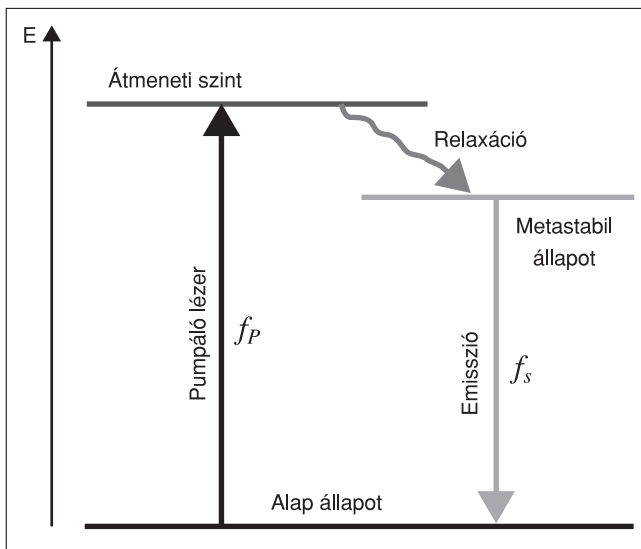
Anyag név	Minimális veszteség [dB/km]	Hullámhossz [nm]
SiO ₂	0.16	1600
As ₂ S ₃	4.0	3800
GeO ₂	0.6	2000
ZBLAN fluorid	0.025	2500
BeF ₂	0.005	2100
ZnCl ₂	0.0035	4600

Az optikai szálak olvadékból való húzással készülnek a leggyakrabban szilikát (SiO₂) alapú üvegből. További szennyező anyagok használata szükséges az előformában (preform) a mag törésmutatójának a megváltoztatásához, vagy a törésmutató profil kialakításához. Erre alkalmas a germánium-dioxid (GeO₂) és a fluor (F), amit a köpeny szennyezéséhez használnak. Manapság egyre növekvő érdeklődés mutatkozik a fluorral szennyezett ZBLAN (Cirkónium, Bárium, Lantán, Alumínium, Nátrium) típusú üvegek iránt, amelyeknek a vesztesége igen kicsi, azonban a ma telekommunikációra használt tartománytól (1520-1620 nm) távol esik az ilyen anyagok minimális veszteségi tartománya (táblázat). A ma használatos erbiummal adalékolt szál erő-

sítők alumíniummal (Al) és germániummal (Ge), illetve alumínium és foszforral (P) szennyezett szilikát üvegeken alapulnak. De további pozitív tulajdonságokkal rendelkeznek a tellúr-dioxid (TeO₂) üvegek is, amelyek ugyancsak hordozói lehetnek a ritkaföldfém szennyezőknek. Ezen utóbbiak szennyezése esetén a megfigyelt emissziós spektrum valamivel szélesebb, mint a szilikát üvegeknél.

Ahhoz, hogy szálerősítőt építsünk, úgy kell szennyezni a szál magját, hogy a szennyező egy adott pumpáló hullámhosszon abszorbeáljon, majd rövid időn belül egy olyan metastabil állapotba kerüljön, ahol az előző folyamatokhoz képest hosszú időt tölt, így lehetővé téve egy arra haladó fotonnakimpulzusnak, hogy azt indukált emisszióra kényszerítse (1. ábra). Majdnem minden lézerezanyag viselkedése az első ábrán látható egyszerű modell alapján kezelhető, bár ezek energiasáv szerkezete ennél jóval összetettebb. Például az Er³⁺ ion gerjeszthető az 1480 nm, 980 nm, 800 nm, 650 nm és további rövidebb hullámhossz értékek közvetlen közelében is. Ezek a ⁴I_{15/2}, ⁴I_{13/2}, ⁴I_{11/2}, ⁴I_{9/2}, ⁴F_{9/2} stb. szintek közötti átmenetekhez tartozó hullámhossz értékek [4]. A matematikai modelljeink általában csak kétszintes modellt vesznek alapul, mint azt láthatjuk később: az alapállapotot és a metastabil állapotot. Ezek a modellek jó közelítések, hiszen az átmeneti állapot élettartama olyan rövid egyéb átmenetekhez képest, hogy annak dinamikája nem járul hozzá jelentősen a rendszer viselkedéséhez.

1. ábra Háromszintes lézer energiaszint diagramja



Lényeges az is, hogy milyen hullámhosszon fog emittálni az adott lézerezanyag. Tehát milyen frekvencia vagy hullámhossz tartományban fog erősíteni az erősítő. Ez azt jelenti, hogy az első ábrán látható f_s frekvenciának az erősítendő jel frekvenciájához közel kell lennie. Erbiummal adalékolt szálak esetén ez a telekommunikációban használt sáv szélességekhez képest meglehetősen széles 1520 és 1620 nm közötti hullámhossz tartományra tehető. Ebben a tartományban, 10

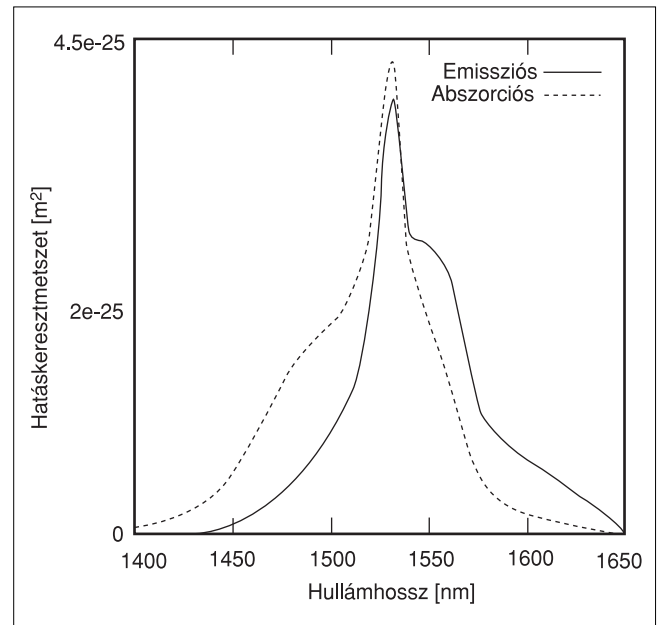
Gb/s sebességű kommunikáció esetén, 20-24 csatorna is elfér. Az erősítés mértéke ebben a régióban jó közelítéssel egyenletes. Az erősítés és a veszteség mérhető, amely a számolásoknál használt emissziós- és abszorpciós hatáskeresztmetszettel állnak kapcsolatban [5]

$$g(\lambda) = \sigma_e(\lambda)\Gamma(\lambda)n_{Er} \quad (1)$$

$$a(\lambda) = \sigma_a(\lambda)\Gamma(\lambda)n_{Er}$$

ahol $g(\lambda)$ az erősítés hullámhossz függése, $a(\lambda)$ az abszorpciós spektrum, az átfedési integrál az optikai módusok és az erbium ionok között (tipikus értéke 1550 nm-en 0.69), míg n_{Er} az Er³⁺ ionok koncentrációja a magban, $\sigma_a(\lambda)$ és $\sigma_e(\lambda)$ az abszorpciós és emissziós hatáskeresztmetszetek, amelyeket a 2. ábra mutat erbium esetén.

2. ábra Az Er³⁺ ion abszorpciós- és emissziós hatáskeresztmetszete. Az 1480 nm-es pumpálás ideális, mert erre a hullámhosszra az abszorpció nagy, viszont az emisszió



kicsi.

Az Erbiummal adalékolt szálerősítőknek azonban az a hátrányuk, hogy csak bizonyos frekvenciákon pumpálhatóak és csak bizonyos frekvencia tartományon képesek erősíteni, amely tartomány nem függ a pumpáló lézer hullámhosszától, ellentétben a Raman-erősítőkkel, ahol a választott pumpáló lézer hullámhossza fogja behatárolni az erősítési tartományt is egyben [2, 3].

Az fénytávközlő rendszerek sebességnövelésének egyik módja, az átviteli sebesség növelése mellett, a csatornaszám növelése, a több hullámhosszon történő adat továbbítás, amely az eddig erősítésre lehetőséget adó EDFA tartományából kilóghat mind a rövidebb, mind a hosszabb hullámhosszak felé. A több tíz és néhány száz csatornát magukba foglaló nagy sűrűségű hullámhossz nyalábolási (DWDM) technikákat alkalmazó rendszereknek az EDFA nem nyújt kielégítő

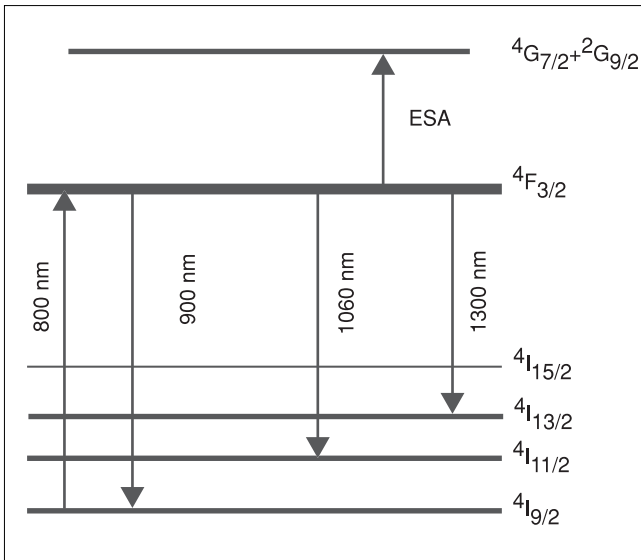
megoldást az összes csatorna megfelelő erősítésére. Az anyagtudósok ezért olyan újabb szennyezők után kutatnak, amelyek az S (1470-1520 nm) és az L (1575-1625 nm) sávban jó emissziós tulajdonságokkal rendelkeznek, illetve az 1330 nm körüli ablakban is használhatóak.

A kísérletek folynak neodímiummal (Nd), amelynek pumpálása 800 nm-en oldható meg és az 1300 nm környéki lehetséges kommunikációs ablak körül erősít. Létrejöhethet azonban a gerjesztett állapotok abszorpciója (ESA), amely nem kívánatos jelenség, mivel zajként járul hozzá a rendszer működéséhez (3. ábra) és az erősítés hatékonyságát is rontja. Ennek kiküszöbölésére is vannak ma már megoldások.

3. ábra

A Nd^{3+} ion energiasáv szerkezete.

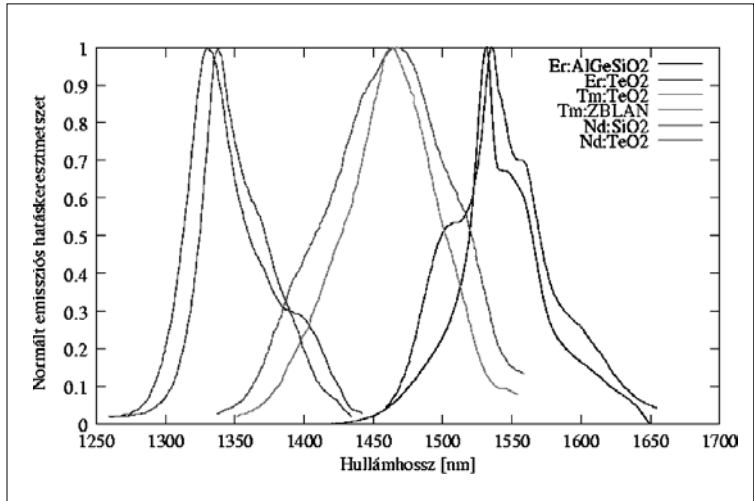
Erősítés az 1300 nm körül kapható 800 nm-es pumpálás esetén. A gerjesztett állapot további abszorpciója (ESA) kiküszöbölhető. A többi átmenet zaj járulék.



Napjainkban kutatott optikai erősítők a Tuliummal adalékolt szálak, amelyek 790 nm-en pumpálhatóak és az 1470 nm körüli régióban erősítenek, amely tartomány éppen a hagyományos szilikát alapú szálak OH-abszorpciós sávjába esik. Azonban ma már a víz okozta veszteségek is igen jól csökkenthetők, így lehetőség nyílik e tartomány használatára is. A hordozók és a szennyezők kiválasztására meglehetősen sok lehetőség áll a rendelkezésre, az ezekből épített optikai erősítők pedig igen széles tartományt képesek lefedni erősítési tartományukkal (4. ábra), nagyobb szabadságot engedélyezve az adatátvitelhez felhasználni kívánt hullámhosszak tekintetében.

Szimuláció

Az erősítők megfelelő módon történő használatához elengedhetetlen a numerikus tervezés.



4. ábra

Az erbium, a túlium és a neodímium emissziós hatáskeresztmetszetei különböző típusú hordozókban. A TeO2 üveg alkalmazása esetén a görbe félértékessége nagyobb.

A ritkaföldfémekkel adalékolt szálak, akárcsak az EDFA, egy terjedési egyenlet és egy kétszintes lézergyantát leíró mérlegegyenlet segítségével modellezhetők [5]:

$$\frac{dP(z, f_k)}{dz} = u_k [\sigma_e(f_k) N_2(z) - \sigma_a(f_k) N_1(z)] \Gamma(f_k) n_l P(z, f_k) - \alpha(f_k) P(z, f_k) \quad (2)$$

ahol $z \in [0, L]$ az optikai tengellyel egybeeső koordináta, L a szál hossza, $P(z, f_k)$ a f_k frekvenciájú komponens teljesítménye a z helyen, $\alpha(f_k)$ a veszteség egy adott hullámhosszon, $k = 1, 2, \dots, n$ a szimuláció során jelenlevő összes frekvencia indexe, $N_2(z)$ a populáció inverzió mértéke a z helyen, $N_1(z) = 1 - N_2(z)$ és u_k a terjedési irányt jelölő együttható, amely pozitív terjedés esetén 1, negatív esetén -1. Ha a dinamikai jelenségeket figyelmen kívül hagyjuk, azaz a populáció inverzió időfüggését elhanyagoljuk (bekapcsolási jelenségek), akkor a populáció inverzió a következő kifejezéssel adható meg:

$$N_2(z) = \frac{\sum_{k=1}^n \tau \frac{P^*(z, f_k)}{\pi r_{eff}^2 h f_k} \Gamma(f_k) \sigma_a(f_k)}{1 + \sum_{k=1}^n \tau \frac{P^*(z, f_k)}{\pi r_{eff}^2 h f_k} \Gamma(f_k) [\sigma_a(f_k) + \sigma_e(f_k)]} \quad (3)$$

ahol τ a metastabil állapot élettartama, r_{eff} az Er^{3+} ion eloszlás effektív sugara, h a Planck-állandó, c pedig a fény sebessége vákuumban. A (3) egyenletben $P^*(z, f_k)$ a pozitív és negatív irányba haladó f_k frekvenciájú fény intenzitások összege a z helyen.

Abban az esetben, ha az inverziós szintek dinamikáját is figyelembe vesszük, akkor N_2 egy parciális differenciális egyenlettel adott [6]:

$$\frac{\partial N_2(z, t)}{\partial t} = -\frac{N_2(z, t)}{\tau} - \frac{1}{n_l A_{eff}} \sum_{k=1}^n u_k \frac{1}{h f_k} \frac{\partial P(z, t, f_k)}{\partial z} \quad (4)$$

amely esetben a (2) egyenletrendszer is egy parciális differenciálegyenlet rendszerré változik, ahol az intenzitások az idő függvényei is, de teljesen azonos alakúak (2)-vel.

Fontos ismernünk az erősítő zaj járulékát. Ezért a terjedési egyenleteinkbe integrálnunk kell a megfigyelt tartományban jelentkező erősített spontán emissziót (ASE) bizonyos frekvencia osztással. Az ASE csatornák terjedését (2)-vel megegyező egyenletek írják le egy plusz tagtól eltekintve, aminek alakja:

$$u_k \sigma(f_k) \Gamma(f_k) n_t N_2(z) m h f_k \Delta f_k \quad (5)$$

ahol Δf_k a frekvencia felbontás és m a polarizációs állapotok száma.

A fenti egyenletek megoldása véges differenciás módszerekkel (FDM) megtehető úgy, hogy a szál teljes hosszát kisebb tartományokra osztjuk, és a populáció inverzió mértékét e rövid szakaszok végén újra számoljuk az ott megkapott intenzitás értékekből. A szimulációinknál használt általános érték volt, hogy egy 10 m-es szálat 100 részre osztottunk, az így keletkezett rövid szakaszokon negyedrendű Runge-Kutta módszert alkalmaztunk, amely szakaszok végén N_2 -t újra számoltuk.

Az erősítőbe becsatolt pumpáló fényforrás iránya lehet a jel terjedésével megegyező és azzal ellentétes irányú is. Az ellentétes irányú pumpálásnál a szál elején nem ismerjük annak értékét, így egy kettős szélsőérték probléma áll elő, amelyet többszöri iterációval sikerült lekezelnünk.

A fenti módon minden adalékolt szálerősítő modellezhető és ezzel a rendszer viselkedése jósolható, ha rendelkezésünkre állnak a hatáskeresztmetszetek hullámhossz függésre vonatkozó értékei ($\sigma_a(f_k)$ és $\sigma_{ea}(f_k)$), az átfedési integrál ($\Gamma(f_k)$) és a szennyező anyag koncentrációja (n_t).

Eredmények

A ritkaföldfémekkel adalékolt szálerősítők néhány méteren is 10-20 dB körüli erősítésre képesek. Így ezen rövid szakaszon általában elhanyagoljuk a diszperzió és nemlinearitás okozta hatásokat. A fenti egyenletek sem tartalmazzák azokat. A kommunikáció sebességének növekedésével viszont jelentőssé válhat az erősítő diszperziós járuléka a teljes rendszeréhez, ugyanis rövidebb impulzusok azonos mértékű diszperzió esetén nagyobb mértékben szélesednek ki. Így a bitek elkülöníthetetlenekké válhatnak. Egy másik fontos tényező a nagyobb intenzitásoknál jelentkező ön-fázis moduláció (SPM), ami a jel spektrumát szélesíti ki, és ezzel átfedések alakulhatnak ki a különböző frekvenciájú csatornák között WDM rendszerekben.

A problémát a klasszikus, nemlineáris hullámterjedés egyik fajta lekezeléséhez hasonló módon kívántuk megoldani. Ez a fajta megoldás az osztott operátor módszer vagy Split-Step Fourier (SSF) módszer, amely a szálba becsatolt elektromágneses hullám burkolófügg-

vényére ható exponenciális operátorok sorozatával tehető meg [7]. Egy első rendű SSF módszer esetén Δz hosszúságú szál szakaszra a belépő és kilépő burkolófüggvények között a következő összefüggés áll fenn:

$$A(z + \Delta z, t) = \exp(\hat{D}\Delta z) \exp(\hat{N}\Delta z) A(z, t) \quad (6)$$

ahol \hat{D} a lineáris-, \hat{N} a nemlineáris tagokat tartalmazó operátor. Ezek alakjai csak elsőrendű tagokat figyelembe véve:

$$\begin{aligned} \hat{D} &= \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ \hat{N} &= i\gamma |A(z, t)|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

ahol i az imaginárius egység, β_2 a csoportsebesség diszperzió, γ a nemlineáris együttható, amely a nemlineáris törésmutatóból számolható és $A(z, t)$ a komplex burkoló függvény a z helyen.

A nemlineáris hatás figyelembe vételénél probléma adódik, mert a szál hossza mentén a burkoló függvény abszolút érték négyzete nem állandó. Ha a szál elején lévő értékkel számolnánk, a nemlinearitás túl kicsi lenne, ha a szál végén kapott, felerősödött jellel, akkor meg túl nagy. Az átlag kiszámítása viszont lehetséges olyan módon, hogy a (2) egyenletből megkapott $P(z, f_k)$ intenzitás-függvényekből pontról pontra előállítjuk $A(z, f_k)$ -t a frekvencia térben, majd inverz Fourier-transzformáció után átlagolunk. A burkoló időtérben való előállításához rendelkezésünkre áll a kezdeti fázis információ, amely a szál végén is változatlan, ugyanis (2) azt nem változtatja meg.

Ennél kissé egyszerűbb eljárás az, ha $P(z, f_k)$ -k átlagát számoljuk és ezen átlagnak a függvényében változtatjuk meg a nemlineáris lépés hosszát úgy, hogy a szál végén kapott burkoló függvényt használhassuk a számolásnál. Az így kapott redukált nemlineáris lépéshossz a következő alakban adható:

$$L_r = \frac{\langle P \rangle}{P(L)} L \quad (8)$$

ahol L a szál hossza és

$$\langle P \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L P(z) dz \quad (9)$$

A (2)-(9) egyenletek használatával épített modell alapján kapott eredményt az 5. és 6. ábrán foglaltuk össze. Itt egy 160 Gb/s sebességű WDM rendszerbe épített EDFA-t modelleztünk. Négy különböző csatorna terjed egymástól 1.4 THz távolságban. A multiplexelt 1 mW-os Gauss impulzusok a 193.4 THz frekvencia környékén (1550 nm) helyezkednek el egyenlő távolságban. Itt csak egy bit szélesre választottuk az idő ablakot, tehát egyetlen impulzus terjedését ábrázoljuk, mely négy különböző frekvenciából lett nyálábolva, hogy a diszperzió káros jelensége jól megfigyelhető legyen. A szálban lévő erbium koncentrációt $2.5 \cdot 10^{24} 1/m^3$ -nek, a

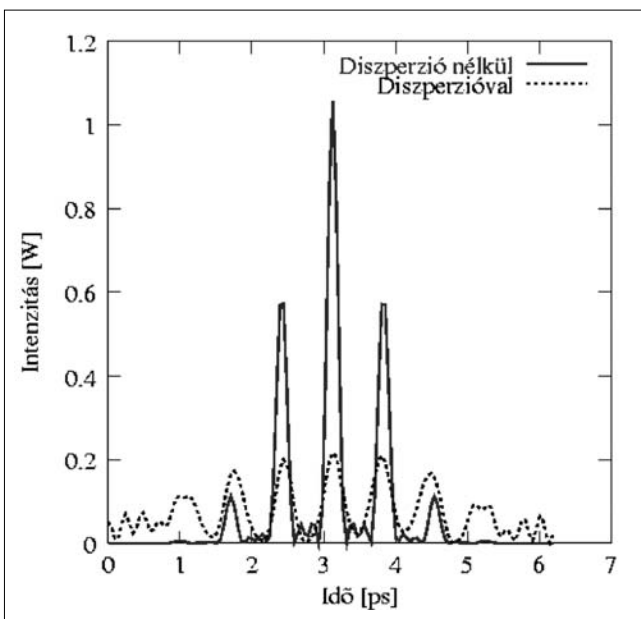
szál diszperzióját $4 \text{ ps}/(\text{nm km})$ -nek és a nemlineáris törésmutatót pedig $3.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ -nak választottuk. A diszperzió tehát nem nagy. A tipikus egymódusú szálak (SSMF) 1550 nm hullámhossz körüli értéke $17 \text{ ps}/(\text{nm km})$.

A 30 m hosszú szál után létrejövő képen látszanak a diszperzió és a nemlinearitás jelei. A spektrumon (6. ábra) megjelennek a négy hullám keverésből adódó új frekvenciák, míg az 5. ábrán a jel alak teljesen szétfolyik, ami annyit jelent, hogy átlóg a szomszédos bitek időablakába (Interszimbolum interferencia).

A fent említett kommunikációs sebesség esetén a beállított diszperzió és nemlinearitás értékek, a számolásunk alapján nagynak bizonyultak. Ebben az esetben érdemes diszperzióban eltolt (DSF) szálakat hasz-

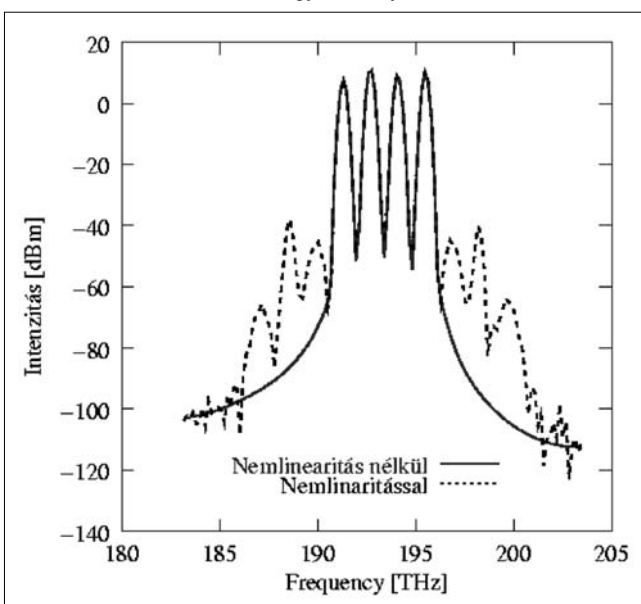
5. ábra

A különböző frekvenciák miatt összelebegő impulzus az erősítés számolása és a diszperzió számolása után.



6. ábra

A négy csatorna spektruma erősítés után és a nemlinearitás következtében megjelent új frekvenciákkal.



nálni az erősítőkben, amelyeknek 1550 nm körüli $20\text{-}30 \text{ nm}$ -es tartományban $1 \text{ ps}/(\text{nm km})$ -nél jóval kisebb a diszperziójuk. A nemlineáris hatások csökkentése is lényeges a csatornák jól elkülöníthetőségének érdekében. Erre a célra léteznek $2.4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ vagy annál kisebb nemlineáris törésmutatóval rendelkező fényvezető szálak.

Összefoglalás

A ma rendelkezésünkre álló optikai erősítők nyújtotta változatosság lehetőséget ad arra, hogy a megtervezendő rendszert könnyen optimalizáljuk, a kívánalminknak megfelelően. Nem csak a szennyező anyagok, de a hordozók kiválasztása is újabb előnyös tulajdonságokkal javíthatja az optikai erősítők sávszélesség, veszteség és további fizikai tulajdonságait, amelyeket előnyünkre fordíthatunk.

Ezen szál erősítők alkalmazásában és egy komplett rendszer megtervezésében nyújthat segítséget a szimuláció. A vázolt modell alkalmas arra, hogy speciális szennyezők és hordozók esetén is, néhány mért fizikai paraméter segítségével jóslni tudjuk a rendszer viselkedését, illetve annak működését.

Köszönetnyilvánítás

Munkánkat nagymértékben támogatta Dr. Besztercey Gyula a Furukawa Electric Technológia Intézet Kft. ügyvezető igazgatója, akinek a szerzők ezúton is köszönetet mondanak.

Irodalom

- [1] P. C. Becker, N. A. Olsson and J. R. Simpson: Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology, Academic Press, 1997.
- [2] Várallyay Z., Varga G., Jakab L., Richter P.: Szélessávú Raman szálerősítők modern telekommunikációs rendszerekben, Híradástechnika 2003/7, 24. oldal
- [3] Z. Várallyay, G. Varga, L. Jakab, P. Richter: Broadband Raman amplifiers in modern telecommunication systems, Híradástechnika 2003/12, 36. oldal
- [4] E. Desurvire: Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications, John Wiley & Sons, (1994).
- [5] C. R. Giles, E. Desurvire: Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers, J. Lightwave Technol. 9, 271 (1991).
- [6] A. Bononi, L. A. Rusch: Doped-Fiber Amplifier Dynamics: A System Perspective J. Lightwave Technol. 16, 945 (1998).
- [7] G. P. Agrawal: Nonlinear fiber optics, Academic Press, 3rd edition, 2001.

VCSEL-ek alkalmazása és modellezése direkt modulált optikai összeköttetésekben

MAROZSÁK TAMÁS TANÁRSEGÉD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan
Tanszék

tamas.marozsák@mht.bme.hu

Kulcsszavak: félvezető lézerek, lézerek direkt modulációja, VCSEL-ek modellezése

A VCSEL-ek (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) rendkívül fontos lépést jelentenek az optikai távközlésben. Működési paramétereik ma már épp olyan jók, mint a legjobb hagyományos oldalsugárzó félvezető lézereké ugyanakkor előállítási költségük a töredéke lehet. A cikk bemutatja ezen lézerek sajátosságait és alkalmazási lehetőségeit nagy sebességű direkt modulált optikai összeköttetésekben. Olyan újfajta áramköri modell kerül ismertetésre, mely képes a VCSEL-ekben működő térbeli effektusok szimulációjára, mint a diffúzió és a térbeli lyukbeégés.

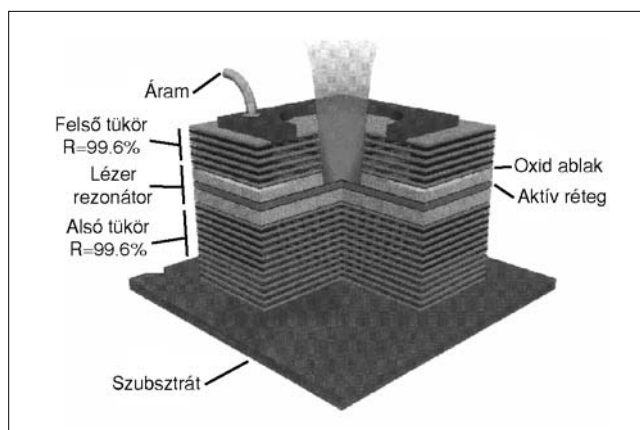
A félvezető lézer napjaink távközlésének egyik legfontosabb eszköze. A segítségével létrehozott optikai vivő több tíz gigahertzes sávszélességű digitális jelet hordozhat, vagy bármilyen, ebbe a sávszélességbe illő analóg jelet, például rádiócsatornák jeleit. Elképzelhető akár olyan rendszer is, melyben a kettőt egyszerre [1]. Az optikai átvitel előnyei, mint a kis csillapítás, nagy sávszélesség, vagy a zavarvédetség nyilvánvalóak, ám az eszközök viszonylag magas ára gátat szab széles körű elterjedésének. A technológiai fejlődés és a felhasználói igények rohamos növekedése szerencsére gyorsan elérhetővé teszik a korábban még drága technológiákat.

Ezen az úton fontos mérföldkő a VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser): a függőleges rezonátorú felület sugárzó lézer mely forradalmi árcsökkenést eredményez és elérhető közelségbe hozza a FTTH (Fiber To The Home: üvegszál az otthonokba) technológiákat. A következő oldalakon ezen lézerek sajátosságai, vizsgálati eredményei, és modellezése kerül bemutatásra. A modellezésnél használt matematikai módszer általánosan is használható problémák áramköri szimulátorral történő vizsgálatához.

VCSEL-ek felépítése

A VCSEL-ek nevükben hordozzák a legfontosabb strukturális különbséget a hagyományos oldalsugárzó lézerektől. A lézer rezonátora a félvezetőben nem planáris, hanem vertikális irányban kerül kialakításra ahogy azt az 1. ábra mutatja.

A felhasználás szempontjából ez azért nagyon jelentős, mert a lézer működéséhez nem szükséges a félvezető szelet feldarabolása, mint korábban. Az egyes lézerek rögtön gyártás után, még a szeletben tesztelhetők ami drasztikusan csökkenti a gyártási költségeket. A szeletelés egyáltalán nem befolyásolja a lézer működését, sokkal könnyebb tokozni, vagy integrálni más áramkörökkel.



1. ábra VCSEL szerkezeti felépítése

A függőleges lézer rezonátor szerkezete jelentősen eltér az oldalsugárzó lézerek planár rezonátorától. Ugyanis a rezonátor hossza, amit félvezető réteg növesztésével alakítanak ki, nem lehet nagy, tipikusan a mikron nagyságrendjébe esik. Ilyen hosszön viszont kicsi az optikai erősítés, tehát igen nagy, 99% feletti optikai reflexióra van szükség a rezonátor határain. Ilyen reflexiót csak elosztott tükrő struktúrával, DBR (Distributed Bragg Reflector) tükrővel lehet elérni. Ez különböző törésmutatójú, ám azonos rácsállandójú, negyedhullámhossz vastagságú rétegek váltott egymásra növesztéséből áll. A szükséges reflexió eléréséhez 20 és 30 közötti réteg párra van szükség mind alul, mind felül, aminek létrehozását a MBE (molecular beam epitaxy: molekula sugaras rétegnövesztés) fejlődése tett lehetővé. A két tükrő között helyezkedik el az aktív réteg, mely általában egy, vagy néhány kvantum völgyből áll és így vastagsága tipikusan 10 nm nagyságrendjébe esik.

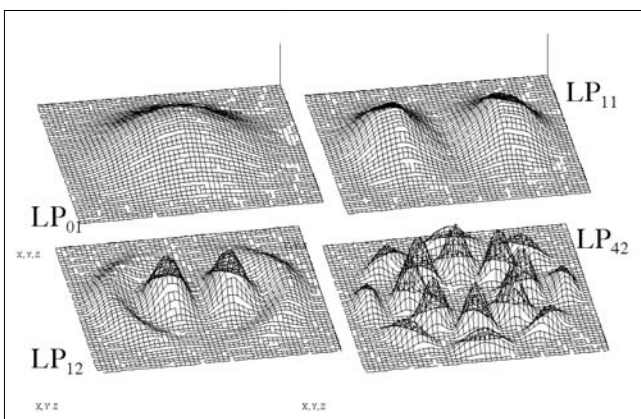
A tükrők kialakításánál minél nagyobb a törésmutató különbség a rétegek között, annál kevesebb rétegre van szükség. Ennek következménye, hogy ma még csak inkább a 850-980 nm-es hullámhosszra készülnek VCSEL-ek, mert a GaAlAs anyagrendszerben kapható

megfelelő törésmutató különbség. Az 1300 és 1550 nm-es lézerek InGaAsP anyagrendszerben készülnek, amiben ez nem érhető el és így VCSEL nem készíthető belőle. Az 1300 és 1550 nm-es VCSEL készítése ma is intenzív kutatási terület, mivel az egymódusú optikai átvitelhez ilyen hullámhosszra van szükség. A VCSEL-ek ezért ma elsősorban a multimódusú optikai összeköttetésekben terjednek, ahol a módusdiszperzió a sávzélességet körülbelül 0.5 GHz-km-re korlátozza. Cserébe olcsó és sok alkalmazás számára ez a sávzélesség is elégséges. További fontos alkalmazási terület az optikai buszok kialakítása, mivel a VCSEL-ek könnyen integrálhatók egy vonalba, ezért könnyen csatlakoztathatók optikai szalagkábelekhez, és vételi oldalon is könnyen kialakítható egy sorba integrált Si fotodiódákkal megvalósított optikai vevő sorozata.

Visszatérve a szerkezeti felépítésre fontos beszélni a transzverzális felépítésről. A henger alakú lézer rezonátor vertikális határai adottak a tükrök által, viszont a transzverzális irányokban más a helyzet. Kezdetben az aktív tartomány határát a csík lézerekhez hasonlóan az áram injektálás határozta meg. A komplex törésmutató az erősen injektált, lézer működést produkáló területeken jelentősen megváltozik, amely különbség az optikai teret behatárolja (optical confinement). Így azonban megfelelően kis aktív átmérőt nem lehet létrehozni, ezért az 1. ábrán is látható szigetelő oxid réteget helyeznek el az aktív réteg felett. Ezen „tetszőlegesen” kis ablakot lehet nyitni az áram számára, ami ezek után meghatározza a rezonátor radiális méretét. A radiális méret elsősorban a lehetséges transzverzális módusok száma miatt fontos, ugyanis a létrejövő henger alakú tápvonalban több, Bessel függvényekkel leírható módus alakulhat ki. Ezek lineárisan polarizált módusok, jelölésük $LP_{m,n}$, ahol m a szögbeni, n a sugárirányú periódusok számát jelenti. Az első néhány módus intenzitásának eloszlását a 2. ábra mutatja.

A hagyományos oldalsugárzó lézerekhez képest a VCSEL rezonátor kis radiális mérete és az aktív réteg kis vastagsága kis aktív térfogatot eredményez, minek köszönhetően a VCSEL-ek küszöbárama rendkívül alacsony, 1mA alatti. Szintén a kis rezonátor hosszának köszönhetően a lehetséges longitudinális módusok frek-

2. ábra. A VCSEL-ben kialakuló transzverzális módusok intenzitás-eloszlása



venciában nagyon messze esnek egymástól, így az anyag optikai erősítésének sávzélességébe csak egy tud beleesni. A lézerműködés tehát egy longitudinális, és általában több transzverzális módusban történik.

A több transzverzális módusban való működés számos új, máig még teljesen nem megértett jelenséggel szolgál. A rezonátorban lévő töltéshordozók eloszlása ugyanis erősen változik az egyes módusok intenzitásának függvényében. Ahol valamely módus intenzitása nagy, ott a töltéshordozók száma lokálisan lecsökken, amit térbeli lyukbeégésnek hívnak (SHB, Spatial Hole Burning), és alapvetően befolyásolja a VCSEL-ek viselkedését. Egymódusú VCSEL nagyon kis oxid apertúra készítésével készíthető, ilyenkor azonban a kis aktív térfogatot óriási áramsűrűség fűti, ami termikus problémákhoz vezet. Ezért az egymódusú VCSEL-ek általában ma még csak kis teljesítményűek, így nem preferáltak. A probléma megoldására vannak próbálkozások, egyik legbiztosabb a móduszelektív tükrök alkalmazása, amivel nemrégiben 6mW optikai teljesítményt sikerült 850nm-es egymódusú VCSEL-ben elérni [2].

Modulációs vizsgálatok

A félvezető lézerek direkt modulációja biztosítja rövid optikai összeköttetéseknel a legnagyobb dinamikatartományt [3]. Ahhoz, hogy ennek nagyságát pontosabban ismerjük, a lézerdiódák kísérleti vizsgálataira van szükség. A dinamika tartomány alját a zaj határozza meg, felső határát pedig a nemlineáris torzítások.

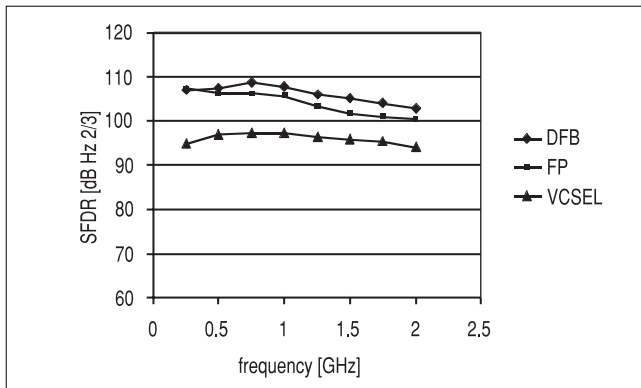
Az optikai átvitel meghatározó zajforrása a lézerdióda intenzitás zaja mindaddig, míg az átviteli csillapítás le nem csökkenti a vevő termikus zaja alá. Ez általában 10dB optikai csillapítás után következik be [3]. A dinamika tartomány alját tehát rövid összeköttetés esetén a lézer határozza meg, hosszú összeköttetés esetén pedig felső korlátot ad neki.

A nemlineáris torzítás digitális jelek átvitelénél nem kritikus, analóg jeleknél viszont meghatározó jelentőségű. A modulációs mélységet a jel-zaj viszony emelése érdekében nem lehet egy bizonyos határ fölé emelni, mert a másod-, és harmadrendű torzítási termékek az átvitelt lerontják. Tipikus példa a kábel TV, ahol sokcsatornás átvitel van és a rendszer érzékeny az intermodulációra. Egyenletesen növelve az egyes csatornák modulációs mélységeit a harmadrendű intermodulációs termékek teljesítménye a harmadik hatvány szerint növekszik, és miután ezek kiemelkednek a zajból a jel-zaj viszonyt rontani kezdik. Ezért a dinamika tartomány határát szokás úgy értelmezni, hogy a zajtól addig a kimenő jelszintig tart, mikor két egyforma vivővel történő moduláció esetén a harmadrendű intermodulációs termékek megegyeznek a zajszinttel. Ennek a neve SFDR (Spurious Free Dynamic Range), mértékegysége dB/Hz^{3/2}.

Ilyen két jeles SFDR méréseket végeztünk hagyományos 1300 nm-es oldalsugárzó, és 850nm-es VCSEL lézereken. A hullámhossz különbség nem tette lehetővé ugyanazon fotodetektor alkalmazását, továbbá 1300

nm-en egymódusú, 850 nm-en többmódusú szálát használtunk. Mindezen körülmények azért fontosak, mert a lézerek viselkedését jelentősen befolyásolja a lézerbe visszajutó optikai reflexió a szálvégekről, fotodetektor felületéről vagy csatlakozókról. A két oldalsugárzó lézer egyike Fabry-Perot, másika DFB típusú multi kvantumvölgyes (MQW) lézer volt, melyek egyazon technológiával készültek.

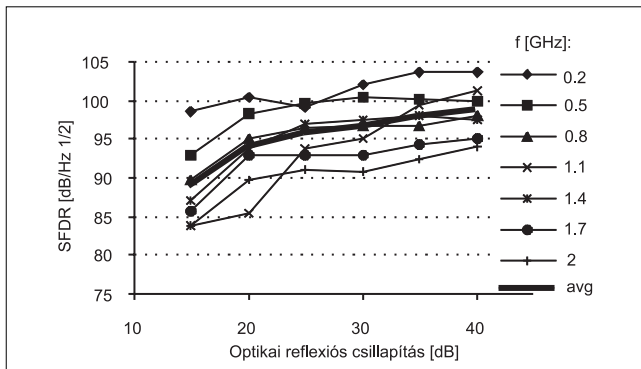
A mérési eredményeket a 3. ábra foglalja össze ahol a moduláló frekvencia függvényében láthatjuk az SFDR értékeket. A félvezető lézerekben a legfontosabb nemlineáris jelenség a relaxációs oszcilláció, melynek frekvenciájához (ROF, Relaxation Oscillation Frequency) közeledve mind a zaj, mind a modulációs torzítás emelkedik. Ezért növekvő frekvenciával csökkenő dinamika tartományt kapunk és egyben azt is jelzi, hogy a magas ROF alacsony frekvenciájú alkalmazásokban is fontos.



3. ábra Különböző lézerek mért dinamika tartománya

Az optikai reflexió a lézerciódák működését hátrányosan befolyásolja, mivel a visszajutó fény-hullám perturbálja a lézer belső térerősség viszonyait. Már kis reflexió is a lézer zajának emelkedéséhez és a linearitás romlásához vezet. A 4. ábra 1300nm-en működő Fabry-Perot lézeren végzett mérési eredményeket mutat. VCSEL-ek esetében a helyzet hasonló, de mivel itt a tipikus működési tartomány 850nm, a probléma megoldására optikai izolátor alkalmazása nehézkes. A mérések azt mutatják, hogy legalább 40dB reflexiós csillapítás szükséges ahhoz, hogy a lézerek megközelítsék maximális dinamika tartományukat.

4. ábra Optikai reflexió hatása a lézer dinamika-tartományra



A 3. ábra VCSEL méréseinél ezt nem tudtuk biztosítani, ezért a valóságos SFDR magasabb, ahogy erre az irodalomban is található példát [4]. Esetünkben a VCSEL-ek dinamika tartománya alulmaradt a hagyományos élsugárzó lézerekhez képest, azonban a mért 95 dB/Hz^{3/2} körüli érték a legtöbb alkalmazás számára elegendő. A IEEE 802.11b (wireless LAN), 2.5 GHz-en 94 [5], míg egy π/4 DQPSK-t használó PCS (personal communication system) 1900 MHz-en 72-83 dB/Hz^{3/2} [6] SFDR-t igényel.

VCSEL-ek modellezése

A VCSEL-ek működésének rate egyenleteken alapuló pontos modellezése eltér a hagyományos oldalsugárzó lézerekétől. (Homogén fényvezető szálban a fény terjedését a Maxwell egyenletekkel lehet meghatározni. Szabad töltéshordozókat is tartalmazó, veszteséges, diszperzív és nemlineáris közegben a fény jelenségeket rate egyenletekkel szokás leírni. A rate egyenletek levezethetők a Maxwell egyenletekből, de heurisztikus úton is megkaphatjuk, ha a lézer aktív területén a fotonok és elektronok kölcsönhatását vizsgáljuk. – Szerk. megj.)

Mivel ezek a lézerek egyetlen longitudinális, viszont általában több transzverzális módusban működnek, szükség van az aktív térfogatban zajló helyfüggő folyamatok figyelembe vételére. A már említett térbeli lyukbeégés leírása megköveteli, hogy a töltéshordozó sűrűség változását a hely függvényében is ismerjük. Ez azt jelenti, hogy az egyenletekben a töltéshordozó sűrűséget, szemben a hagyományos lézerekkel, nem kezelhetjük egyszerű számként, hanem csak helyfüggvényként. Továbbá az optikai intenzitás helyfüggése is más és más a különböző módusokban, ahogy azt a 2. ábra bemutatta. Ezért az intenzitás helyfüggését is figyelembe kell venni és külön egyenletet írni minden optikai módusra, használva a modális erősítés fogalmát [7]. Mindezeket figyelembe véve a következő rate egyenletekből indulhatunk ki:

$$\frac{dn_e(t, \underline{r})}{dt} = \frac{i(t, \underline{r})}{q} - \frac{n_e(t, \underline{r})}{\tau_e} - v_g \cdot g(t, \underline{r}) \cdot n_p(t, \underline{r}) \quad (1)$$

$$\frac{dN_{p,i}}{dt} = v_g \cdot g_i \cdot N_{p,i} + \beta \cdot \frac{N_e}{\tau_e} - \frac{N_{p,i}}{\tau_p} \quad (2)$$

n_e a töltéshordozó sűrűség, t az idő, \underline{r} a helyvektor, i a pumpáló áram, q az elektron töltése, τ_e az elektronok átlagos élettideje, v_g a csoportsebesség, g az optikai erősítés, n_p a fotonok sűrűsége, $N_{p,i}$ a fotonok száma az i -edik módusban, g_i az i -edik módus modális erősítése, β a spontán emissziós faktor, τ_p a fotonok átlagos élettideje, N_e pedig az elektronok száma az aktív rétegben és kifejezhető n_e -vel. A két egyenletben $g(t, \underline{r})$ és g_i kifejezhető $n_e(t, \underline{r})$ és $n_p(t, \underline{r})$ segítségével, $n_p(t, \underline{r})$ pedig megkapható a módusfüggvények és $N_{p,i}$ ismeretében. Az i index azt jelzi, hogy fotonokra vonatkozó egyenlet-

ből annyi van, ahány módus lehetséges. Az egyenlet rendszer megoldása a tér diszkrétizálása után numerikusan lehetséges, azonban meglehetősen hosszadalmas. Bonyolult vizsgálatok pedig, mint például intermoduláció vizsgálata, napokig tartó számításokat igényel. Ezért olyan megoldást kerestem, amely lehetővé teszi a probléma másképpen történő megoldását.

Áramkör szimulátorok rendkívül hatékonyan oldják meg az elektromos hálózatokat leíró differenciál egyenlet rendszereket, ráadásul könnyen választhatunk a sokféle vizsgálati módszer, mint DC, AC, tranziens analízis, vagy harmonic balance (keverés, intermodulációk frekvencia tartományban való vizsgálata) közül. Ezért elvégeztem a fenti egyenletek elektromos ekvivalenséne megalkotását.

A fő gondot az jelenti, hogy míg egy áramköri szimulációban vagy csak az idő, vagy csak a frekvencia lehet független változó, a fenti problémában a térbeli koordináta is kell. A probléma áthidalását az teszi lehetővé, hogy az optikai intenzitás helyfüggését módusonként előre ismerjük és időfüggetlennek tekinthetjük. Ugyanezt meg kell tenni a töltéshordozó sűrűség helyfüggésével is, azaz a töltéshordozó sűrűséget előre kiválasztott, korlátozott elemű függvénysor segítségével kell leírni:

$$n_e(t, r) = \sum_j n_{e,j} \cdot \Phi_j(r) \quad (3)$$

ahol $\Phi_j(r)$ valamilyen helyfüggvények, $n_{e,j}$ pedig azok időfüggő amplitúdói. Így szeparáltuk a hely és időfüggést. Az r helyvektorról áttérhetünk egyszerű radiális koordinátára, mert az aktív réteg nagyon vékony és ezért a töltéshordozó eloszlás vertikális irányban nem változik, a szög szerinti függéstől pedig az egyszerűség kedvéért eltekintünk.

Ha a $\Phi_j(r)$ függvények ortogonálisak, akkor az (1) elektronokra vonatkozó egyenlet szeparálható j darab egyenletté, hasonlóan a fotonokra vonatkozó egyenletekhez. Ehhez egyenként meg kell szorozni az egyenletet a $\Phi_j(r)$ bázisfüggvényekkel és integrálni kell a tér felett. A keletkező integrálokból kihozhatók a csak idő-

függő amplitúdók és csak helyfüggetlen integrálok maradnak. Ezek előre kiszámíthatók, hiszen mind a foton eloszlások, mind az elektron eloszlás bázisfüggvények ismertek, így az integrálok a további számítások szempontjából konstansok. Végezetül egy olyan egyenletrendszert kapunk ami i db foton és j db elektron egyenletről áll, és matematikailag helyfüggetlenek:

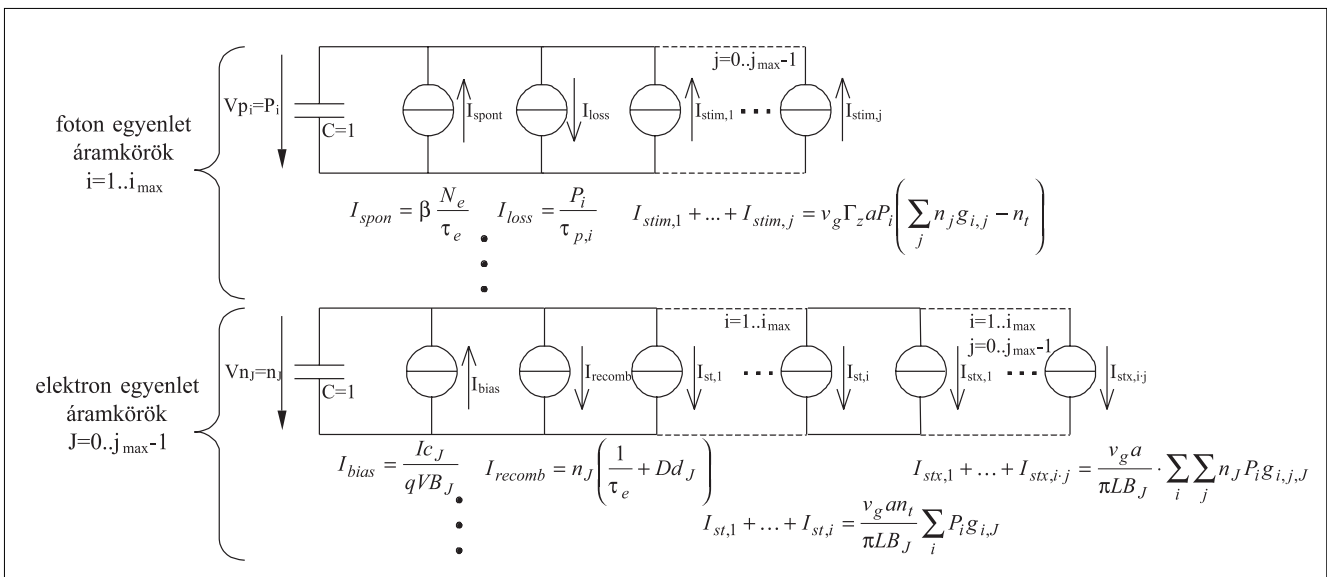
$$\frac{dN_{p,i}}{dt} = v_g \Gamma_z a N_{p,i} \left(\sum_j n_{e,j} g_{ij} - n_t \right) + \beta \cdot \frac{N_e}{\tau_e} - \frac{N_{p,i}}{\tau_p} \quad (4)$$

$$\frac{dn_{e,j}}{dt} = \frac{I \cdot c_j}{q \cdot B_j} - \frac{n_{e,j}}{\tau_e} - \frac{v_g a}{\pi L B_j} \cdot \sum_i \sum_j n_{e,j} \cdot N_{p,i} \cdot g_{i,j,j} + \frac{v_g a \cdot n_t}{\pi L B_j} \sum_i N_{p,i} g_{i,j} \quad (5)$$

A $g_{i,j}$ és $g_{i,j,j}$ konstansok térbeli integrálok eredményei, és a foton illetve elektron eloszlás függvények átlapolódásának mértékét fejezik ki. A c_j konstansok az injektáló áram és az elektron eloszlások átlapolódása, a B_j konstansok pedig normalizáló konstansok. L a rezonátor longitudinális hossza, Γ_z a longitudinális confinement faktor, a pedig optikai erősítés konstans (differenciális erősítés). Az egyenleteket $N_{p,i}$ és $n_{e,j}$ -re kell megoldani, melyek az elmondottak értelmében mind időfüggő amplitúdókat jelentenek.

A VCSEL-ek működésében fontos még a diffúzió figyelembe vétele. Ahol az optikai intenzitás, azaz a stimulált emisszió gyakorisága nagy, ott a töltéshordozók száma lecsökken, ezt hívjuk térbeli lyukbeégésnek. Az elektronok diffúzióból eredő laterális mozgása ezt a lyukat betölteni igyekszik, amit mindenképpen figyelembe kell venni. Ez a $\Phi_j(r)$ függvények ügyes választása esetén megtehető, csupán az elektronok egyenlete bővül ki egyetlen $-n_{e,j}/(\gamma_j/R)^2$ taggal ahol γ_j és R szintén helyfüggésből eredő konstansok.

5. ábra
VCSEL többmódusú működésének áramköri modellje a térbeli effektusok figyelembevételével



A VCSEL-ekre vonatkozó rate egyenletek imént ismertett átírása először [8]-ban található, azután mások is alkalmazták egyszerűbb esetekre és sokszor hibásan, nem kellő matematikai megalapozottsággal.

A (4)-(5) egyenletek áramköri megfelelőjét úgy kapjuk, ha az $n_{e,j}$ töltéshordozó sűrűség amplitúdókat és az $N_{p,i}$ fotonszámokat feszültségekné feleltetjük meg, az egyenletek jobb oldalán szereplő tagokat (amik a keletkezési gyakoriságok, rate-ek) pedig áramoknak. Az egyenletek bal oldalán így egy feszültség deriváltja szerepel, ami egyenlő az egyenletek jobb oldalán szereplő sok tag összegével, tehát áramok összegével. Ezek az áramok ráadásul függenek más egyenletek bal oldalán található feszültségeitől, tehát feszültség vezérelt áramgenerátorok.

Összességében az egyenletek áramköri ekvivalense az 5. ábra szerinti lesz. Az ábrán i_{max} a lehetséges optikai módusok száma, j_{max} az figyelembe vett töltéshordozó sűrűség eloszlás bázisfüggvények száma. Ez minél nagyobb, annál pontosabb eredményt kapunk, viszont rohamosan nő az részáramkörök, és azokban az áramgenerátorok száma.

A most vázlatosan bemutatott módszer a matematikai probléma helyfüggetlenné tételére és az áramköri ekvivalens megalkotására ugyan erre a speciális esetre történt, de az elv általános és más problémák áramköri megközelítésére is alkalmas lehet.

Az EU COST keretprogramjának keretében mód nyílt a modell által szolgáltatott eredményeket más modellek eredményeivel összehasonlítani. Így meggyőződhetünk a modell helyes működéséről, gyorsaságáról és rugalmasságáról. A szimulációkat az APLAC szimulátor program segítségével végeztem, melyben FOR ciklusok használatával tetszőlegesen nagy létra hálózatok is pár sorban definiálhatók, az integrálási konstansokat pedig szimuláció előtt beolvassa. A szimuláció bemenő paraméterei anyagi konstansok, a lézer struktúrájának paraméterei, valamint j_{max} . Ezekből kiszámításra kerülnek a $g_{i,j}$ és $g_{i,j,j}$, c_j és B_j konstansok miután bármilyen, bármennyi szimuláció gyorsan lefuttatható.

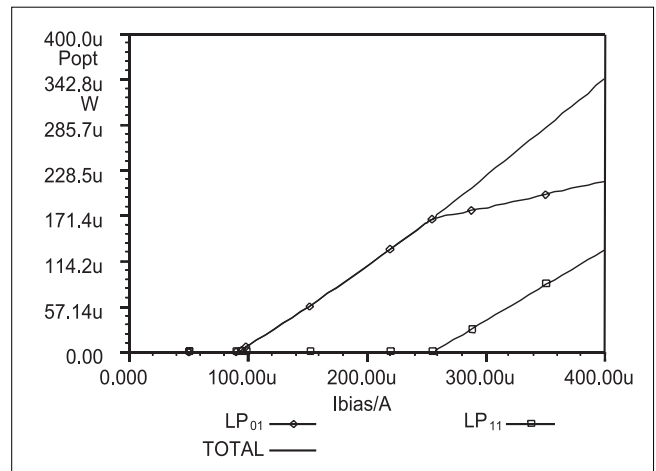
A most következő szimulációs eredmények a COST együttműködés bemenő paramétereivel készültek [9]. Két optikai módus volt lehetséges, j_{max} -nak pedig 11-et választottam, ami már igen pontos eredményeket szolgáltatott.

Statikus vizsgálat, DC analízis

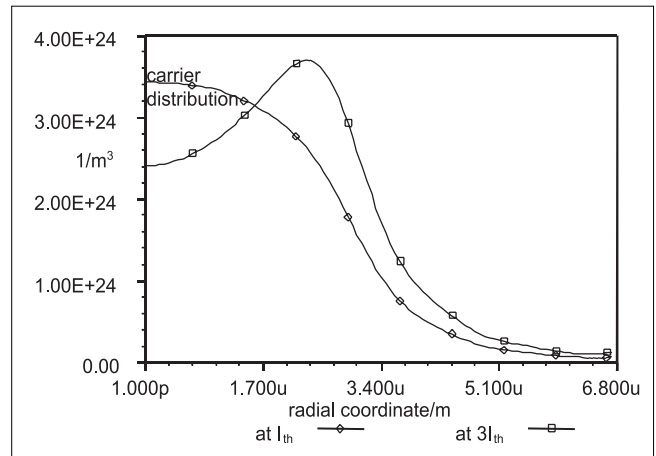
A DC analízis eredményét a 6. ábra mutatja. A lézer pumpáló áramát változtattam 0-tól 400µA-ig 1µA-es lépésközzel, minden pontban elvégezve a DC analízist. Az ábrán az látható, hogy a lézerműködés megindulása az LP₀₁ módussal kezdődik $I_{th} = 95µA$ környékén, ami szokatlanul kis küszöbáram az oldalsugárzó lézerekhez képest. Az áram növekedtével az alaplómódus intenzitása egyre nő, és az intenzitás maximumánál a töltéshordozó sűrűség lokálisan lecsökken (térbeli lyukbeégés).

A töltéshordozók diffúziója és az áram injektálása fenntartja a módust, azonban a kisebb intenzitású helyeken a töltéshordozó sűrűség erősen megnő az árammal, ahogy ezt a 7. ábra is mutatja. Ez növeli a második módus és a töltéshordozó sűrűség átlapolódását, míg végül az is elegendő erősítést nyer és beindul $I_{th2}=260µA$ környékén.

Érdekes még azt megfigyelni, hogy az áram injektálása $r_a = 3µm$ sugárig történt, ugyanakkor az ábrán is látható, hogy jelentős töltéshordozó sűrűség van jelen $r > 3µm$ tartományban a diffúzióknak köszönhetően. Ez szintén hozzájárul a magasabb rendű módus működéséhez (az átlapolódás mértékében), valamint azt is bizonyítja, hogy a modellben a diffúzió implementálása sikeres volt.



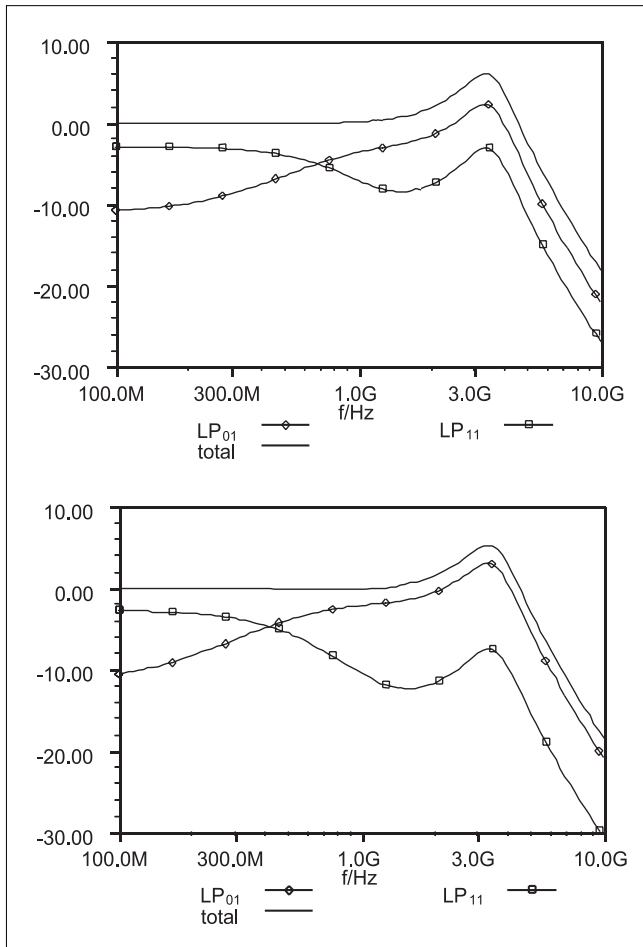
6. ábra DC szimuláció eredménye. Az optikai teljesítmény alakulása a különböző módusokban



7. ábra DC szimuláció eredménye. A töltéshordozó sűrűség alakulása a radiális távolság függvényében az LP₀₁ és az LP₁₁ módus indulásának közelében ($\sim I_{th}$ és $\sim 3 \cdot I_{th}$)

Kisjelű, dinamikus vizsgálat

A szimulációhoz olyan munkapontot választottam, amelyben már mindkét módus működött: $I=400µA$ -t. A módusokra és a teljes optikai teljesítményre vonatkozó szimulált átviteli függvényeket a 8. ábra mutatja két kü-



8. ábra AC szimuláció eredménye.
 $D=10 \cdot 10^{-4}$ (fent) és $D=15 \cdot 10^{-4}$ (lent)

lönböző diffúziós állandó mellett. Kis frekvenciákon az átvitelhez inkább a magasabb, LP_{11} módus járul hozzá, ami érthető, hiszen a DC szimuláció is azt mutatta, hogy a második módus differenciális meredeksége nagyobb. Aztán egy bizonyos frekvencia felett a második módus válasza kezd gyengülni, és az alpmódus válasza felerősödik. Ennek a frekvenciának az értéke a diffúziós állandótól függ, $D=10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ esetén 700 MHz körül van, $D=10 \cdot 10^{-4}$ esetén 450 MHz körül, tehát 3/2-szeres állandónál a frekvencia a 2/3-ára esik. Az történi, hogy bizonyos modulációs frekvencia felett a második módus nem tud töltéshordozókat nyerni a diffúziós folyamatból, mivel azt a modulációs sebességet a diffúzió már nem tudja követni.

Így az az érdekes jelenség áll elő, hogy nagy frekvenciákon a optikai teljesítmény-áram görbéből kiolvasható differenciális meredekségben gyökeres változás áll be. Az teljes optikai teljesítményt a jelenség nem befolyásolja, hiszen a beinjektált töltéshordozók mindenképpen hozzájárulnak a stimulált emisszióhoz, ha tudnak diffundálni akkor a második módust erősítve, ha nincs rá idejük, akkor az elsőt.

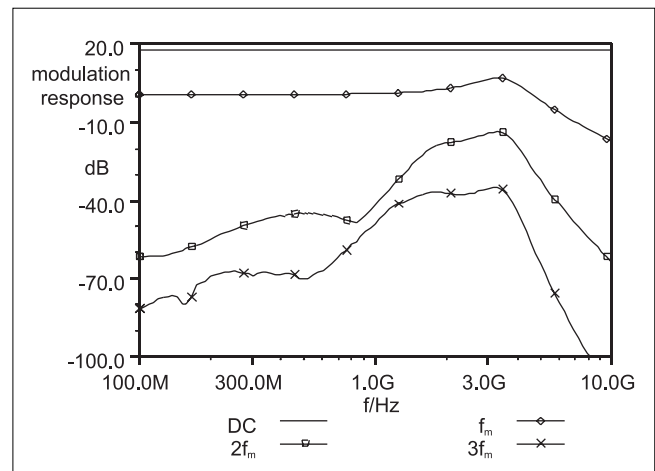
A gyakorlatban ez a jelenség akkor okozhat problémát, ha az optikai átvitelben módus szelektív elem van. Tipikusan ilyen lehet a lézer-üvegszál csatlakozás, vagy egy rossz csatlakozó.

Torzítás vizsgálat, harmonic balance analízis

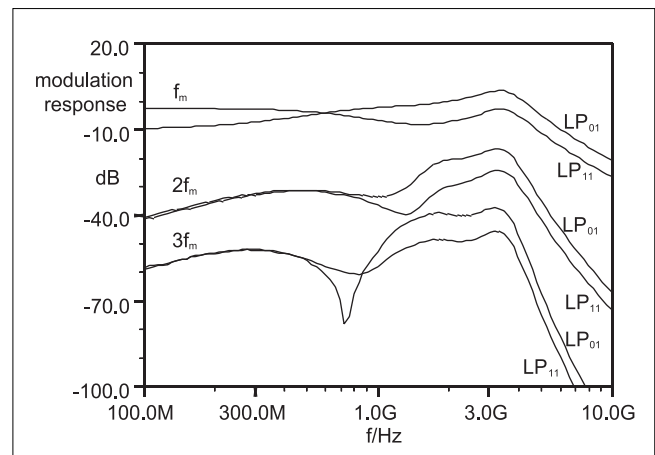
A legérdekesebb eredményeket a 9. és 10. ábra mutatja, ami harmonic balance szimuláció eredménye.

A görbék a harmonikusok szintjének alakulását mutatják tiszta szinuszos gerjesztés esetén. A moduláló jel frekvenciája f_m , amplitúdója $I_{\text{bias}}/10$ volt, a lézer munkaponti árama $I_{\text{bias}}=3I_{\text{th}}$.

A moduláló jel első öt harmonikusa került figyelembe vételre, de csak a második és harmadik került ábrázolásra, mivel ezek a meghatározóak a lézerek alkalmazásakor. Ezek szintje ugyanis egyértelmű viszonyban áll a lézer nemlineáris karakterisztika másod- és harmadfokú tagjának együtthatójával és így egyértelműen utalnak az intermodulációs termékek szintjére is.



9. ábra
 Harmonic balance szimuláció,
 a harmonikusok szintjének alakulása szinuszos modulációnál



10. ábra
 Harmonic balance szimuláció,
 a harmonikusok szintjének alakulása az egyes módusokban

Látható, hogy a lézerek nemlinearitása növekszik a relaxációs oszcilláció felé közeledve, ahogy ezt a mérések is mutatták. A diffúzió hasonló módon befolyásolja a harmonikusokat, mint az alapharmonikust, tehát

bizonyos frekvencia felett az LP_{11} módus intenzitása alá esik az LP_{01} -nek. Az alapharmonikus átviteli függvénye megegyezik a kisjelű analízisnél kapottal, ami megnyugtató.

Érdekes észrevételt tehetünk, ha megnézzük a kapott számokat. A második harmonikus ($2f_m$) görbéi a 10. ábrán -40dB szintről indulnak, míg ha megnézzük a 9. ábrát, ahol a két módus összteljesítménye látszik, -60dB körüli szintet látunk. Ez azt jelenti, hogy a két módus intenzitása kvázi ellenfázisban adódik össze a második harmonikus frekvenciáján.

Hasonló igaz a harmadik harmonikusra és mindez nem igaz az alapharmonikusra. A jelenség a diffúziós határfrekvencia felett megszűnik, és a harmonikusok szintje, tehát a torzítás hirtelen megnő. A diffúzió határfrekvenciája környékén mély leszívás látható a harmadik harmonikus LP_{01} görbéjén, amit általában a relaxációs oszcilláció, és az SHB mint nemlineáris hatások ellenfázisú működésének tulajdonítanak [10]. Azonban az LP_{11} módusban a dolog nem ugyanúgy történik, ezért az eredő harmonikus szintben ez a leszívás már alig jelenik meg, a mérésekben pedig egyáltalán nem.

Összefoglalás

A bemutatott szimulációs eredmények jól mutatják, hogy az itt bemutatott VCSEL modell képes számot adni sok, térbeli effektusokból eredő újszerű jelenségről. A modell rugalmasan bővíthető és gyors, elve alkalmazható más problémák áramkört szimulációjánál is.

A szimulációk azt mutatták, hogy a VCSEL-ek módusai nem egyformán viselkednek, ami alkalmazásuk esetén gondot jelenthet, például egy módus szelektív optikai elem jelenléte esetén. Tipikusan ilyen lehet a lézer fényének üvegszáliba való csatolása. Nagy teljesítményű, egymódusú VCSEL lenne tehát kívánatos, de amint azt a mérések is mutatták, a többmódusúak is jó paramétereket mutathatnak az alkalmazásokban.

Irodalom

- [1] T. Marozsak, E. Udvarý, T. Berceli:
A combined optical-wireless broadband Internet access: transmission challenges, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp.997-1000, vol., May 2001.
- [2] Asa Haglund et al:
Single Fundamental Mode Output Power Exceeding 6mW in VCSELs with a Shallow Surface Relief, will be published in IEEE Photonics Technology Letters, February 2004.
- [3] T. Marozsák, A. Kovács, E. Udvarý, T. Berceli:
Direct Modulated Lasers in Radio Over Fiber Applications, MWP2002 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Techn. Digest, pp.129, Japan, 2002.
- [4] Christina Carlsson et al:
Analog Modulation Properties of Oxide Confined VCSELs at Microwave Frequencies, Journal of Lightwave Technology, vol.20, Sept. 2002.
- [5] C. Faulkner:
RFIC Design Challenges for WLAN and 3G Systems, Microwave Eng., pp.23-28, Jan/Feb 2003.
- [6] J. C. Fan et. al.:
Dynamic Range Requirements for Microcellular Personal Communication Systems Using Analog Fiber-Optic Links, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.45, pp.1390, 1997.
- [7] L.A. Coldren, S.W. Corzine:
Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, Wiley & Sons Publication, 1995.
- [8] K. Moriki, H. Nakahara, T. Hattori, K. Iga:
Single transverse mode condition of surface-emitting injection lasers, Electron. Commun. Japan, Part 2, vol.71, pp.81-90, 1988.
- [9] <http://www.ele.kth.se/COST268/WG1/DynVCSELTask/WGExercise2.html>
- [10] J.S. Gustavsson et al:
Harmonic and Intermodulation Distortion in Oxide-Confined Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers, IEEE J. of Quantum El., vol.39, Aug. 2003.

Hírek

„Negyedik Magyar WDM Workshop”

A tervek szerint 2005. februárjában ismét megrendezésre kerül a kétévenként ismétlődő konferencia. Az egynapos konferencián meghívott neves külföldi előadók mellett számítunk a magyar előadókra is. A konferenciára az optikai eszközökről, berendezésekről, korszerű hálózati technológiákról szóló előadásokat várnak.

A konferencia kiemelt témája lesz az IP és az optikai réteg integrációja, valamint az ASON és a GMPLS.

Hullámhossz konverzió megvalósítása félvezető optikai erősítők felhasználásával

KOVÁCS GÁBOR PH.D. HALLGATÓ

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
gabor.kovacs@mht.bme.hu

Reviewed

Kulcsszavak: WDM, félvezető optikai erősítők, hullámhossz konverzió

Hullámhossz konverzió megvalósítására alkalmas eszköz kifejlesztése a WDM alapú optikai hálózatok hatékony kihasználásának egyik fontos kérdése. Követelmény ezen eszközökkel szemben az, hogy legyenek képesek az optikai csatorna hullámhosszának megváltoztatására az optikai tartományban. A cikkben rövid áttekintést adunk a lehetséges megoldási módzerekről, azok jellemzőiről és alkalmazhatóságáról, valamint az egyik ígéretes módszer paramétereinek vizsgálatáról.

WDM hálózatokban az útvonalak megfelelő kialakíthatósága, valamint a csatornahullámhosszak egyes linkeken történő ütközésének elkerülése érdekében szükség van arra, hogy egy adott csatorna a különböző linkeken más és más hullámhosszon kerüljön továbbításra, vagyis elengedhetetlen az átvitel során a hullámhossz átalakításának megoldása. A ma alkalmazott egyedüli lehetséges módszer az optikai-elektromos átalakítást használó hullámhossz konverterek. Egy ilyen berendezés tulajdonképpen nem tesz mást, mint hogy elektromossá alakítja a vett optikai jelet (elektromosan regenerálja) és a kimeneten az optikai szálra bocsátja egy új hullámhosszon. Előnye, hogy kiforrott technológiájú és kereskedelmi forgalomban is elérhető; hátránya, hogy nem nevezhető optikailag transzparens megoldásnak, hiszen egy teljes elektronikus szakaszt ékel két optikai link közé, aminek működése kódolás-függő. További korlátja, hogy a működési sebesség felső határát az elektronikus egység működési sebessége határozza meg.

A tisztán optikai megoldások vizsgálata több figyelmet érdemel, mivel ezek – bár jelenleg még kevésbé kiforrott módon állnak rendelkezésre – a teljesítményterületén jóval ígéretesebbek [1,2]. A cikk első részében a félvezető optikai erősítőt (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) alkalmazó konverzió lehetséges megoldásait tekintem át, majd a második részben az egyik lehetséges módszer, a cross-gain moduláció megvalósíthatósága kerül részletesebben bemutatásra.

Hullámhossz konverziós módszerek

Számos követelményt támasztunk a hullámhossz konverterekkel szemben. A mindig növekvő átviteli igények kielégítése érdekében nagy sebességen kell üzemelniük, és a minél nagyobb áthidalható távolság érdekében kaszkádba kapcsolhatónak kell lenniük. További elvárások a berendezésben található részegységek alacsony száma (lehetőleg legyen egy chipbe integrálva), az alacsony teljesítményfelvétel, valamint a kimeneti hullámhossz gyors hangolhatósága.

Kapuzó módszerek

Ezzel az összefoglaló névvel azon megoldásokat illethetjük, melyek esetében egy külső forrás biztosítja az új hullámhosszú, folytonos intenzitású jelet, amit a félvezető optikai erősítő fog modulálni a bemenő jel valamely jellemzőjének – tipikusan intenzitás – változásának függvényében, valamilyen fizikai jelenség kihasználásával. A legelterjedtebben kutatott megoldások kerülnek bemutatásra a következőkben.

Mint ismert, a félvezető optikai erősítők működésében kulcsszerepet játszik az erősítő közeg aktív rétegében a pumpálás hatására felhalmozott töltéshordozó inverzió, vagyis a többségében a gerjesztett energiaszinten tartózkodó elektronok populációja. Ez a populáció biztosítja a közeg átlátszóságát, illetve az indukált emisszió révén az áthaladó optikai jelet képviselő foton-nyaláb erősítését.

Az ebben a fejezetben bemutatásra kerülő módszerek esetében a bejövő információs jel mindig a populációinverzióra lesz hatással, és ezen keresztül éri el az új hullámhosszú folytonos jel modulációját.

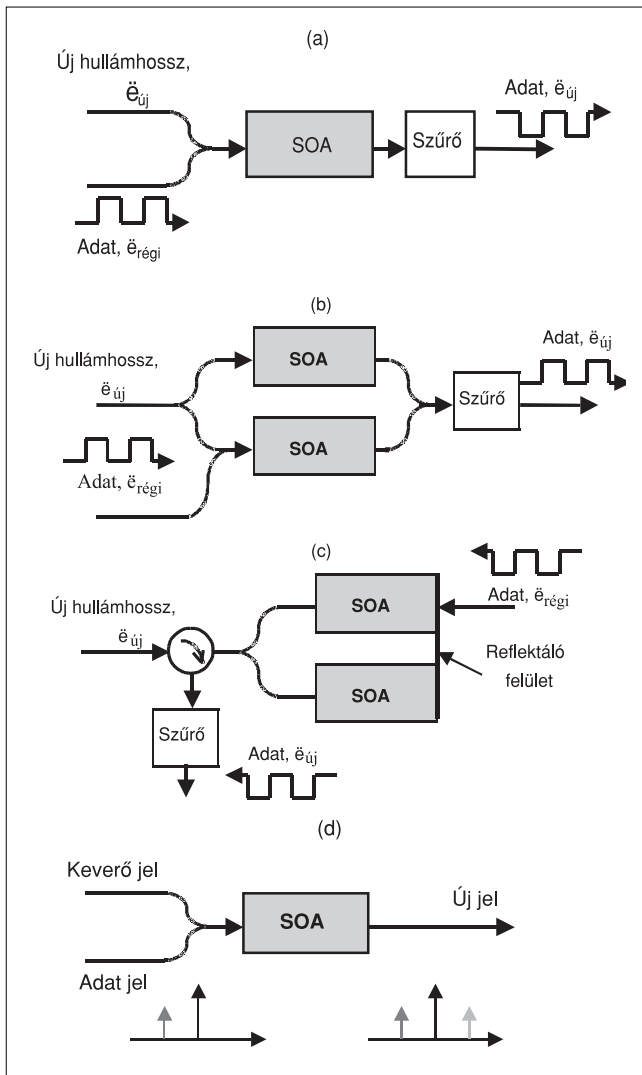
Kereszt-erősítéses moduláció (XGM)

A kereszt-erősítéses moduláció esetében a félvezető optikai erősítő erősítésértékének telítődését használjuk ki, arra alapozva, hogy a populációinverziót biztosító pumpáló forrás pumpálási sebessége és így az eszköz kimeneti teljesítménye véges.

Ennek következtében a telítési optikai teljesítménynél nagyobb bemenő teljesítmények esetén az erősítés lecsökken. Homogén erősítőközegről lévén szó ez a telítődés a teljes működési hullámhossztartományban bekövetkezik, így ez az erősítésváltozás érvényes az újhullámhosszú folytonos jelre is, melyet a régi, modulált jellel párhuzamosan vezetünk az eszközbe.

A konverter elrendezése az 1/a. ábrán látható.

Az információs jel intenzitásával fordítottan arányosan változik a SOA erősítése, és így módon külső modulátorként viselkedik az új jel számára.



1. ábra A különböző konverter megoldások blokkvázlata
 a) Kereszt-erősítéssel moduláció (XGM)
 b) XPM Mach-Zender interferométer
 c) XPM Michelson interferométer
 d) Hullámkeverés

A módszer előnye, hogy egyszerűen megvalósítható és működési sebessége 100 GHz-ig terjed. Hátránya, hogy nem teljesen transzparens, hiszen csak az intenzitásmodulált jeleket tudja konvertálni, hangolható optikai szűrőre van szükség a régi hullámhossz eltávolítására, valamint invertálja a jelet (bár ez utóbbi két tulajdonsága speciális kétlépcsős megoldással elkerülhető), illetve nehézséget jelenthet, hogy a beérkező régi jel intenzitását olyan szintre kell erősíteni, hogy az telítésbe tudja vinni az erősítőt. Erről az átalakítási módról a későbbiekben még részletesebben szólnunk [3,4,5].

Kereszt-fázis moduláció (XPM)

Ebben az esetben az új jel modulációját egy interferométer két ágában elhelyezett félvezető optikai erősítő pár végzi. Az interferométer egyik ágába vezetjük a régi jelet, ami a populációinverzió keresztül törésmutató változást okoz az eszközben. Ez terjedési-idő változást fog eredményezni ebben az ágban, amit az interferometrius elrendezés intenzitásmodulációvá fog

alakítani. Az interferométerek tipikusan Mach-Zender vagy Michelson elrendezésűek, ahogy azt az 1/b. és 1/c. ábrák mutatják.

A kereszt-erősítéses modulációval összehasonlítva az interferométer használata azzal az előnnyel jár, hogy javítja a jel minőségét a chirp és az kioltási tényező tekintetében. A kompakt felépítés és a stabil működés elérése érdekében ajánlott a Mach-Zender interferométer két félvezető optikai erősítőt egy chip-re integrálni, hiszen így a két erősítő azonos feltételek között működhet [6,7,8,9].

A működési sebesség ebben az esetben is 100 Gbit/s-os tartományba vihető, de laboratóriumi körülmények között 168 Gbit/s sebességet is demonstráltak már.

Kereszt-polarizáció moduláció (XPoIM)

A kereszt-polarizáció moduláció egy új, érdekes megoldás, ahol a polarizációs állapot megváltoztatásával érhetünk el modulációt az új hullámhosszú jelen [10].

Ebben az esetben azt használjuk ki, hogy egy polarizációs sugárosztó (Polarisation Beam Splitter – PBS) segítségével szűrhetjük az áthaladó optikai jelet a nyaláb polarizációs állapotának függvényében. A régi hullámhosszú jelnek ez esetben is intenzitásmodulálnak kell lennie.

Kiindulásképpen az újhullámhosszú folytonos jelet átvezetjük a félvezető optikai erősítőn, és polarizációban illesztjük a PBS-hez, hogy azt teljesen átengedje. Ezután a régi jelet is bevezetjük a SOA-ba. A jel intenzitásváltozása változtatja az erősítő kettőtörő együtthatóját és ezáltal az új jel polarizációját, melynek következtében a PBS szűrni fogja a megváltozott polarizációs állapotú új jelet, ami intenzitásmodulációt eredményez a kimeneten.

Ezzel a módszerrel jobb kioltási tényező érhető el, mint XGM esetén, azonban ez jóval bonyolultabb megoldás, és a polarizációillesztés igénye nehezzé teszi az automatikus alkalmazhatóságát.

Hullámkeverési módszerek

A bevezetőben említett igény a tisztán optikai konverzió megvalósítására nem szinonimája a transzparens átvitel fogalmának. Bár az előző alfejezetben bemutatott megoldások tisztán optikai megoldások, nem nevezhetők transzparensnek, mivel nem őrzik meg az átvitt optikai jel minden jellemzőjét (fázis, polarizációs stb.), csupán annak intenzitását.

A hullámkeverési módszerek ezzel szemben a félvezető optikai erősítő nem-linearitását kihasználva a bemenő jelekből hozzák létre a kimeneti új hullámhosszú jelet (vagyis nincs szükség arra, hogy az új kimeneti hullámhossz bemeneti jelként szerepeljen), és megőrzik az átalakítandó jel minden jellemzőjét. Vagyis ha valamely bemeneti jel modulációs tartalommal rendelkezik, az meg fog jelenni a kimeneti jelben. A hullámhossz pedig a bemeneti hullámhosszak lineáris kombinációja lesz (1/d. ábra).

A keverésben résztvevő bemeneti jelek száma alapján beszélhetünk négy- és három-hullámkeverésről (Four-Wave Mixing – FWM, Three-Wave Mixing – TWM), valamint különbségi frekvenciagenerálásról (Difference Frequency Generation – DFG), attól függően, hogy hányadrendű nem-linearitást használunk ki a konverzió során. A ma ismert konverziós módszerek közül a hullámkeverés ad egyedül teljes transzparenciát. Ezen felül alkalmasak több egymástól független csatorna párhuzamos átalakítására, a működés pedig a 100 GHz fölött is lehetséges. Hátránya ugyanakkor az alacsony hatékonyság, mivel az optikai nemlineáris hatások jóval gyengébbek, mint az elektronikusak. Ezt ellensúlyozhatja az aktív eszköz használata.

XGM vizsgálat

Az általános áttekintés után vizsgáljunk meg egy konkrét módszert. A hullámhossz konverzió egyik legígéretesebb megvalósítási módja a keresztterősítéses moduláció, ezért ennek vizsgálata külön figyelmet érdemel. Számátalan paraméter vizsgálata közül kettő különlegesen fontos, melyek jelentősen meghatározzák működést és az átalakítás hatékonyságát.

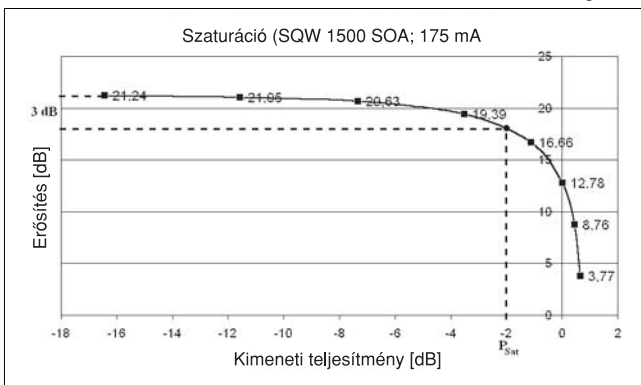
Telítődés jelenségének vizsgálata

A félvezetős optikai erősítő – cross-gain moduláció szempontjából – egyik legfontosabb sajátossága a telítés – idegen szóval: szaturáció – jelensége.

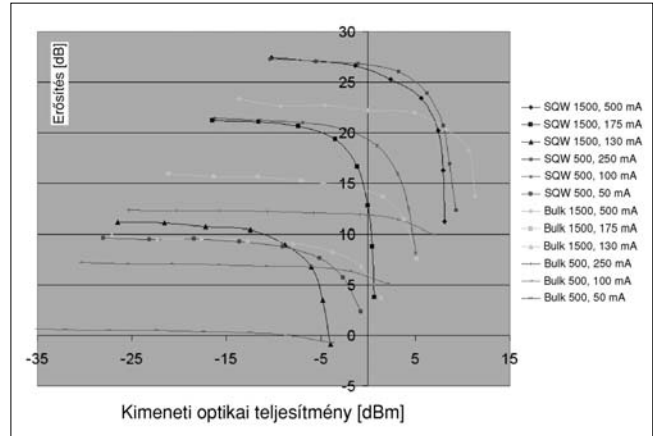
Mint az a korábbiakból kiderült, a populáció-inverzió külső pumpáló forrással hozható létre és tartható fent, mely állandó töltéshordozó mennyiséget juttat az eszközbe, és ezt a töltéshordozó populációt fogyasztja az erősítés folyamata. Amikor a bemeneti optikai teljesítmény nagy, akkor az erősítéshez is nagymennyiségű töltéshordozóra van szükség. A bemeneti optikai teljesítményt növelve létrejöhet tehát olyan állapot, hogy az erősítés jobban fogyasztja az eszközben jelenlevő töltéshordozó mennyiséget, mint ahogy azt a külső forrás pótolni tudja, vagyis a populáció-inverzió aránya és így az erősítés értéke is lecsökken.

Az erősítést a kimenő optikai teljesítmény függvényében ábrázolva kapjuk az eszköz telítési görbét, amit a 2. ábra tartalmaz.

2. ábra Telítési görbe



A görbén látható, hogy normál esetben az erősítő széles teljesítmény-tartományban közel konstans erősítéssel rendelkezik, majd elkezd telítődni. Azt a kimeneti optikai teljesítmény szintet, amelynél az erősítés mértéke a maximálisnál 3 dB-lel kisebb, *kimeneti telítési teljesítménynek* (szaturációs teljesítmény) nevezzük és P_{sat} -tal jelöljük. Azt a kimeneti teljesítményt pedig, aminek nagyobbát ez eszköz nem tud kiadni, maximális kimeneti teljesítménynek nevezzük.



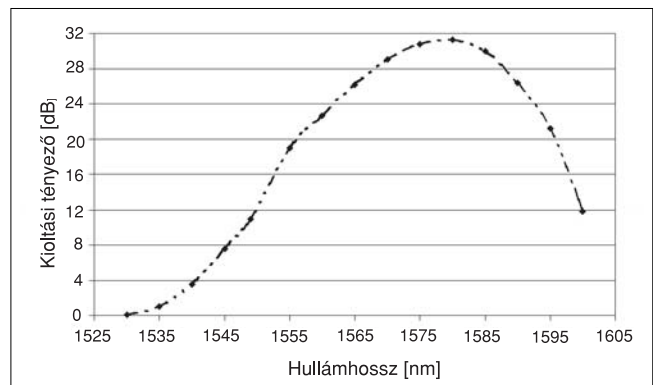
3. ábra Telítés mérése
Telítési görbék a különböző erősítőtípusokra a kimeneti optikai teljesítmény függvényében ($P_{be} = -28,75 \text{ dBm}$, $\lambda = 1552 \text{ nm}$)

Normál erősítőként való működés esetén a szaturációs teljesítmény minél magasabb értéke előnyös, hisz így nagyobb teljesítményszintig tud erősíteni az eszköz. Azonban keresztterősítéses moduláció megvalósítása esetén ennek éppen az ellenkezője igaz, ugyanis hogy minél alacsonyabb szintű jelek is átalakíthatóak legyenek, szükséges az alacsony kimeneti telítési teljesítményszint. Ez az eszköz félvezetős struktúrájának tervezésével befolyásolható. Az összehasonlító mérések eredményeit mutatják a 3. ábra görbéi, különböző erősítőtípusok és pumpáló áramértékek mellett.

Kioltási tényező vizsgálata

A működés szempontjából legfontosabb jellemző a telítési karakterisztikától is függő kioltási tényező hullámhosszfüggése. A mérés eredménye a 4. ábrán látható.

4. ábra A kioltási tényező hullámhossz függése



A hullámhosszfüggés magyarázata, hogy az erősítésben résztvevő atomi átmenet kiszélesedése véges, és emiatt véges az a hullámhossztartomány is, ahol indukált emisszió létrejöhet. A vizsgált erősítő a maximális kioltási tényezővel az 1575-1585 nm közötti tartományban rendelkezik, ahol a kioltási tényező 30 dB fölé is emelkedik. Ez nyilvánvalóan szoros kapcsolatban van az erősítés hullámhosszfüggésével, amit a félvezetős struktúra kialakításával lehet hatékonyan befolyásolni.

Magának a hullámhosszfüggésének a WDM rendszerekben való alkalmazhatóság szempontjából van szerepe. Elengedhetetlen ugyanis, hogy a majdani hullámhossz konverter berendezéseink a teljes WDM sávban megfelelően működjenek.

Szükséges néhány szót ejteni a működési sebességről, hiszen ez egy nagyon fontos tényező az alkalmazhatóság szempontjából. Az optoelektronikus hullámhosszátalakítók sebessége az elektronikus komponensek miatt, az előrejelzések szerint 40 GHz működési sebesség körül fizikailag korlátozottak. A vizsgált cross-gain moduláció esetén azonban félvezetős optikai erősítőket használunk. Ezeknek az eszközöknek a válaszüzeje a ~ps nagyságrendjébe esik, ami azt jelenti, hogy alkalmazásuk a 100 GHz körüli működési sebességig is lehetséges.

Ha ezen felül figyelembe vesszük, hogy gyakorlati megvalósítás esetén is viszonylag kisszámú komponenssel, egyszerű felépítésű eszközt építhetünk, akkor az ár tekintetében is bizakodóak lehetünk, hogy a technológia fejlődésével a ma még igen drága aktív optikai eszközök árai is elfogadható szintre csökkennek.

Összefoglaló

A félvezetős optikai erősítőket alkalmazó hullámhossz átalakítási módszerek az optikai távközlés gyorsan fejlődő, ígéretes területe. Mint láttuk, számos megközelítés létezik, melyek különböző előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek.

Kiforrott, kereskedelmi forgalomban kapható megoldást napjainkban még csak az optoelektronikus konverterek képviselik, de a növekvő sebességigényeknek hosszútávon csak a tisztán optikai megoldások tehetnek eleget. Hogy végül melyik megoldás lesz a gyakorlatban is befutó, azt a jövő és a piaci igények fogják eldönteni.

Irodalom

- [1] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S.L. Danielsen and K.E. Stubkjaer: „All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifier“, IEEE/OSA J.Lightwave Technol., vol.14, pp.942-952, 1996.
- [2] S. J. B. Yoo: „Wavelength conversion technologies for WDM network applications“, IEEE/OSA J.Lightwave Technol., vol.14, pp.955-966, 1996.
- [3] Derek Nasset, Tony Kelly, Dominique Marcenac: „All-Optical Wavelength Conversion Using SOA Nonlinearities“, IEEE Communications Magazine, December 1998, pp. 56-61.,
- [4] A. Carena, M. D. Vaughn, R. Gaudino, M. Shell, Daniel J. Blumenthal: „OPERA: An Optical Packet Experimental Routing Architecture with Label Swapping Capability“, JLT, vol.16, No.12, pp.2135-2145, Dec. 1998.
- [5] S.J.B. Yoo, Hyuek Jae Lee, Zhong Pan, Jing Cao, Yanda Zhang, Katsunari Okamoto, Shin Kamei: „Rapidly Switching All-Optical Packet Routing System With Optical-Label Swapping Incorporating Tunable Wavelength Conversion and a Uniform-Loss Cyclic Frequency AWGR“, PTL, vol.14, No.8, pp.1211-1213, 2002.
- [6] R.G. Broeke, J.J.M. Binsma, M. van Geemert, F. Heinrichsdorff, T. van Dongen, J.H.C. van Zantvoort, E. Tangdiongga, H. de Waardt, X.J.M. Leijtens, Y.S. Oei, M.K. Smit: „An All-Optical Wavelength Converter in a Layer-Stack Suitable for Compact Photonic Integration“, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, Amsterdam, pp.95-98, 2002.
- [7] J. Leuthold, G. Raybon, Y. Su, R. Essiambre, S. Cabot, J. Jaques, M. Kauer: „40 Gbit/s transmission and cascaded all-optical wavelength conversion over 1 000 000 km“, El. Lett., vol.38, No.16, pp.890-892, Aug. 2002.
- [8] Min-Yong Jeon, Dong Sung Lim, Hak Kyu Lee, Joon Tae Ahn, Do Il Chang, Kyong Hon Kim, Seung Beom Kang: „All-Optical Wavelength Conversion for 20-Gb/s RZ Format Data“, Photonics Technology Letter, vol.12, No.11, IPTLEL (ISSN 1041-1135) pp.1528-1530, Nov. 2000.
- [9] J. Leuthold, C.H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L., Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer, C.A. Burrus: „100 Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration“, Electronics Letters, vol.36, No.13, pp.1129-1130, June 2000.
- [10] Y. Liu, M.T. Hill, E. Tangdiongga, H. de Waardt, N. Calabretta, G.D. Khoe, H.J.S. Dorren: „Wavelength Conversion Using Nonlinear Polarization Rotation in a Single Semiconductor Optical Amplifier“, IEEE Photonics Technology Letter, vol.15, No.1, January 2003.

40 Gbit/s-os átviteli rendszerek alkalmazhatósági kérdései

JESZENŐI PÉTER

MATÁV Rt. PKI Távközlésfejlesztési Intézet
jeszenoi.peter@ln.mata.v.hu

Kulcsszavak: DWDM, SDH, fényvezető szál diszperziója, moduláció

A jelenlegi legnagyobb kapacitást biztosító DWDM rendszerek 40-160 darab 10 Gbit/s-os csatorna átvitelét teszik lehetővé. E látszólag óriási átviteli kapacitás ellenére a forgalom jelenlegi növekedési üteme arra enged következtetni, hogy a terepi kísérletek fázisában lévő 40 Gbit/s-os rendszerek bevezetését néhány éven belül Magyarországon is fontolóra kell vennünk. Cikkünkben a 40 Gbit/s-os rendszerek fejlesztésével és alkalmazásával kapcsolatosan felmerülő műszaki-technikai problémákat tárgyaljuk.

Bevezetés

Az ezredfordulóra jósolt telekommunikációs robbanás elmaradt, sőt a távközlési ipar ezekben az években egy mély válságot élt át. Ennek ellenére nem álltak meg, legfeljebb lelassultak azok a fejlesztések, amelyek a 40 Gbit/s-os átviteli rendszerek (STM-256, OC-768) megvalósítását vették célba. Az elmúlt években azt a folyamatot figyelhettük meg, hogy a TDM rendszerek átviteli kapacitása hozzávetőlegesen öt év alatt a négyszeresére emelkedett. Az elektromos tartományban történő időosztásos multiplexálási technikában a 10 Gbit/s-os rendszerek mára teljesen kiforrottnak tekinthető, számos gyártótól beszerezhető sztenderd terméké váltak. Az ötéves periodicitás mellett azt a tendenciát is megfigyelhettük, hogy az egy bitre jutó létesítési/fenntartási költségek az egyre nagyobb sebességű rendszerek bevezetésével folyamatosan és drasztikusan csökkentek. A gondolatmenetet követve a jelenleg a gyakorlati alkalmazásba vétellel kapcsolatos első kísérleteken túl lévő 40 Gbit/s-os rendszerek 2008 tájkára általánosan alkalmazott rendszerekké válhatnak. Ennek természetesen az is feltétele, hogy a korábban megfigyelt költségcsökkenési tendencia is megvalósuljon. Egyes jövőbelátó elemzések szerint a jelenlegi 10 Gbit/s-os rendszerek egy bitre vetített költségeihez képest 30-40%-os csökkenéssel számolnak [5, 8].

Az időosztásos multiplexálás mellett nagy áttörés következett be a hullámhossz multiplexálást (WDM) alkalmazó optikai átvitel területén. Sűrű hullámhosszozással (DWDM) az 1550 nm-es ablakban a mai rendszerekkel legalább 40 EDTM (Electrical Time Division Multiplexing) csatorna vihető át. Az optikai hálózatok területén kialakulóban van egy kétrétegű hálózat, ahol a felső rétegben szolgáltatás integráció történik elsősorban IP alapon, az alsó, fizikai rétegben pedig optikai cross connectekből (OXC) felépített szövevényen történik az átvitel. Ez az alapkonceptiója az ASON/GMPLS hálózatoknak [1, 2]. Az elektromos tartományban történő nagyobb sebességre multiplexálásnak (azaz a WDM

rendszerben egy optikai csatorna átviteli kapacitásának) az OXC-k költségghatékony kihasználása miatt van jelentősége.

Ugyanakkora optikai útvonal kapacitás kevesebb hullámhosszal, és nagyobb optikai csatorna sebességgel megoldva egyszerűbb optikai hálózatot eredményez (kevesebb interfész), bár a hálózat a kisebb granularitás miatt kevésbé lesz rugalmas. A kevesebb portszám a teljes hálózati költségeket is csökkenti, tehát a nagyobb sebességű összetevőket alkalmazó rendszerek egyszerűbb és olcsóbb hálózatot eredményeznek némileg alacsonyabb flexibilitással.

Mindazonáltal a jövő nagykapacitású hálózatainak nyereségességét és azok költségeinek megtérülését nagyon nehéz előre tervezni. Ezeknek a gerinchálózati, nagytávolságú rendszereknek a kihasználtsága nagyon erősen függ az előfizetőknél generálódó forgalomtól, az új szolgáltatások megjelenésétől, és a meglévő szolgáltatások továbbfejlődésétől. A kihasználtságot befolyásolja a lokális és a távolsági forgalom megoszlása, az új szolgáltatások generálta forgalom aszimmetriájának mértéke. A forgalom aggregálása helyi vagy városi szinten a közeli időszakban nem fogja meghaladni a GbE, 2,5 Gbit/s-os szintet, a nagytávolságú összeköttetésekben az aggregáció 10...40 Gbit/s szinten fog megvalósulni. Ez azt jelenti, hogy az optikai nyalábok a legkülönbözőbb bitsebességeket, kell hogy támogassák, az optikai transzparencia minél nagyobb távolságon történő megőrzése mellett.

40 Gbit/s-os átvitel meglévő optikai hálózaton

Nagy átviteli sebességre alkalmas szolgáltatói fényvezető hálózatok egymódusú fényvezetővel a '80-as évek végétől épültek nagy tömegben. Sok szolgáltató hálózatának domináns, nagy értékű részét képezik a '80-as évek végén '90-es évek elején építeni kezdett hálózatok. Az akkori idők elvárásainak megfelelően az

optikai szakaszokat különféle kódolású 140 Mbits/s-os PDH jelek átvitelének biztosítására méretezték. A felhasznált fényvezetőszálak az ITU-T G.652 ajánlásának megfelelő, 1310 nm átvitelére optimalizált szálak voltak. Az ismétlő szakaszok hossza ritkán haladta meg a 70 km-t. Később a '90-es végétől kezdődően ugyanerre az infrastruktúrára már 2,5 Gbit/s-os SDH rendszerek kerültek. Az ezredforduló után megjelentek a többhullámhosszas WDM rendszerek és a 10 Gbit/s. A bevezető mondatban említett „nagy átviteli sebesség” fogalom mögöttes jelentése folyamatosan változik a nagyobb és nagy tartományok irányába.

A 10 Gbit/s-os átviteli sebesség, de különösen a 40 Gbit/s merőben új kihívásokat jelent. Ezek a kihívások a különböző nemlineáris jelenségek okozta zavarokból, a diszperziós jelenségek kezeléséből, az optikai erősítőkkel szemben támasztott magasabb elvárásokból adódnak [4, 17]. A nagysebességű rendszerek szinte kivétel nélkül áttértek a mintegy 30%-kal alacsonyabb csillapítású 1550 nm-es ablak használatára, annak ellenére, hogy ebben az ablakban a kromatikus diszperzió értéke meglehetősen magas a legelterjedtebb szterdard egymódusú fényvezetőknél. A megnövekedett kromatikus diszperzió hatásának kiküszöbölésére a technika fejlődésével számos módszert fejlesztettek ki.

Ahogy azt eddig is tettük, a meglévő vonalszakaszainkat egy következő „sebességfokozaton” szeretnénk használni. Jelenleg 10 Gbit/s sebességen üzemelő rendszereinkhez képest a 40 Gbit/s-re történő fel lépéskor a négyszer nagyobb sáv szélesség miatt az optikai csatornánkénti szintet 6 dB-vel meg kell(ene) emelnünk, hogy megfelelő jel/zaj viszonyokat tudjunk a vevő részére biztosítani. A 10 G rendszerrel alkalmazott 0...+20 dBm szintekhez képest 6 dB szintemelés már nem lehetséges a Kerr-típusú nem lineáris jelenségek (négyhullám-keverés, önfázis- és keresztfázis moduláció) megjelenése miatt. Ha nem lehetséges a kívánt szintemelés, akkor jel/zaj viszony romlását egyéb módon kell kiküszöbölni. A vonali EDFA optikai erősítők okozta zaj például kisebb zajt termelő, a fényvezető szál mentén elosztott Raman erősítőkre történő cserével, kiváltással csökkenthető. További zajnyereség érhető el hatékony FEC (Forward Error Correction) algoritmus alkalmazásával. A Raman erősítők használatával kapcsolatban, a nagy teljesítőképességű FEC eljárások kidolgozására komoly fejlesztési munkák folynak az egyes műhelyekben. Az eredmények az általánosan elterjednek mondható 10 Gbit/s-os átviteli rendszerekben is kamatoztathatók.

A kromatikus diszperzió problémája

Minél nagyobb az átviteli sebesség, annál nagyobb mértékben befolyásolja az átvitel minőségét a kromatikus diszperzió (CD). A kromatikus diszperzió már a 10 Gbit/s-os rendszerekben is komoly problémákat jelent. A CD kompenzálására leggyakrabban alkalmazott nagy negatív diszperziójú kompenzáló szálak hálózatba épí-

tésével a fényvezető kábelek pozitív diszperziója kiegyenlíthető. 10 Gbit/s-os rendszereknél a vonalszakaszok ± 50 ps/nm mértékű kiegyenlítésével kiválóan működtethetők. Az egyre nagyobb sebességű rendszereknél a bitidő csökkenése miatt egyre hamarabb következik be a szomszédos impulzusok átlapolódása, ráadásul a nagyobb modulációs frekvencia hatására jobban kiszélesedik az adólézer spektruma. Ennek köszönhetően diszperzió-érzékenység közel négyzetesen növekszik a bitsebességhez képest. Így egy 40 Gbit/s-os rendszer hozzávetőlegesen 16-szor érzékenyebb a diszperzióra, mint egy 10 Gbit/s-os rendszer, és 256-szor érzékenyebb, mint egy 2,5 Gbit/s-os rendszer [4].

Míg egy 10 Gbit/s-os rendszerben általában 50 km után szükséges a diszperzió kompenzálása, addig egy 40 Gbit/s esetén mindössze 3 km ez a távolság. Mindazonáltal a kromatikus diszperzió nem teszi lehetővé a 40 Gbit/s-os átvitelt. Periodikusan alkalmazott diszperzió kompenzálással, különböző típusú fényvezetőkből épített szakaszok esetén is, alkalmassá tehető a kábelszakasz a nagysebességű átvitelre. A 10 Gbit/s-os rendszerekhez hasonlóan a diszperzió kompenzáló elemek a vonalszakaszon elhelyezett EDFA erősítők fokozatai közé építhetők be. Elosztott Raman erősítők esetén is több kompenzáló elemet helyeznek el a vonalon a pumpálási pontok közelében. Az egyes szállítusokhoz gondosan megválasztott kompenzálási mértékkel a korábban említett nemlineáris jelenségek részben kiküszöbölhetők. Először tapasztalati úton mutatták ki, hogy kismértékű kromatikus diszperzió jelenléte javítja az átvitel minőségét, éppen a nemlineáris jelenségek kompenzálásával. A speciális fényvezetőszál tartalmazó kompenzáló modulok diszkrét értékkel készülnek, és a rendelkezésre álló választék elegendő a 10 Gbit/s-os rendszerek kompenzálására. A 40 Gbit/s-os rendszerekhez azonban az említett választéknál jóval finomabb felbontás szükséges. Ráadásul a nem egyetlen hullámhossz kompenzálásra van szükség, hanem a teljes tartományra, ahol az egycsatornás rendszer adója működhet, vagy ahol a nagysebességű csatornákat használó DWDM rendszer dolgozik.

A diszperzió kompenzáló szálakkal megvalósított kompenzálás csak egy szűk hullámhossz tartományban kielégítő pontosságú. Ez vetette fel azt a gondolatot, hogy a rendszerek vételi oldalán aktív diszperzió kompenzálást kell alkalmazni. Aktív kompenzálás esetén megfelelő visszacsatolással a kompenzálás mértéke mindig az optimális szintre állítható be [18]. Ilyen megoldás a fényvezetőszálba írt hangolható rácst (Bragg grating) alkalmazó módszer, ahol ± 200 ps/nm kompenzálási mérték állítható. A Sumitomo által kifejlesztett új eljárással, mikro tükrök és optikai rác segítségével, megoldható a hullámhosszankénti pontos kompenzálás [3]. Az említett, vagy hasonló funkciójú eszközökkel a 10 Gbit/s-os átvitelre diszkrét diszperzió kompenzátorokkal felépített vonalszakaszok alkalmassá tehetőek 40 Gbit/s-os átvitelre. Precíz diszperzió kompenzálással és optikai erősítőkkel akár 1000 km hosszúságú 3R regenerálás nélküli szakasz is megvalósítható [6].

Polarizációs módus diszperzió

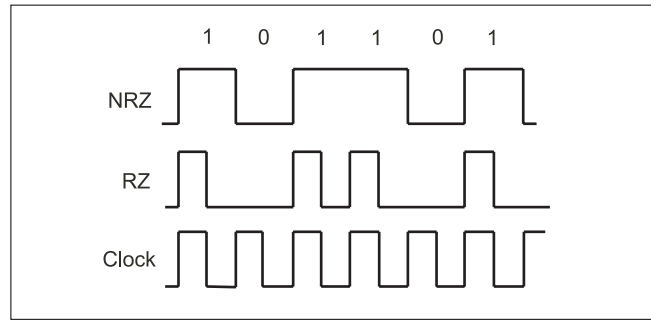
A nagysebességű összeköttetéseket súlyosan érintő másik degradáló paraméter a polarizációs módus diszperzió (PMD). A PMD értéke a fényvezetősál kábelezése és a kábel telepítése során fellépő, és valamilyen mértékben fennmaradó belső mechanikai feszültségektől is függ. Ennek következtében jelentősen eltérhetnek a kábelezetlen fényvezetősálon és a telepített kábelben mért értékek, de egy kábelben belül is jelentős különbségek mutathatók ki az egyes szálak között. A környezeti hatások, mint például a hőmérsékletváltozás, is hatással vannak a kettőtörés mértékére, vagyis a PMD-re. Így ugyanazon a szálon különböző időben mért értékek akár 20% eltérést is mutathatnak.

Jelenleg nem ismertek olyan elméleti vagy gyakorlati eljárások, amelyek segítségével a kábelezetlen fényvezetősál PMD értékéből meghatározható lenne a kábelezett, telepített szál PMD értéke. Ez előre vetíti 10-40 Gbit/s-os rendszerek esetén e paraméter ellenőrzésének szükségességét a már telepített optikai szakaszokon. A szálgyártási és kábelezési technológiák fejlődésének köszönhetően a '90-es évek közepe után gyártott (és lefektetett) fényvezető kábelek PMD együtthatója tipikusan nem haladja meg a $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ értéket. Figyelembe véve a PMD sztohasztikus természetét is, ez azt jelenti, hogy a kromatikus diszperzióval kapcsolatban említett 1000 km regenerálás nélkül áthidalható távolság (40 Gbit/s-on) még megoldható. Különösen komoly problémák lehetnek azonban a korai telepítésű optikákkal, ahol a $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ értéknél sokkal rosszabb értékek is előfordulnak. A problémára a nem megfelelő kábelszakaszok cseréje, vagy a sűrűbb 3R regenerálási pontok beiktatása jelent megoldást. Ez persze nagyon megemeli a költségeket, és rugalmatlanabbá teszi a hálózatot. Elegánsabb megoldást jelenthet az aktív PMD kompenzálás megvalósítása az optikai tartományban, vagy a csatornánkénti PMD kompenzálás az elektromos tartományban. Számos kutatás foglalkozik a jelenleginél nagyobb PMD tűrő képességgel rendelkező optikai adó-vevők fejlesztésével, új, nagyobb toleranciát biztosító modulációs eljárások kutatásával.

A PMD kompenzációval kapcsolatos kutatások eredményei már a gyakorlatban is megjelentek, bár egyelőre meglehetősen költségesek. Számos nagy hálózatüzemeltetőnek jelent ez problémát. A Deutsche Telekom is egyértelműen azonosította a hálózatában a régi építésű kábelek PMD problémáit. A DT-nek az NTT-vel 2001 óta közösen folytatott 40 Gbit/s-os rendszerekkel kapcsolatos kutatásai – többek között – a PMD probléma megoldására is irányulnak [7].

Új modulációs eljárások

A fényvezetősálás összeköttetések esetében napjainkig szinte kizárólag intenzitás modulációt alkalmaztak és szkremblerezett NRZ (Non-Return-to-Zero) formátumú jeleket vittek át (1. ábra).



1. ábra NRZ és RZ jelalakok

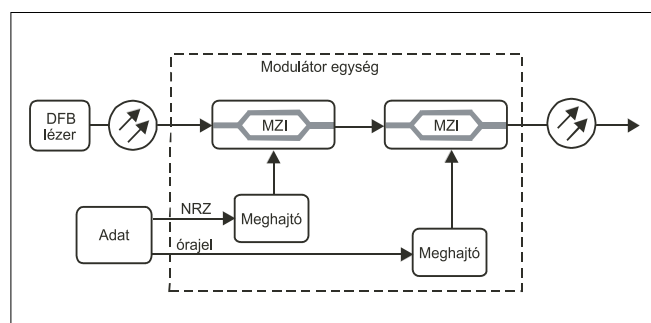
Ennek az eljárásnak legfontosabb előnye az egyszerűség és az olcsó megvalósíthatóság. Egészen 10 Gbit/s-ig ez a modulációs eljárás teljesen megfelelő még nagytávolságú összeköttetések esetében is. Az elméleti kutatásokból régóta tudjuk, hogy az NRZ formátumú modulációnál lehetne hatékonyabb modulációt is alkalmazni, amellyel nagyobb lehetne a diszperziótűrés, kisebb a zajérzékenység, kisebbek a nemlineáris jelenségek okozta zavarok stb.

Napjainkra, a félvezető és optikai technológiák fejlődésével, a kutatások eredményei a gyakorlati életben is megjelentek. Számos publikáció olvasható arról, hogy 40 Gbit/s-os átvitelt, vagy nagyon nagy távolságú 10 Gbit/s-os átvitelt nem NRZ modulációval valósítottak meg [10–16].

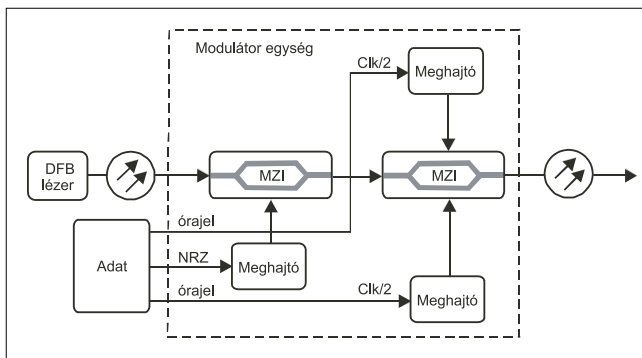
Az NRZ jelek átviteléhez hasonlóan egyszerűen megvalósítható az RZ (Return-to-Zero) jelalakú moduláció előállítása is, ez a digitális technikából jól ismert. 40 Gbit/s sebességen az elektromos tartományban az RZ jel előállítása nehézségeket okoz. A nehézségek enyhítésére az RZ jel előállítását az NRZ jelből gyakran az optikai tartományban végézik. Két modulátorfokozatot használva a modulátort a „fele” sebességű NRZ jellel modulálják, majd egy következő modulátort optikai kapuként használva az órajel segítségével előállítják az RZ jelet (2. ábra). RZ modulációnál hátrányt jelent ugyan, hogy a spektruma mintegy 50%-al szélesebb, mint az NRZ jelé, azonban az RZ formátum a nemlineáris tulajdonságok kiküszöbölése szempontjából előnyös. A jel nagyobb csúcsteljesítménye révén jobb jel/zaj viszony érhető el mint NRZ jelek esetén.

A ma kereskedelmi forgalomba kerülő ultra nagy távolságú 10 Gbit/s-os, valamint a 40 Gbit/s-os rendszerek szinte kivétel nélkül ezt a modulációs formát használják.

2. ábra RZ modulátor



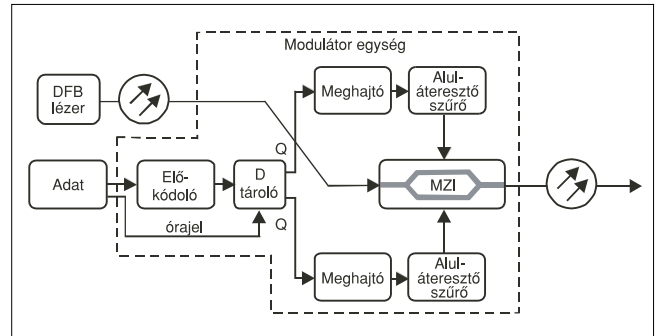
Az RZ, és az NRZ jelek átvitele esetén is az optikai vivőhullám nagy energiával van jelen a spektrumban, de információt nem hordoz. Kézenfekvőnek látszik tehát a vivőhullám kiszűrése a jelből. Ezt az eljárást nevezzük kétoldalsávú elnyomott vivőjű RZ modulációnak (double-sideband carrier-suppressed return-to-zero; DSB CS-RZ vagy csak CS-RZ). Az elnyomott vivőjű optikai jelek lítiumniobát (LiNbO₃) alapú Mach-Zehnder (MZ) interferométerrel állíthatók elő. Ez a modulátorfajta általában alkalmazott RZ és NRZ modulátorok esetén is. A lézerekkel egybeépített elektroabszorpciós modulátorok a 40 Gbit/s sebességen már nem használhatók. CS-RZ jel előállítására két MZ modulátort kapcsolnak össze „push-pull” módon (3. ábra). Az első modulátor állítja elő az RZ modulációt, a második modulátorra állandó szinuszos moduláló jel kerül. A második modulátor után a modulált jel relatív fázishelyzete váltakozva 0 és π , és már nem tartalmazza a vivőt. A szomszédos bitek fázis inverziója miatt az impulzusok közötti interferencia létrejöttének valószínűsége (ISI; Inter Symbol Interference) minimálisra csökken, melynek következtében nagyon jó diszperziótűrő képesség adódik.



3. ábra CS-RZ modulátor

A vázolt eljárással legalább 60 dB-es vivőelnyomás érhető el. A CS-RZ jelben a felesleges magasabb rendű módusok, és a nem kívánt egyéb komponensek is jelentősen csillapítottak, a spektrumszélesség jelentősen csökken. Ennek különös jelentősége van, ha a DWDM rendszerek csatornaosztás értékeire gondolunk. A sok előnyös tulajdonság árnyoldala, hogy a vételi oldalon heterodin detektálásra van szükség, amihez az optikai vivőhullámot elő kell állítani.

Láthattuk, hogy a fényvezető szálon továbbítandó jel spektrum-szélessége döntően befolyásolja az átvitel minőségét. A CS-RZ modulációs eljárásnál is keskenyebb spektrális szélességű optikai jel állítható elő a duobináris (duobinary) modulációval. Elméletileg az NRZ jelek esetén a Nyquist-kritérium szerint szükséges sáv-szélességnek éppen a dupláját „pazaroljuk” el. A duobináris modulációval a szükséges sáv-szélességnél is némileg kevesebb spektrumot foglalunk el. Ennek árán a szomszédos impulzusok között interferenciák jöhetnek létre, de ennek mértéke jól kézben tartható, és nem zavarja a hibamentes vételt. Az eredetileg háromállapotú jeleket a Mach-Zehnder modulátorral alakíthatjuk bináris jelekké a 4. ábra szerinti elrendezésben.



4. ábra Duobináris modulátor

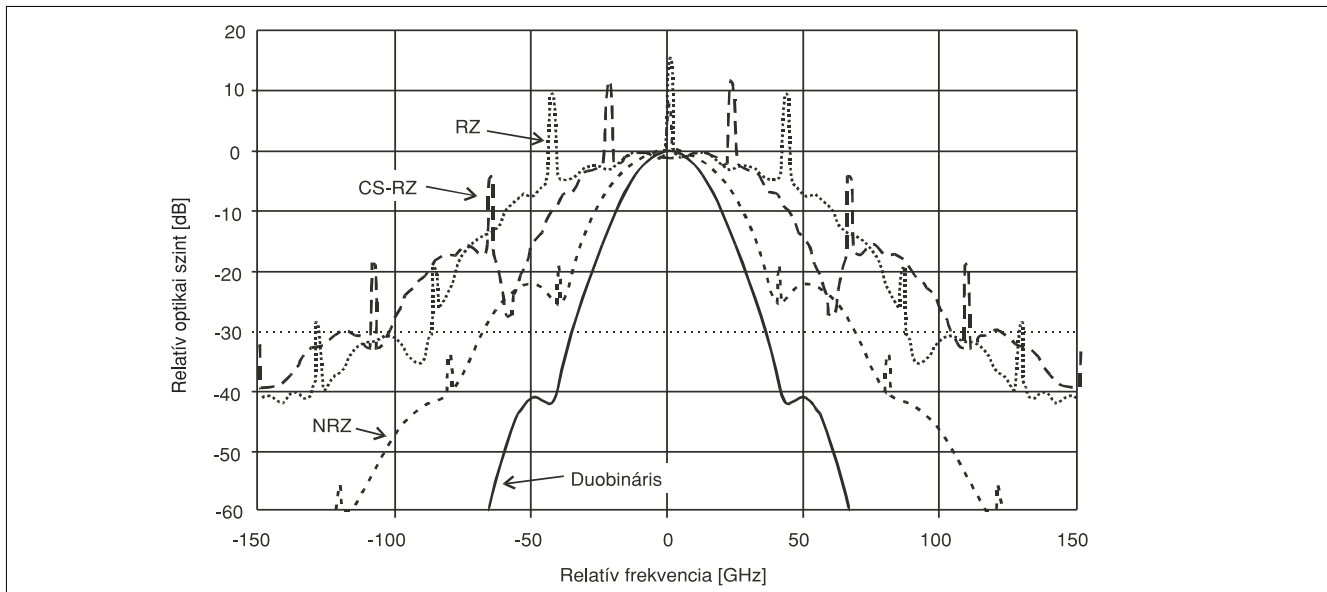
Köszönhetően a jel keskeny spektrumának, és annak, hogy a jel nagyenergiájú része a relatív nulla frekvencia közelében van, az ilyen modulációjú optikai rendszerek meglehetősen érzéketlenek a diszperziós és nemlineáris hatásokra. Jellemző, hogy ilyen eljárással sztenderd egymódusú szájakon 10 Gbit/s sebességen 200 km távolságot tudtak áthidalni diszperzió kompenzálás nélkül.

Lítiumniobát alapú Mach-Zehnder modulátorokkal optikai differenciális fázismoduláció (DPSK – Differential Phase Shift Keying; fázisbillentyűzés) is megvalósítható. A DPSK moduláció és CS-RZ moduláció kombinálásával 0,8 bit/s/Hz spektrális hatások érhető el, amellet, hogy 3 dB-vel jobb vételi érzékenység biztosítható kiegyenlített vevő alkalmazásával, mint egyszerű RZ átvitel esetén [12]. Ezzel a spektrális hatásokkal megvalósíthatók 40 Gbit/s-os nyalábokat továbbító DWDM rendszerek még 50 GHz csatornaosztással is.

A fentiekből láthatjuk, hogy a nagysebességű optikai átvitel támogatásához a legkülönbözőbb modulációs eljárásokat dolgozták ki [13,14]. Az egyre komplexebb megoldásokat a nagy léptekkel fejlődő technológia támogatja. A hajtóerő ezekhez a fejlesztésekhez az átvitel során jelentkező diszperziós tulajdonságok (CD, PMD) hatásának csökkentése, nemlineáris jelenségek leküzdése, minél nagyobb ismétlőnküli távolságok elérése, egyre nagyobb kapacitások biztosítása. Az biztosnak látszik, hogy 40 Gbit/s-os átvitel esetén az NRZ jelek továbbítása csak extra rövid távolságokon kerül majd alkalmazásra. A 10 Gbit/s-os rendszerekben már nem számít újdonságnak az RZ moduláció, és a kísérleti 40 Gbit/s-os rendszerekben is előszeretettel használják. Duobináris modulátor 10 vagy 40 Gbit/s sebességre több komponens gyártó cégtől katalógus terméként megvásárolható [11]. Feltételezhető, hogy a nagysebességű rendszerek az átviteli jel-formátum tekintetében nem lesznek egységesek úgy, ahogy ma egységesek az NRZ jel-formátummal a SONET/SDH, Ethernet stb. rendszerek.

Az 5. ábrán a különböző modulációs módszerek sáv-szélesség igényét szemlélhetjük. A spektrális tulajdonságokon még sáváteresztő szűrőkkel is lehet módosítani (a hasznos információtartalom megőrzése mellett) a jobb sáv-szélesség kihasználás érdekében. [15]

A technológiai fejlődés kapcsán, a felmerülő problémák leküzdésével kapcsolatban arra is kell utalnunk,



5. ábra Az optikai jel relatív sáv szélessége különböző modulációk esetén

hogy a híradástechnikában megszokott dimenzióknak más nagyságrendjei fordulnak elő az áramkörökben. Gondoljunk itt a 25 ps periódusidőre, arra, hogy picofarad helyett femtofarad, mikrohenry helyett pikohenry egységekkel mérjük a passzív áramköri elemek jellemzőit. A megvalósított áramkörök, lézermeghajtók, modulátorok vevőerősítők stb. teljesen más megközelítésben – a mikrohullámú technika eredményeire támaszkodva – készülnek. Önmagában egy-egy elektromos csatlakoztatás megoldása is ezeken a frekvenciákon nehezen megoldható feladat, nem beszélve arról, amikor 5...7 Vpp nagyságú moduláló jelet kell előállítani egy MZ modulátor részére.

Kitekintés

Ma teljesen természetesnek látszik, hogy a 40 Gbit/s-os rendszerek be fognak lépni az átviteli rendszerek palettájára. Az ITU-T G.959.1 ajánlásában megjelenő STM-256 sebesség mellett egyre többször hangzik el az Ethernet szó is a 40 Gbit/s-os sebesség kapcsán. Valószínűleg nem véletlenül. Ahogy ez az elmúlt években is történt, az alacsonyabb sebességek térhódítása idején, a 40 Gbit/s-os rendszerek először a nagytávolságú összeköttetésekben fognak megjelenni a felső hálózati síkon. A nagyobb sebességgel csökkeni fog a hálózatban a legköltségesebbnek számító O/E/O átalakítók száma, ezáltal csökkenni fognak a költségek is. A mai becslések ezt a költségcsökkenési tényezőt 30-40% közé teszik.

A jelenleg futó 40 G kísérletek, pilotok nagy része arra keres bizonyosságot, hogy a meglévő – esetleg nem túl fiatal – fényvezetős hálózaton hogyan működtethető az új rendszer. Az eredményekről szóló publikációk egyértelműsítik, hogy a csekély kivételtől eltekintve a meglévő hálózatok használhatók, vagy alkalmassá tehetőek 40 Gbit/s-os átvitelre. A nehézségeket jellemző

kulcsszavak a kromatikus diszperzió, a polarizációs módus diszperzió, a zaj, a nemlineáris jelenségek. Az is látható, hogy az újfejlesztésű NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted) szálak esetében kevesebb nehézséggel kell megküzdeni, nagyobb távolságok hidalhatók át. A sztenderd G.652 ajánlás szerinti fényvezetőkkel épült, vagy akár vegyes hálózatok nem jelentenek áthidalhatatlan akadályt.

Komoly nehézségeket okoznak az eltolódott diszperziójú szálak (G.653). A nehézségek forrása az alacsony módusmező átmérő miatt lép fel. Már a kis teljesítményszinteknél fellép a négyhullám keverés (FWM) jelensége, a kromatikus diszperziós együttható az átviteli sáv közepén egy pontban nullává válik és előjelet vált. Ez a régen oly előnyösnek vélt tulajdonság most a visszajára fordult.

Számos hálózatüzemeltető és gyártó dolgozik azon a tengeren túl és Európában, hogy a 40 G rendszereket alkalmazásba vehessék. Néhány példa a közelünkben: Alcatel és Lucent gyármányú berendezésekkel megvalósított 40 G összeköttetések a Deutsche Telekomnál, a DT és a japán NTT kooperációja a 40 Gbit/s-os rendszerekkel kapcsolatos kutatásokra, a Pirelli Labs és a Telecom Italia Lab 40 G pilothálózata Róma közelében [4], European IST program.

Az optikai távközlés nem csak az egyre nagyobb sebességek irányában fejlődik. Az optikai cross connectek, útvonalválasztók megvalósulásával lehetővé válik egyre több hálózati funkció optikai tartományban történő megvalósítása. Lehetővé válik az optikai útvonalkapcsolás, a helyreállítási funkció optikai síkon is megvalósítható. Vannak működő megoldások az optikai tartományban történő hullámhossz konverzióra és biztató kísérletekről hallani az optikai címkekapcsolással összefüggésben is. Az optikai összeköttetések a statikus pont-pont vagy gyűrű struktúrákból egyre inkább egy dinamikusan változtatható szövevényes struktúrává alakulnak. Ezt az is jelenti, hogy az egyes összeköt-

tetések fizikai hosszai az optikai kapcsolások folytán változhatnak, így például az automatikus és gyors diszperzió kiegyenlítőkhöz juthatnak a nagysebességű hálózatokban.

Hogy mennyire realitás a 40 Gbit/s, arra talán válasz az Alcatel Research & Innovation EU IST programja és a German MultiTeraNet program által támogatott sikeres 7x160 Gbit/s (!) DWDM kísérlete 600 km távolságra sztenderd egymódusú fényvezetők felhasználásával [10]. Vagyis a kutatók nem gondolják, hogy a 40 Gbit/s után nincs tovább...

Összefoglalás

Most 2003, 2004 fordulóján csak szolgáltatási célra, normál kereskedelmi tranzakcióval beszerzett 40 Gbit/s-os rendszer nem működik a világon [9]. Számos gyártó és hálózatüzemeltető végez közös kísérleteket, vesz részt különböző projektekben, épít és üzemeltet pilot hálózatokat. Jó esély van meglévő optikai hálózatokon 40 Gbit/s-os rendszerek működtetésére. Az első 40 G berendezések kereskedelmi termékként is megjelentek (pl. Lucent *LambdaXtreme*).

Figyelembe véve a fejlődési tendenciákat a szolgáltatói hálózatokban 2005-2006-ban minden bizonnyal meg fognak jelenni az első 40 G rendszerek. Ennek előfeltétele – az igényeken túl – az árak csökkenése. A DWDM rendszerek vonalkapacitása eléri, és valószínűleg meg is fogja haladni a 2,5 Tbit/s értéket.

Irodalom

- [1] Lakatos Zsolt:
Automatikusan kapcsolt optikai hálózatok
Híradástechnika, 2004/ 2. szám
- [2] Szigeti et al.:
Útvonalkijelölés és forgalomelvezetés
több tartományú optikai hálózatokban
Híradástechnika, 2004/2. szám
- [3] T. Sano, T. Iwashima, M. Katayama, M. Harumoto,
T. Kanie, M. Shigehara, H. Saganuma, M. Nishimura:
Novel multichannel tuneable chromatic dispersion
compensator based on MEMS and diffraction grating;
IEEE Photonics Tehnology Letters, August 2003.
- [4] A. Paoletti, A. Schiffrini, A. Pagano, M. Schiano:
40 Gbit/s WDM transmission for long haul applications:
network functionalities and transmission technologies
unlocking Ultrafast All-Optical Networks;
ECOC 2003 Proceedings We1.1.1.
- [5] B. Mikkelsen, C. Rasmussen, P. Mamyshev,
F. Liu, S. Dey, F. Rosca:
REAL-WORLD ISSUES FOR HIGH-CAPACITY AND
LONG-HAUL TRANSMISSION AT 40 GBIT/S;
ECOC 2003 Proceedings We1.1.2.
- [6] Luc Ceuppens, Keang-Po Ho, Ted Schmidt:
Economically efficient capacity upgrades with
spectrally efficient 40 Gb/s modulation format;
ECOC 2003 Proceedings We1.1.3.
- [7] Werner Weiershausen:
Will We Need 40G in German WDM Networks?;
ECOC 2003 Proceedings We2.1.1.
- [8] Ken-ichi Sato:
WHAT WILL PROMOTE THE INTRODUCTION OF
40 GB/S TRANSMISSION TECHNOLOGIES?;
ECOC 2003 Proceedings We2.1.2.
- [9] Martin Birk: Whatever happened to 40 Gbit/s?;
ECOC 2003 Proceedings We2.1.3.
- [10] E. Lach, K. Schuh, B. Junginger, G. Charlet,
P. Pecci, G. Veighth:
7x170 Gbit/s (160 Gbit/s + FEC overhead)
DWDM transmission with 0.53 bit/s/Hz spectral
efficiency over long haul distance of Standard SMF;
ECOC 2003 Proceedings Th4.3.5.
- [11] Corning; IM-10 – DB; adatlap
- [12] A.H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar,
F.J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, E. Burrows:
25 40-Gb/s Copolarized DPSK Transmission over
12x100-km NZDF with 50-GHz Channel Spacing;
IEEE Photonics Technology Letters,
Vol. 15, No.3, March 2003.
- [13] Le Nguyen Binh, Zsofia Csematomy:
DOUBLE-SIDEBAND CARRIER SUPPRESSED
RZ and NRZ MODULATION FORMATS FOR
ULTRA-HIGH CAPACITY 40 Gb/s OPTICAL
COMMUNICATIONS SYSTEMS;
Department of Electrical and Computer Systems
Engineering; Technical Report MECSE-23-2003.
- [14] Steffen Schmid:
Lithium Niobate to Rule 40G Modulation;
Lightwave Europe Nov. 20, 2003.
- [15] Anes Hodžic, Marcus Winter, Beate Konrad,
Sebastian Randel, Klaus Petermann:
Optimized Filtering for 40-Gb/s/Ch-Based
DWDM Transmission Systems over Standard
Single-Mode Fiber;
IEEE Photonics Technology Letters,
Vol. 15, No.7, July 2003.
- [16] Sung Kee Kim, Jaehoon Lee, Jichai Jeong:
Transmission Performance of 10-Gb/s Optical
Duobinary Transmission Systems Considering
Adjustable Chirp of Nonideal LiNbO₃
Mach-Zehnder Modulators Due to Applied Voltage
Ratio and Filter Bandwidth;
Journal of Lightwave Technology,
Vol. 19, No.4, April 2001.
- [17] Jeszenői P.:
DWDM rendszerek alkalmazhatósága
meglévő optikai hálózaton; Előadások gyűjteménye,
13. Távközlési és informatikai hálózatok kiállítás
és szeminárium
- [18] Anil Gandhi, Saman Behtash:
Electronic Dispersion Compensation;
Santel Networks Inc. White paper
- [19] Yoram Betser, Scott Naugle, William Sherry:
Readying receivers for 40Gbps operation;
Optical Communications;
Communication Systems Design, Aug. 6, 2001.

Segédvivős címzésű, csomagkapcsolt optikai router

KOVÁCS ATTILA, DEME ILDIKÓ PH.D. HALLGATÓK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
Optikai és Mikrohullámú Laboratórium
kovacs@mht.bme.hu, deme@mht.bme.hu

Reviewed

Kulcsszavak: WDM, optikai csomagkapcsolás, segédvivő, optikai router

Laborunk egy nemzetközi projekt keretében optikai core router kutatásával és fejlesztésével foglalkozik. Az eszköz hullámhossz-osztásos csomagkapcsolt, segédvivős címzést alkalmazó technológiára épül. Az alábbiakban a koncepciókat, a fejlesztés jelenlegi fázisát, és eddigi elért eredményeinket szeretnénk dióhéjban az olvasóközönség elé tárni.

Laborunk egy LABELS név alatt futó 3 éves európai projekt keretében optikai gerinchálózatokban alkalmazható core router fejlesztésében vesz részt. A projekt résztvevői között egyetemek, ipari vállalatok, és szolgáltatók egyaránt vannak. Mivel nem pusztán elméleti kutatásról van szó, ezért a kitűzött cél egy prototípus megépítése és tesztelése. A mi feladatunk az optikai címfeldolgozás és az ehhez tartozó vezérlés megvalósítása. A következőkben eddigi eredményeinkről, elképzeléseinkről szeretnénk rövid, de átfogó képet adni.

Koncepció és specifikáció

Az eszköz megtervezése és specifikálása során a következő szempontokat vettük figyelembe. A nagysebességű WDM optikai gerinchálózatokhoz alkalmazkodva a csatornánkénti adatsebességet 10 Gbit/s-nak választottuk. Fontos szempont volt a gazdaságos megépíthetőség és tesztelhetőség is, így legkevesebb 8, maximum 16 hullámhossz irányítása szükséges. Az IP transzparenciát és a jelenleg rendelkezésünkre álló technológiát figyelembe véve optikai/elektromos átalakítás és segédvivős optikai cím alkalmazása mellett döntöttünk [2, 3].

Mivel változó méretű csomagokat is szeretnénk továbbítani, ezért viszonylag nagy, 300 Mbit/s sebességű címet használunk. A címfeldolgozó áramkörnek ilyen sebesség mellett kell borsztös üzemben 1-2 μ s alatt elvégeznie a címinformáció feldolgozását. A fenti feldolgozási idő a következő számításon alapul. Mivel a transzparencia fontos szempont, az IP hálózatokat alapul véve a maximális csomaghossz 64 kbyte, az Ethernet esetén 1500 byte, de átlagban alkalmazástól és hálózattípustól függetlenül minimálisan 1200 byte hosszú csomagokkal számolhatunk. A címfeldolgozás ideje alatt az adat késleltetésére van szükség, amit több száz méter hosszú optikai szállal valósítunk meg. A fény terjedési sebességét optikai szállban az n_1/c képlet adja, ahol c a fény vákuumbeli sebessége ($3 \cdot 10^8$ m/s), n_1 pedig a szál magjának törésmutatója. Egy átlagos monomódusú optikai szállban $n_1=1,45$. Így $L=400$ méter

hosszú száll esetén a késleltetés $T = L n_1/c = 1,93 \mu$ s. Az 1500 bájtos, 10 Gbit/s-os csomag időbeni hossza 1,2 μ s. A száll hosszát tehát úgy kell méretezni, hogy a leg hosszabb csomag se lógjon túl időben a késleltetés hosszán. A cím felépítésével a következő részben foglalkozunk. A specifikációnak még három fontos szempontot kell rögzítenie. A cím kiszűrését, detekciójának módját, és a címfeldolgozás során esetleg előforduló ütközések kezelést. Az optikai szűrő kritikus eleme a rendszernek, mert rendkívül keskeny sávban kell működnie, hiszen az alapsávi adattól néhány 10 GHz-re lévő oldalsávot kell kiszűrnie. A címet hordozó segédvivő kiszűrése után alapsávi jelet megkaphatjuk burkolódetektor (melynek sáv szélessége minimum kétszerese kell hogy legyen a cím sáv szélességének) és mikrohullámú keverőáramkör segítségével.

Az esetleges ütközéseket az adott csomag eldobásával kezeljük le. A fenti szempontok alapján már elkészíthető az eszköz blokk diagramja, és definiálható az optikai cím.

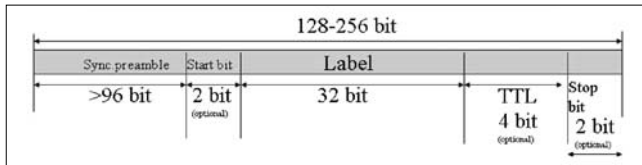
Optikai cím

Egy-egy csatorna esetünkben egy-egy hullámhossznak feleltethető meg [2]. Egy adott hullámhosszon intenzitás-modulációval visszük át a 10 Gbit/s-os adatot, és a spektrumban 20 GHz-re lévő segédvivőre moduláljuk rá az NRZ (Non Return to Zero) kódolású címinformációt. A cím maximális sebessége 300 Mbit/s. Az ideális cím hosszának megállapításához három szempontot kell figyelembe venni.

- Egrészről elegendő hosszúnak kell lennie az adat visszaállításához szükséges szinkronizációhoz. Nyílt hurkú adatvisszaállítás esetén a mérések eredményét figyelembe véve 128 bit preamble szükséges a biztos szinkronozáshoz. Zárt hurkú megoldást alkalmazva ez a szám 2-3 bájtra csökkenthető, de hátránya, hogy PLL használata szükséges. Emiatt a nyílt hurkú adatvisszaállítást valósítottuk meg.

- A hasznos címinformáció és az előtag együttes időtartama ne haladja meg a feldolgozásra szánt idő

45%-át. Ha az 1500 bájtos csomag hossza 1,2 μ s, és a csomag végeinél 100 ns-os védősávot hagyunk az adat és a hozzá tartozó cím elcsúszásának kiküszöbölésére végett, akkor a cím mintavételezésére 450 ns áll rendelkezésre. Ez 128 bit hosszúságú cím alkalmazását teszi lehetővé. Így további 600 ns áll rendelkezésre a csomag útvonalának meghatározására, illetve a cím újraírására.



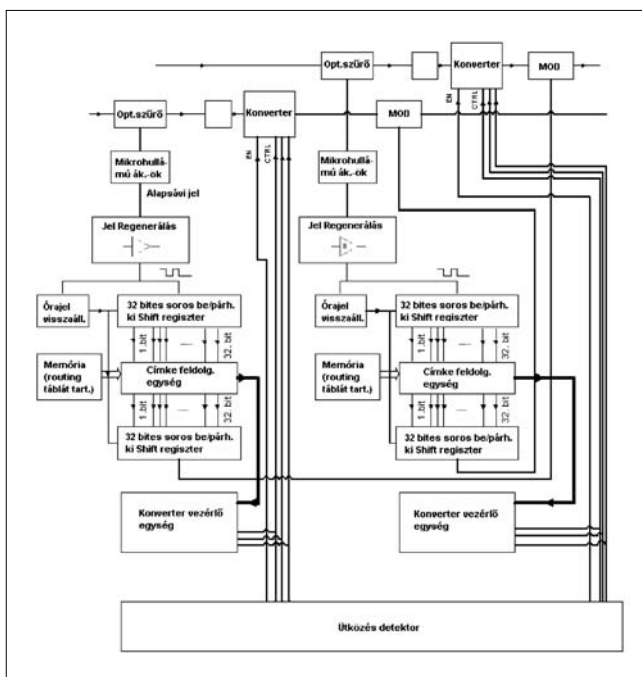
1. ábra Optikai cím

Végül a tényleges címinformáció (32 bit) azonosítását megkönnyítő start és opcionálisan stop unique word-öket, és a csomagok esetleges végtelen ciklusú keringését megakadályozó (TTL) biteket kell tartalmaznia az optikai címkének. Tekintettel arra, hogy a fenti cím csak az optikai hálózatban él, a 32 bit elegendő számú egyedi címet eredményez, és esetlegesen néhány bit a QoS (Quality of Service) jelzésére is szolgálhat.

A router felépítése

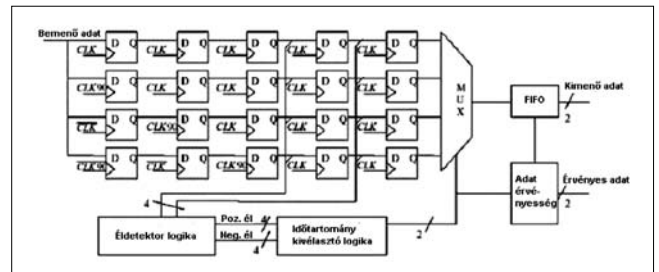
Az általunk fejlesztett router két csatornás blokkvázlata a 2. ábrán látható. A router bemeneti portján egy demultiplexer fokozat szétválasztja a különböző hullámhosszú csatornákat, majd optikai szűrők segítségével kiszűrjük az optikai címet. A hasznos terhelés (payload) változatlan formában halad tovább, és egy optikai késleltető vonalra kerül.

2. ábra Router blokkvázlata két csatornára



A késleltetés ideje alatt kerül feldolgozásra az optikai cím, és mire a hasznos terhelés a késleltető szakasz végéhez ér, az új optikai címke rendelkezésre áll, és a hullámhossz konverter beállítása megtörténik. A hasznos terhelés hullámhossz konverziója (irányítása) után az új alapsávi címet felkeverjük, majd optikai modulátor segítségével az új hullámhosszú csomag segédvívjére keverjük. A hasonlóan routolt többi csatornát is multiplexálva a csomagok a router kimeneti portjára kerülnek.

A címinformáció feldolgozása a következő sorrendben történik: A kiszűrt optikai címkét burkolódetektor segítségével elektromos jellé alakítjuk, majd lekeverjük alapsávba. A jelregeneráció után nyílt hurkú módszerrel visszaállítjuk az adatot, és a hasznos címinformáció birtokában az előre rögzített routing tábla alapján meghatározzuk az útvonalat (új hullámhossz), majd újraírjuk az optikai címet. A csomagok ütközését figyelve eldobjuk a kisebb prioritásút. Az adatvisszaállítás módját az alábbi fejezet részletezi.



3. ábra Adatvisszaállítás

Digitális vezérlés

A nyílt hurkú adatvisszaállítást FPGA (Field Programmable Gate Array) alapú áramkör végzi [1]. Az FPGA alacsony kapunkénti költsége, viszonylag nagy sebessége ($CLK_{in} \max = 420 \text{ MHz}$) és univerzalitása ideálissá teszi a hálózatos alkalmazásokra. A digitális vezérlés két fő részből áll: a paraméter módosítást lehetővé tevő felhasználói interfészből, és a címfeldolgozó logikából.

A nyílt hurkú adatvisszaállítás a túlmintavételezés elvén alapul. A bejövő bitsorozatot négyszeresen túlmintavételezzük oly módon, hogy azt az órajellel, annak negáltjával, illetve az órajel és negáltjának fázisban 90 fokos eltoltjával mintavételezzük. Így négy időtartományhoz jutunk. A helytelen bit detekció és az esetleges jitterek kiküszöbölése miatt plusz egy tárolófokozatot és éldetektort alkalmazunk (3. ábra).

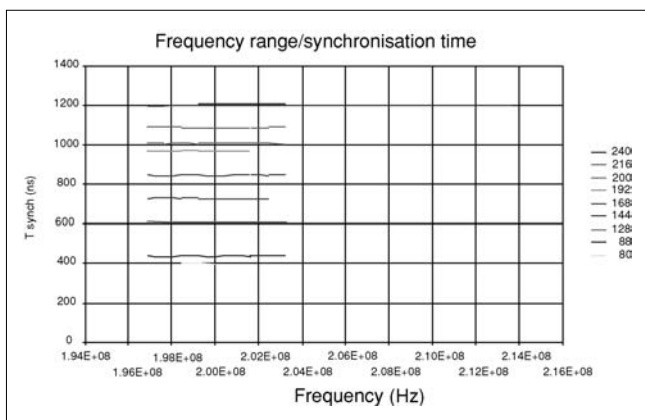
Az éldetekción alapuló logika gondoskodik arról, hogy mindig a megfelelő időtartományból mintavételezzünk. A kapott adatot soros/párhuzamos átalakítás után egy komparátor vizsgálja. Amennyiben a komparátor a címinformáció kezdetét jelző unique word-el egyezést talál, úgy az ezt követő 4 bájtot a tényleges címként tároljuk, majd a routing tábla alapján meghatározzuk az új hullámhosszat. Végül a címet újra az 1. ábra szerinti alakra hozva rámoduláljuk a kimenő csomag segédvívjére.

Eredmények és hiányosságok

Jelenleg a BER (Bit Error Ratio) előkészítése folyik. A bithiba arány megállapításához szükségünk van adó és vevő egységre egyaránt. Az adó véletlenszám generátor segítségével állít elő optikai címeket az általunk meghatározott formátum szerint. A vevő egység visszaállítja a címinformációt. Természetesen az adó és a vevő egymástól független, néhány MHz-el eltérő órajelről üzemelt, amivel az aszinkron kapcsolatot modelleztük. Az adó órajele 200 MHz volt, míg a vevőét $\pm 5\%$ -kal elhangoltuk. A szinkronizáció idejét a vevő órajelnek függvényében az előtag hosszával paraméterezve a 4. ábra szemlélteti.

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy 88 bitnél hosszabb előtagok esetén működik az adatvisszaállítás, amelynek a minimális ideje 400 ns. Az adó és vevő órajele közötti megengedett maximális frekvenciakülönbség 2,2 MHz, amely 10%-os túrést jelent. Ez jóval több, mint amit az aszinkron hálózatok megkövetelnek.

4. ábra Mérési eredmények



Rendszerünk hiányossága, hogy csak 200 MHz-es címeket tud feldolgozni, amelyet reményeink szerint a digitális áramkörök optimalizálásával 300 MHz-ig tudunk növelni. További probléma, hogy csak statikus routing táblát alkalmazhatunk, mivel a dinamikus irányításhoz nem áll rendelkezésünkre megfelelő számítási teljesítmény. Végül a router csak hullámhossz irányításra képes, fizikai csatornákéra nem. Ez optikai kapcsoló mátrix, és két szintű vezérlő logika alkalmazásával (ahol az elemi szintet a jelenlegi hullámhossz irányításos eszköz képezi) megoldható.

Összegzés

Reméljük sikerült kellő áttekintést nyújtani kutatásainkról, amelyek időszerűek és a jövőbe mutatnak. Bízunk abban, hogy a felmerülő problémákra megoldást találunk, és ezáltal újabb kérdésekre kereshetjük a választ. Úgy véljük, az optikai hálózatoké a jövő.

Irodalom

- [1] Attila Kovács, Ildikó Deme: "Clock and data recovery from high speed asynchronous NRZ coded data stream" Microcoll 2003, Budapest
- [2] D.J. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, S. Humphries: "All-Optical Label Swapping with Wavelength Conversion for WDM-IP Networks with Subcarrier Multiplexed Addressing," IEEE Photonics Technology Letters, vol.11, No.11, pp.1497-1499, Nov. 1999.
- [3] Tamás Marozsák, Attila Kovács, Ildikó Deme: "All-optical routing for packet switched networks" Third Hungarian WDM workshop, "Intelligence in Optical Networks", 08. Apr. 2003, Bp.

Hírek

Magyar részvétel európai kutatási projekteken

Az ASON tématerülettel foglalkozó **EURESCOM P1012 FASHION** projektben aktív szerepet vállalt a BME Híradástechnikai Tanszék hálózattervezési szakmacsoportja. A nagy európai távközlési szolgáltatók (Swisscom, France Telecom R&D, Matáv, Telecom Italia Lab SpA, Telenor, OTE SA, Portugal Telecom Inovação) részvételével zajló munka keretében tervezési/szimulációs eszközök és tudományos szempontból is értékes publikációk készültek el.

A projekt eredményeit összefoglalva elmondható, hogy az elkészült dokumentumok mind az ASON technológia megértését, mind stratégiai alkalmazhatósági aspektusait informatívan, értékes gondolatokat összefoglalva tárgyalják. Az elkészült végleges eredmények és a közös munka során felhalmozott ismeretek és tapasztalatok jól szolgálhatják a technológia hazai megismertetésének, első alkalmazhatósági vizsgálatainak előkészítését.

A projekt honlapja: <http://www.eurescom.de/public/projects/P1000-series/p1012/default.asp>

Kódosztás az optikai távközlésben

FRIGYES ISTVÁN *egyetemi tanár*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
frigyes@mht.bme.hu

Kulcsszavak: *optikai többszörös hozzáférés, kiterjesztett spektrumú rendszerek, ortogonális optikai kódok*

Ennek az összefoglaló, ismertető jellegű cikknek célkitűzése az OCDMA technika alapjainak, alkalmazási területeinek bemutatása. Miután röviden áttekintjük a rádiórendszerekben CDMA célra leggyakrabban alkalmazott DS-kiterjesztett spektrumú rendszerek, valamint az e célra megfelelő spektrumkiterjesztő kódok alapvető tulajdonságait, ismertetjük az OCDMA rendszereket, az optikai spektrumkiterjesztő kódokat – ebben a szakaszban, az eredeti célkitűzésnek megfelelően központi vezérlés nélküli LANokkal foglalkozunk. Ezekután ettől valamelyest eltérő alkalmazási lehetőségeket ismertetünk, nevezetesen a szinkronizált és nagytávolságú hálózatokban való alkalmazást, majd néhány rendszer, felépítés rövid ismertetését.

1. Bevezetés

Ismeretes, hogy a korszerű optikai hálózatokban a *hullámhossz-osztás* (WDM – Wavelength Division Multiplexing) illetve annak sűrű-osztású változata (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing) bizonyult a legjobb módszernek a hálózatok kialakítására valamint az átviteli közeg – az optikai szál – kapacitásának jó kihasználására.

Napjainkra a WDM/DWDM technika igen magas fejlettségi fokot ért el, és széleskörű alkalmazásra talál a világ számos részén; a kutatások előterében álló téma lévén, technikája folyamatosan fejlődik tovább. Azonban, míg bizonyára a legjobb technika nagytávolságú hálózatok kialakítására, az optikai helyi adathálózatokban (LAN – Local Area Network) – melyek inkább tartoznak a többszörös hozzáférésű, mint a multiplex hálózatok körébe – kevésbé előnyös. Ugyanis kevésbé hajlékony, nehezen változtatható, központi vezérlést igényel; ugyanakkor a flexibilitás alapvető követelmény a LANokban, a központi vezérlés pedig nehézkes.

Másfelől a vezeték nélküli hálózatokban a kódosztású többszörös hozzáférés (CDMA – Code Division Multiple Access) igen előnyösnek bizonyult, LANokban és más területeken egyaránt. Például CDMA-t alkalmaznak az UMTSben, a harmadik generációs mobil hálózatban.

Mintegy 15 évvel ezelőtt felismerték, hogy a vezeték nélküli CDMA technikában elért eredmények bizonyára az optikai átvitel technikájában is használhatóak, és intenzív kutatás indult meg. Tekintve, hogy a CDMA a spektrum kiterjesztés elvén alapul, az optikai szál rendkívül nagy sáv szélessége jó eredményekkel kecsegtetett. Az optikai CDMA (OCDMA) terén végzett kutatások jelentős eredményeket hoztak, így ez a technika, ennek elmélete is, jelentős eredményeket mutat fel, annak ellenére, hogy az optikai sáv, annak átviteli közege kevésbé bizonyult előnyösnek, mint a rádiófrekvenciák.

2. CDMA vezeték nélküli hálózatokban

Mint fentebb is mondtuk, a kódosztás szoros kapcsolatban van az úgynevezett spektrum kiterjesztés módszerével.

Egy hírközlő rendszer a *kiterjesztett spektrumú* rendszerekhez tartozik, ha kielégíti a következő kritériumokat:

- i. az *adásra kerülő* $x(t)$ jel spektrumának W szélessége nagyobb (gyakran sokkal nagyobb) mint az információt hordozó $s(t)$ jel B spektrum-szélessége;
- ii. a spektrum kiterjesztését egy, az információs jeltől független jellel, a spektrum kiterjesztő kóddal érjük el;
- iii. gyakran harmadikként hozzáveszik, hogy a létrejövő szélessávú jel zaj-szerű; ez azonban az optikai alkalmazásokban általában nem teljesül).

A DS spektrum-kiterjesztő eljárásban

$$x(t) = s(t) \times c(t) \quad (1)$$

ahol $c(t)$ a szélessávú spektrum kiterjesztő kód. $s(t)$ elvileg bármilyen jel lehet – digitális vagy analóg; $c(t)$ a gyakorlatban mindig periodikus digitális jel.

Rövidítések

- CDMA** – Code Division Multiple Access, *kódosztású többszörös hozzáférés*
- DWDM** – Dense Wavelength Division Multiplex, *sűrű-osztású WDM*
- LAN** – Local Area Network, *helyi adathálózat*
- MUI** – Multi User Interference, *többfelhasználós interferencia*
- OCDMA** – Optical CDMA, *optikai CDMA*
- OOC** – Optical Orthogonal Codes, *ortogonális optikai kódok*
- OOK** – On-Off-Keying, *ki-be kapcsolás*
- WDM** – Wavelength Division Multiplex, *hullámhossz-osztású multiplex*

A spektrum kiterjesztésének elve – melyet eredetileg a katonai hírközlésben, zavarelhárító módszerként dolgoztak ki – plauzibilisen vezetett a kódosztáshoz. Ugyanis egy csatorna felosztható úgy, hogy az egyes felhasználóknak különböző spektrum kiterjesztő kódokat adunk, még hozzá olyanokat, amelyek keresztkorrelációja kicsi; a források jelük spektrumát kiterjesztik, például a *címzett* kódjával.

Ha a kódok egymásra mind ortogonálisak, a keresztkorreláció 0 lesz – a *szinkronizált* Walsh-függvények egy példa az ilyen kódokra. Míg ilyen ortogonális kódok alkalmazása a gyakorlatban nehézséget jelentene, léteznek kódok, melyek *kvázi-ortogonálisak*; ezek keresztkorrelációja nem 0, de kicsi.

Néhány példa: maximális hosszúságú álvéletlen sorozatok, a bizonyos szempontból ezekből származtatott Gold-kódok, Kasami-kódok és mások. Ezek mind álvéletlen sorozatok, a gyakorlatban + és – 1-ekből létrehozva. A kód elemi jelét – az információs bitektől megkülönböztetendő – *chip*nek hívják és időtartamát T_C vel jelölik. Persze $T_C < T$ (gyakran: $T_C \ll T$), ahol T a bitidő.

A kódok keresztkorrelációjának definíciója:

$$R_{j,l}(\tau) = \int_0^T c_j(t) c_l(t + \tau) dt \quad (2)$$

Anélkül hogy részletekbe mennénk, tekintsünk egy vezeték nélküli szituációt, melyben N felhasználó működik egyidejűleg egy közös frekvenciasávban. Akkor a 0 sorszámú felhasználó vevőjének bemenetére (a zajt elhanyagolva)

$$y_0'(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{i,k} \sqrt{P_i} s_i(t - kT) c_i(t - kT); a_{i,k} = \pm 1 \quad (3)$$

jel jut, ahol

$a_{i,k}$ az i -edik felhasználó k -edik bite vagy szimbóluma, P_i az i -edik adó teljesítménye a 0-dik vevő bemenetén, $s_i(t)$ pedig a megfelelő jelalak.

A vett jel spektrumának újra koncentráálására (de-spreading) azt $c_0(t)$ -vel korreláltatni kell; eredményül

$$y_0(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{0,k} \sqrt{P_0} \int_{(k-1)T}^{kT} s(t - kT) dt + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{i,k} \sqrt{P_i} \int_{(k-1)T}^{kT} s(t - kT) c_0(t - kT) c_i(t - kT) dt \quad (4)$$

adódik, ahol az első tag a hasznos jel, a második a (természetesen káros) interferencia. Utóbbit az angol nyelvű irodalomban *Multi User Interference*-nek (MUI) hívják.

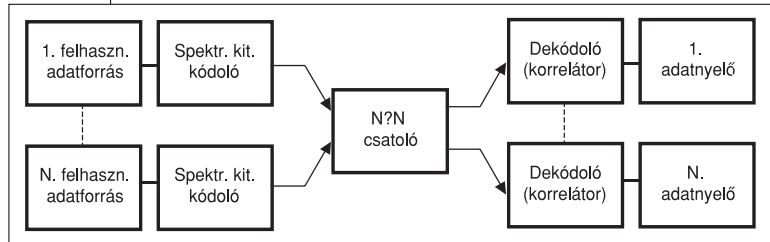
A (2) vagy a (4) formulára tekintve látjuk, hogy a kódok *bipoláris* jellegének igen nagy a jelentősége a keresztkorreláció kis értéken tarásának szempontjából. Hiszen ha két kód valamelyik pozíciójában az előjelek azonosak, ezt kompenzálni fogja az, hogy egy másik pozícióban ellentétesek.

E rövid bevezetővel megismerkedtünk a spektrumkiterjesztés, a CDMA és a MUI fogalmával. Ugyanezek a fogalmak képezik az OCDMA alapjait is.

3. Optikai kódosztás: központi szervezés nélküli LANok

3.1. Alapelvek, ortogonális optikai kódok (OOC)

Az 1. ábrán feltüntettük egy optikai LAN vázlatát. A kódosztás rendkívüli előnye szembeűnő: egy összeköttetés létrehozásához lényegében elég, ha a feladó beállítja a címzett kódját; a protokollnak ezen kívül mindössze azt kell biztosítania, hogy a feladó értesüljön arról, hogy a címzett nem foglalt-e éppen.



1. ábra OCDMA LAN vázlatos felépítése

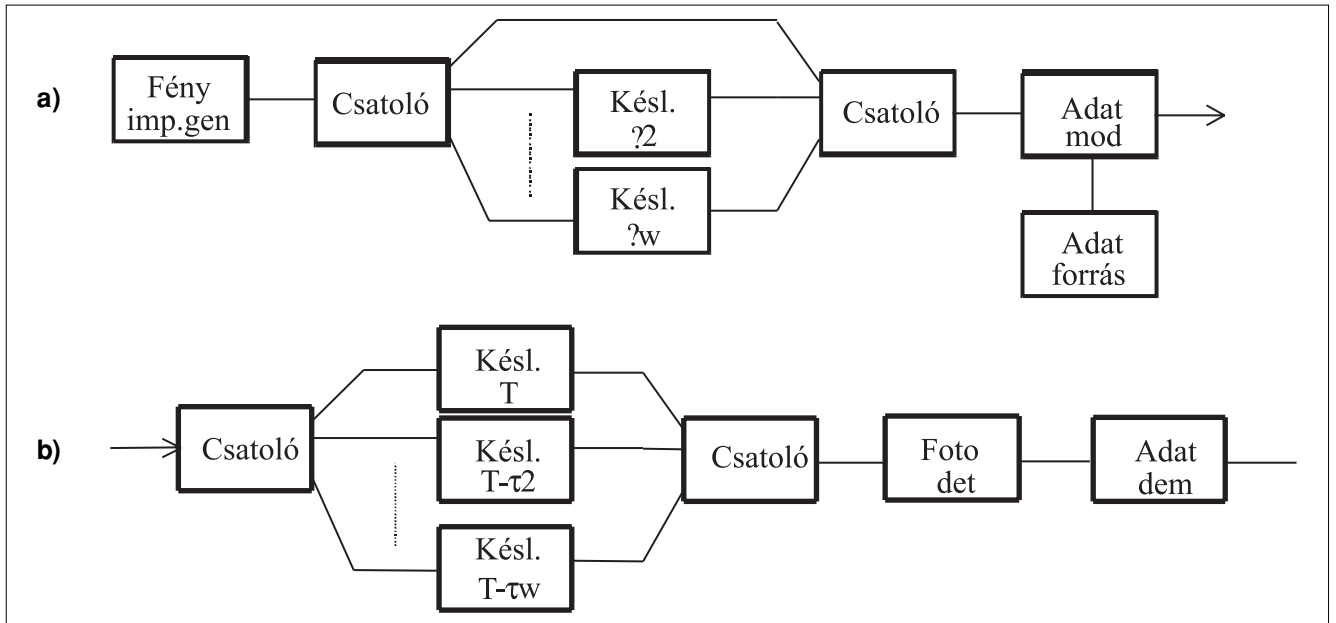
Ennek az egyszerűségnek az ára két feltétel. Mivel mindegyik vevő veszi az összes adást, a hálózat teljes forgalmát, a MUI-nak kellőképpen kicsinek kell lenni; továbbá a vett *jelsorozat* a vevőben szinkronizálni kell. Arról, hogy e két feltétel teljesüljön, a spektrum kiterjesztő kódoknak kell gondoskodni.

Ebből a szempontból az elektromos és az optikai átvitel lényegesen különbözik. Az elektromos frekvenciasávban az információt feszültség, áram (vagy elektromos, mágneses térerősség) hordozza. Ennek nagysága (vagy: az a paramétere, melyet a moduláció során változtatunk) egyaránt lehet pozitív vagy negatív; a bipoláris jelek viszonylag könnyen helyezhetők egymásutánba, hogy az eredő MUI kicsi legyen. Az optikai frekvenciasávban gyakorlati okokból szinte kizárólag intenzitásmodulációt használnak. Az intenzitás azonban pozitív mennyiség; így megfelelő kód-osztályok kialakítására lehetőségeink lényegesen szerényebbek. A viszonyokat alább tekintjük át.

Egyszerű digitális átvitelben bináris „0”-nak mondjuk 0 intenzitás, bináris „1”-nek a fényforrás (persze, a vevőbe érkeve, csillapított) intenzitása felel meg. A vevő egyszerű küszöb-detektor: ha a vett jel intenzitása a küszöbnél nagyobb, „1” javára, ha kisebb „0” javára döntünk.

A spektrum kiterjesztésének plauzibilis módja: a $c(t)$ kód T_C ideig tartó „0”-k és „1”-ek megfelelően választott sorozata. Ilyen módon a kódolt jelben a „0” adat-bitnek továbbra is 0 intenzitás, az „1”-nek az aktuális $c(t)$ sorozat felel meg. A spektrum kiterjesztés mértéke ilyen módon T/T_C .

A 2. ábrán feltüntettünk egy ún. passzív kódolót és dekódolót. A kód w darab „1”-ből (T idejű impulzusból) áll, hossza $F \cdot T_C$; célszerű választás, ha a kód (időbeli) hossza megegyezik a T bitidővel, így F egyúttal a spektrumkiterjesztés aránya. w -t a kód *súlyának* nevezik.



2. ábra a) Passzív kódoló, b) Passzív korrelátor

Az ábrákon $\tau_2 \dots \tau_w$ a megfelelő „1”-impulzusok időbeli helyzetét jelöli.

A korrelátor optikai illesztett szűrő (a kiterjesztő kódhoz illesztve). Mint látható, a megfelelő késleltetők a bit-idő végére összehozzák a w darab impulzust; ez az összeg a küszöbnél nagyobb, így az adat-demodulátor „1” javára dönt.

A 3. ábrán mutatott aktív rendszer – a passzív rendszerrel szemben – folytonos üzemű fényforrással működik, melyet (közvetlen vagy külső) modulátor vezérel. A vevőben pedig előállítják a kódot; ez lényegében egy kapcsolót vezérel, mely, szinkronizálva lévén a bejövő jellel, csak a megfelelő időpontokban érkező impulzusokat ereszti át. Több szempontból előnyösebb a passzív megoldásnál: az impulzusok teljesítménye itt megegyezik a fényforrás teljesítményével, míg ott ez w -ed részére le van osztva; továbbá az elektromos áramköröknek hosszabb, T szélességű impulzusokat kell csak

feldolgozni, míg a passzív változatban rövidebb, T_c szélességűeket, vagyis az sokkal gyorsabb áramköröket igényel.

Kicsit precízebben megfogalmazva az eddigieket, a spektrum kiterjesztő kód a következő alakban írható (5):

$$c(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k \cdot P(t - kT_c); c(t) = c(t + nT); n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

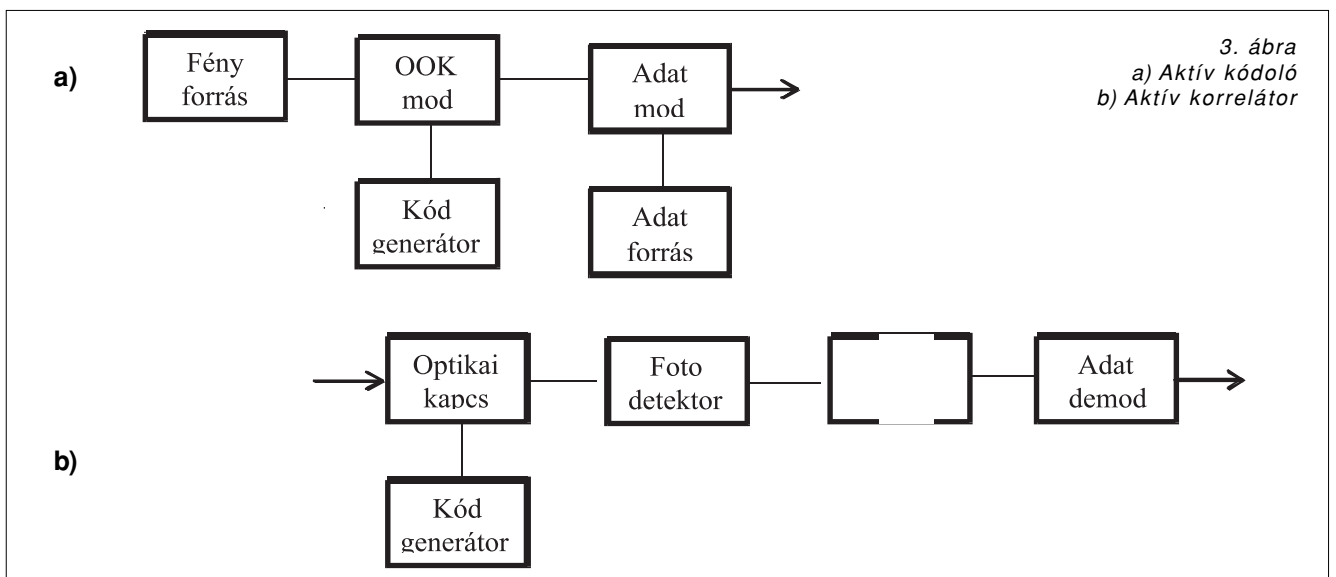
ahol $P(t)$ az impulzus jelalak, célszerűen T_c időtartamú négyzetimpulzus, és mint látható, $c(t)$ T szerint periodikus; így $x_{k+F} = x_k$.

A kódok korrelációs tulajdonságait az x_k sorozat korrelációs tulajdonságai szabják meg. Definíció szerint:

$$R_{x,y}(l) \triangleq \sum_{k=0}^{F-1} x_k y_{k+l} \quad (6)$$

Nyilván, ha $x=y$, R az x kód autokorrelációja;

ha $x \neq y$, R az x és az y kód keresztkorrelációja.



3. ábra
a) Aktív kódoló
b) Aktív korrelátor

Annak a feltétele, hogy a MUI kicsi legyen, mondjuk

$$R_{x,y}(\forall l) \leq \lambda_c \quad (7)$$

A szinkronizálhatóság feltétele pedig

$$R_{x,x}(l \neq 0) \leq \lambda_a \quad (8)$$

(megjegyezve, hogy $R_{x,x}(l=0) = w$).

Ideális esetben λ_a és λ_c egyaránt 0 volna. $\lambda_c=0$ az ortogonalitás feltétele. Kimutatható, hogy ilyen kódso-rozat nem létezik; azonban mindkét érték lehet 1. Az ilyen kódot hívják szigorúan OOC-nek (Optical Ortho-gonal Code). Tágabb értelemben azonban OOC-nek tekinthető minden sorozat melyben λ_a és λ_c kellően kis értékű. Az OOC-k jelölésére a következő szám-négyest használják: $(F, w, \lambda_a, \lambda_c)$, ahol, megismételjük, F a kód hossza és w annak súlya; így a *szigorúan vett* OOC $(F, w, 1, 1)$.

Az $(F, w, 1, 1)$ kódoknak legalább három hátrányos tulajdonságuk van. Közvetlenül belátható, hogy a korrelációs követelmények csak igen kis súly mellett teljesíthetőek; így a kódolt jel csúcs/átlegteltjesítmény aránya (F/w) igen nagy. Ugyancsak belátható, hogy egy kód mérete (a kódok N száma) igen kicsi, mint kimutatható:

$$N \leq \frac{F-1}{w(w-1)} \quad (9)$$

Kis N persze azt jelenti, hogy az előfizetők lehetséges száma kicsi. Illetve, harmadik hátrány, a spektrum kiterjesztésének aránya (F) igen nagy, ha jelentős számú előfizetőt akarunk elhelyezni; ez viszont azzal jár, hogy a felhasználók viszonylag kis sebességű jeleket vihetnek át, vagyis a spektrális hatékonyság elég kicsi.

Számpéldaként tegyük fel, hogy $F=6500$, továbbá hogy egy hullámhosszon átvihető impulzus hossza 20 ps. Így egy-egy felhasználó jelének sebessége legfeljebb $(1/6500 \cdot 20 \text{ ps}) \times 50 \text{ Mbit/sec}$ lehet. Plauzibilis feltevésnéként legyen a felhasználók maximális száma 50 (ekkor még elfogadható lehet a MUI-okozta hibaarány, mondjuk 10^{-4}), vagyis a teljes hullámhosszankénti jel-sebesség 2,5 Gbit/s – szemben a spektrumkiterjesztés nélküli 50 Gbit/s-al.

3.2. Néhány javított ortogonális optikai kódcsalád

Az előző pontban definiált „szigorú” OOC kódok korrelációs tulajdonságai a pozitív definit impulzussorozatok között a lehető legjobbak. Azonban hátrányos tulajdonságaik miatt jelentős (a számelmélet és a kombinatorika körébe tartozó) kutatómunka tárgya volt, hogy a korrelációra vonatkozó követelmények szerény enyhítésével sikerül-e jobb – elsősorban több tagból álló – kódokat találni. Néhány javított kódcsaládot alább sorolunk fel.

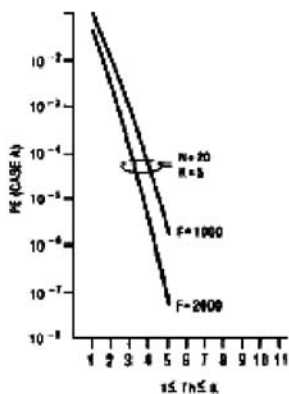
A **kvadratikus kongruens** kódok jellemzője a $(p^2 - 1, p, 2, 4)$ szám-négyes, ahol p tetszőleges prímszám; a kód mérete $N = p-1$. E kódcsaládnak van egy *kiterjesztett* változata, melyhez a kedvezőbb $(p^2 - 1, p, 1, 2)$ szám-négyes tartozik.

Gyakran idézik a **prím kódokat** a következő jellemzővel: $(p^2 - 1, p, p-1, 2)$. Mérete ennek is $N = p-1$, p most is prímszám. Mint látható az autokorreláció igen kedvezőtlen, szinte lehetetlenné téve a kódok szinkronizálását; ezért eredeti formájában csak az OCDMA *szinkronizált* változatában lehet használni; erről egy következő pontban röviden szólnunk.

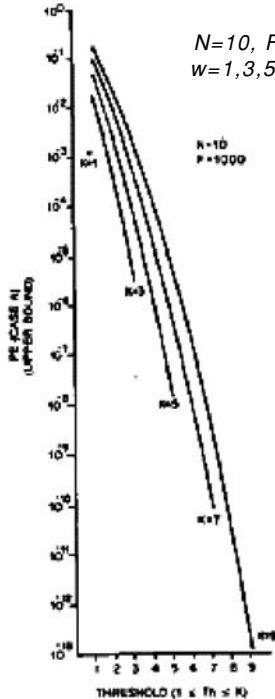
4. ábra

A MUI következtében fellépő hibaválósínűség felső korlátja a küszöb és a spektrumkiterjesztés aránya, a súly és a felhasználók számának függvényében

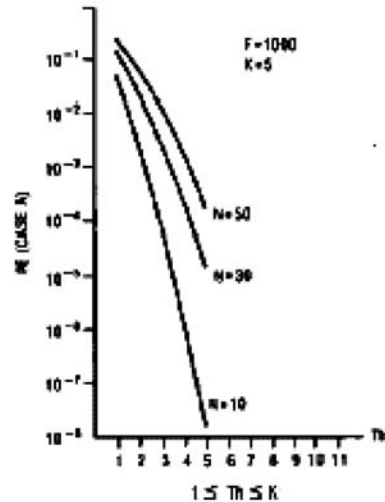
a) $N=20$ felhasználó, $(2400, 5, 1, 1)$ és $(1000, 5, 1, 1)$ kódok



b) $N=10, F=1000, w=1, 3, 5, 7$ és 9



c) $F=1000, w=5, N=10, 30$ és 50



A tökéletes különbségi (perfect difference) sorozatokon alapuló kódok különösen előnyösek: a korrelációs tulajdonságok alig romlottak, míg a kód mérete jelentősen megnőtt; történetesen (ellentétben a többi ismertetett kóddal) $N > F$.

3.3. Az ortogonális optikai kódok minősége

A következőkben a MUI-okozta hibavalószínűséget mutatjuk meg néhány kód-családnál.

Az 1. ábra szerinti hálózatot vizsgáljuk, és példaképpen, a 3/b. ábra szerinti detektor-elrendezést; a döntési szabály: bináris „0”, ha a korrelátor kimenő jele a küszöbnél kisebb, bináris „1”, ha azzal egyenlő vagy nagyobb. Feltesszük, hogy a MUI az egyetlen minőségrontó – hibás döntést okozó – hatás; ugyancsak feltesszük, hogy az adó és a vevő között a szinkronizmus tökéletes. MUI nélkül – vagyis ha egyedül a vizsgált összeköttetésen van forgalom, „0” bit adásakor a detektált jel nyilván 0, míg az „1” bitnél w ; a küszöb optimális értéke tehát w . Akkor az „1”-biteket mindig hibátlanul vesszük, hiszen az interferáló jel csak növelheti a hasznos impulzus intenzitását, mely a küszöböt úgyis eléri. (Itt feltételeztük, hogy a fényimpulzusoknak *intenzitása* és nem *térfőrsége* összegződik; e feltevés nyilván teljesül a különböző fényforrásokból származó impulzusok esetén, amint az az ábrán látható.) Azonban az interferenciából származó jelek összege önmagában is elérheti a küszöböt, így a „0” bitet érzékelhetjük hibásan „1”-nek. Az egyszerűség kedvéért feltesszük, hogy az összes felhasználó chip-szinkron állapotban van; a valóságban a chip-ek bizonyára el vannak csúsztatva egymáshoz képest. A chip-szinkron estre számított hibaarány tehát a ténylegesen fellépőnek felső korlátja lesz.

A 4. ábrán $(F, w, 1, 1)$ kódok tulajdonságait láthatjuk a küszöb és más paraméterek függvényében. Természetesen, ha valóban a MUI az egyetlen minőségrontó hatás, nem volna értelme w -nél kisebbre választani a küszöböt. A valóságban azonban más zajforrások is vannak – söréztaj, termikus zaj stb. – melyek csökkentik vagy növelik a hasznos jelet; így a küszöböt w -nél kisebbre kell választani, ami indokolja, hogy független változónak a küszöböt választottuk.

A „javított” kódokra példaként a tökéletes különbség sorozatokon alapuló kódok egy családjának minőségét mutatjuk be az 5. ábrán. Noha λ_c e kódoknál 1 helyett 2, ez a megnövelt érték csak nagyon ritkán fordul elő; ezért kis w értékeknél az összehasonlításként ugyancsak bemutatott „szigorú” OOC-re vonatkozó görbékkel a vizsgált kódok görbéi gyakorlatilag egybeesnek. (Az ábra az itt nem tárgyalt Yang-kódokat is tartalmazza.)

Megismételve erre az esetre is a 3.1. pont számpéldáját, legyen a rendszer sáv szélessége és a spektrum-kiterjesztés aránya az ottanival megegyező (minimum 20 ps impulzus-szélesség, illetve 6500). Ekkor a felhasználói sebesség az ottanival megegyezik, azonban 10^{-4} hibaarányal most 750 forrás működhet egyidejűleg. Így a rendszer teljes kapacitása közel kétszeresére nőtt.

4. OCDMA eltérő alkalmazásban

4.1. Szinkronizált OCDMA rendszerek

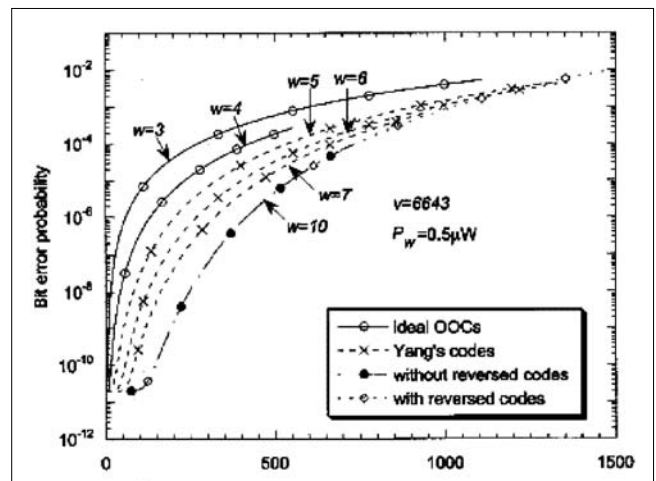
Mint korábban kifejtettük, OCDMA alkalmazásának fő előnye, hogy nem igényel semmiféle központi szervezést, vezérlést. Az eddigiekben ilyen rendszert vizsgáltunk, amely az ismertetett tulajdonságokkal rendelkezik. Ha ezt a követelményt kis mértékben enyhítjük, az OCDMA olyan változatához juthatunk, mely más szempontokból előnyösebb. Így megkívánhatjuk, hogy az egyes források bitjei homokronok és megfelelő időbeli elhelyezkedésben legyenek. Ebben az esetben a vett jelet nem kell külön szinkronizálni – de akkor elejtethetjük azt a követelményt, hogy az autokorreláció maximuma, λ_a kicsi legyen. Így például alkalmazhatjuk az előbbiekben említett prím-kódokat, illetve azok kissé módosított változatát. E módosított kódcsalád mérete $p \times (p-1)$, ahol p tetszőleges prímszám; sőt, egy adott kódot több forrás egyidejűleg használhatja (kivéve a kedvezőtlen időeltolásokban), többszörösére emelve a felhasználók lehetséges számát. Miután a kód súlya p , hibamentesen lehet átvinni $(p-1)$ forrás jelét, ha a MUI az egyetlen minőségrontó tényező; de a kedvező keresztkorrelációs tulajdonságok folytán jóval nagyobb számú jel is csak elfogadható hibaarányt okoz.

Maga a szinkronizálás művelete ugyan központilag, de elég egyszerűen oldható meg az adott esetben, vagyis *vezetékes*, földrajzilag *kis területen szétszórt* felhasználók hálózatában. Mondjuk a 2. ábra szerinti megoldásban egy központi impulzusgenerátor látja el az összes felhasználót. (Azt mondhatjuk, hogy a szinkronizált és aszinkron OCDMA olyan viszonyban van egymással, mint a réselt és nem-réselt ALOHA.)

4.2. OCDMA alkalmazása a nagytávolságú hálózatokban: kétdimenziós kódok

Természetes törekvés volt, hogy az OCDMA-kutatók eredményeit a távközlési gerinchálózatokban is fel lehessen használni. Az ismertetett kódok – és rendsze-

5. ábra Hibaarány az egyidejűleg aktív felhasználók számának függvényében



rek – gyakorlati okokból nem nagyon alkalmasak erre. Főként, azért mert számottevő kapacitású hálózat csak a spektrum igen nagy kiterjesztésével jön létre. Az adódó keskeny impulzusokat a LAN rövid távolságaira nehézség nélkül át lehet vinni, azonban nagy távolságokon az átviteli közeg diszperziója túl nagy torzítást okozna; ennek elkerülésére – az adott esetben drága – kiegyenlítő, diszperzió csökkentő egységeket kellene használni. Továbbá azt is láttuk, hogy az ismertetett kódok spektrális hatékonysága elég gyenge; ez nem különösen nagy hátrány LANokban, azonban nagytávolságú hálózatban nem fogadható el.

Másfelől ismeretes, hogy egy *sáváteresztő jellegű* rendszer vagy csatorna hasznos sáv szélessége sokszorosára növelhető, ha az átvinni kívánt jelet rész-jelekre tudjuk bontani és az egyes részeket más-más, egymáshoz közel fekvő vivők modulálásával visszük át.

A kétdimenziós vagy mátrix kódolásban ezt az elvet alkalmazzák; ebben időben és frekvenciában kódolják a fényt. Az alapelv a következő: az OOCt képező, „0”-kból és „1”-ekből álló sorozatot egy $r \times q$ mátrixba rendezik, mondjuk úgy hogy az első r elemmel az első sort töltik fel, és így tovább. A mátrix sorai egy-egy hullámhosszat, oszlopai egy-egy chip-időrést reprezentálnak; továbbá, ha a kód hossza $F < r \times q$, tetszőleges helyre további 0-kat írnak. Ezzel a módszerrel elérjük, hogy *egy hullámhosszon* a spektrum kiterjesztése ne F -szeres, hanem csak r -szeres legyen, közben megtartva az eredeti kód korrelációs tulajdonságait.

Példaképpen nézzük az (1010011) OOC kódszót (melyben $F=7$, $w=4$); ezt – két járulékos 0 beiktatásával – egy 3×3 -as mátrixba rendezzük:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & - \\ 1 & 1 & - \end{pmatrix}$$

ami azt jelenti, hogy egy „1” adatbitnek 3 chip hosszúságú sorozat felel meg, az első λ_1 és λ_3 , a második λ_3 és a harmadik λ_1 hullámhosszon. Ilyen sorozat létrehozható a WDM számára kidolgozott többfrekvenciás lézerral.

További előnye az ilyen kódoknak a család méretének lényeges növelése: a sorokat ciklikusan lejjebb mozgatva új, az eredetivel megegyező korrelációs tulajdonságú kódokhoz jutunk:

$$\begin{pmatrix} - & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & - \end{pmatrix} \quad \text{és} \quad \begin{pmatrix} - & 0 & 0 \\ - & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{stb;}$$

ezzel lényegesen megnövelhető az egyidejű felhasználók száma. Nem folytatva részletesen a kétdimenziós kódok vizsgálatát megemlíthetjük, hogy ezeket olyan formában is lehet módosítani, hogy minden időrésben csak egy hullámhossz szerepeljen; egyes többfrekvenciás lézerek csak így működnek.

Mint látjuk, e kódok jobb spektrális hatékonyságot biztosítanak, és több felhasználó egyidejű üzemelését

teszik lehetővé mint az eredeti definíciónak megfelelő OOCk. Egyebek között kimutatható, hogy spektrális hatékonyságuk jobb, mint ami DWDMmel elérhető, ha

$$n / r > 1 \tag{10}$$

ahol n a mátrix kódok kiindulásaként szereplő eredeti (OOC) kódok száma és r a bitenkénti időrések száma.

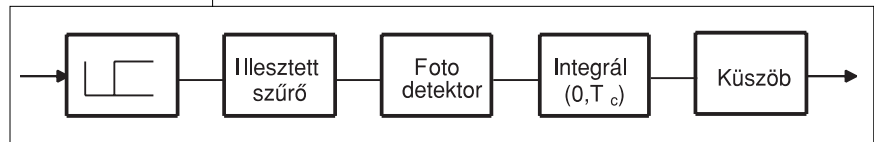
5. Vevő struktúrák, minőségromló hatások, adaptív módszerek

5.1. A minőséget javító vevő struktúrák

Az alapvető vevő struktúrákat bemutattuk az 1/b. és a 2/b. ábrán. Megjegyezzük, hogy minőségük azonos, megvalósításuk bonyolultsága azonban különböző: a passzív korrelátor sokkal bonyolultabb, minthogy elektromos sáv szélessége hozzávetőleg $1/T_c$, az aktív korrelátoré ennél sokkal kisebb, mindössze $1/T$. Ebben a pontban – figyelmünket aszinkron, 1-dimenziós spektrumkiterjesztő kódokra korlátozva – néhány olyan megoldást mutatunk be, melyek a hibás döntés valószínűségét csökkentik.

i. Kemény limiterrel kombinált korrelátor

A MUI csökkenthető, ha az (akár passzív, akár aktív) korrelátor előtt optikai kemény limitert alkalmazunk; a 6. ábrán példaképpen passzív korrelátorral kombinálva mutatjuk.



6. ábra Kemény limiterrel kiegészített passzív korrelátor

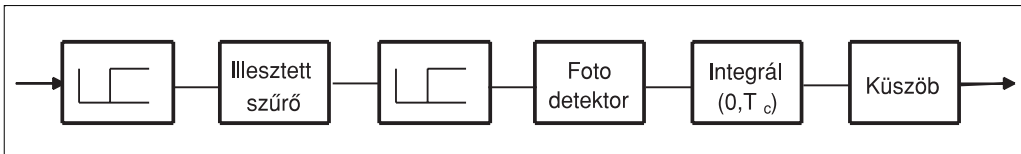
A működés megértéséhez vegyük figyelembe, hogy a kemény limiter (vagy az elektromos áramkörök terminológiájában szokásosabb nevén: amplitúdó komparátor) átviteli függvénye

$$g(x) = \begin{cases} 0; 0 \leq x < 1 \\ 1; x \geq 1 \end{cases} \tag{11}$$

Limiter nélkül egy „0” adatbitet „1”-nek veszünk, ha a megfelelő pozíciókban (vagyis a spektrumkiterjesztő kód „1” chipjeinek helyén) vett MUI teljesítmények összege meghaladja a küszöböt. Ha limiter is van, csak akkor döntünk hibásan, ha *egyenként*, minden megfelelő pozícióban legalább egységnyi a MUI teljesítménye.

ii. Kettős kemény limiterrel kiegészített korrelátor

E vevőben az illesztett szűrő után is van egy kemény limiter (7. ábra). Amennyiben a MUI az egyetlen zavarforrás a küszöböt w -vel, a kód súlyával megegyezőre kell beállítani. Ekkor egy limiterrel az előző pontban leírt hibacsökkentő hatást érjük el.

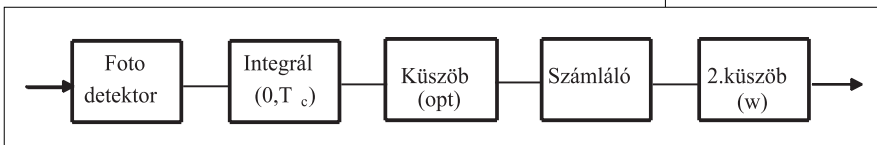


7. ábra Passzív korrelátor kettős limiterrel

A valóságban azonban – mint már említettük – más zajforrások is vannak, így a küszöböt w -nél kisebbre, például annak felére kell beállítani. Ekkora eredő teljesítmény azonban összeadódhat kisebb, részleges interferáló jelekből. Ennek valószínűségét csökkenti a második, az illesztett szűrő *utáni* limiter.

iii. Döntés chip-enként az elektromos tartományban

Az i.- ii. pontban ismertetett struktúrákban az optikai kemény limiter jelentősen csökkentené a hibaarányt. Sajnos azonban a gyakorlatban is használható optikai kemény limiter egyelőre (vagy legalább is ez volt a helyzet 2001-ig) nem áll rendelkezésre. Mint kimutatható azonban, a 8. ábrán bemutatott elrendezés minősége reális körülmények között jól megközelíti a kettős limiterrel elérhető minőséget.



8. ábra Chipenként döntő vevő elrendezés

Az első küszöb úgy van beállítva, hogy az egyes chippek „0” vagy „1” értékét optimálisan lehessen eldönteni. A második küszöb az adat-bitet „1”-nek értékeli, ha a számláló w vagy több „1” chipet számolt meg, az ellenkező esetben „0”-nak.

5.2. Az átvitel minőségének meghatározása – hibás döntést okozó hatások

Digitális jel átvitele esetén – e cikkben csak ezzel foglalkozunk – a fő minőségi jellemző, persze, a hibaarány. Ha a forrás, mint mindig, bináris, kétféle hibás döntés lehetséges: adott „1”-et „0”-nak vagy adott „0”-t „1”-nek érzékelünk. Mint már említettük, ha az egyetlen minőségrontó hatás a MUI volna, az „1”-eket hiba nélkül vinnénk át: az interferáló forrásokból származó jel mindenképpen *növeli* a küszöböt úgyis elérő intenzitást. Mivel azonban további zajforrások is vannak, mindkét hibatípus előfordul, azonos vagy különböző valószínűséggel.

Ha a fotodetektor PIN dióda, a következő zajforrásokat kell figyelembe vennünk: i. a MUI miatti zaj; ii. a háttérzaj; iii. a (fény kvantált természete miatti) sörétzaj; és iv. a fotodetektor utáni elektromos erősítő termikus zaja. Lavinadiódás fotodetektor esetén ezekhez járul még v. a véletlenszerűen változó elektronsokszorozás miatti zaj.

Ezek közül a háttérzaj igényel megfontolást, mivel az optikai szálban tényleges háttérzaj valószínűleg nin-

csen; azonban e kategóriába sorolhatunk két zajforrást: a fotodetektor sörét áramát (ennek sörétzaját), valamint a modulátor nem

tökéletes lezárásából (extinction) származó fényt, ennek sörétzaját „0” chip adásakor.

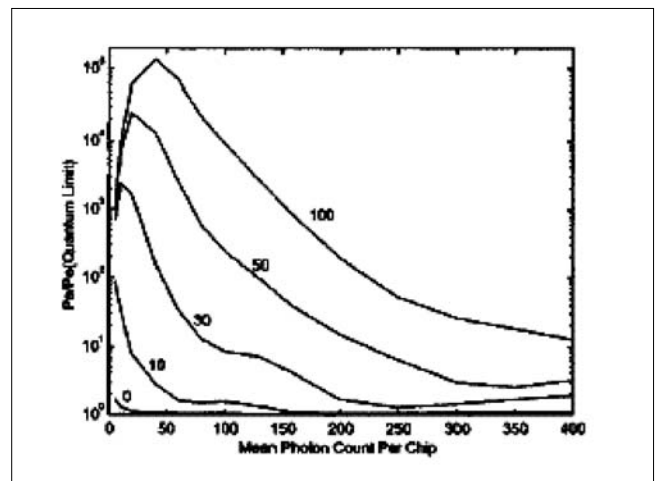
Áttekintve az egyes zajforrások tulajdonságait, a MUI erősen függ a vevő felépítésétől, amint azt az előző pontban mondtuk; az általa okozott hibák valószínűsége mindegyik esetben binomiális eloszlású valószínűségi változókkal van kapcsolatban; a sörétzaj és a háttérzaj Poisson-eloszlásúként modellezhető, bár eredőjüket néha Laguerre-eloszlással jellemzik; a termikus zaj persze Gauss-eloszlású. Figyelembeveendő még az a tény is, hogy az utóbbi három az optikai teljesítménytől is függ. A hibavalószínűség egzakt meghatározásához ezek együttes valószínűségi sűrűségét kellene ismerünk. Ez ugyan nem lehetetlen feladat – például a független összetevők karakterisztikus függvényének, mely az összetevők függvényeinek szorzata, inverz Fourier-transzformáltját meg lehet határozni – azonban közelítő módszerek előnyösebbnek bizonyultak. Érdekes módszerként megemlíthjük, hogy a hibavalószínűség (aszimptotikus) közelítő kifejezésének meghatározásához sikerrel alkalmazták a nyeregpontmódszert.

Ilyen számítások eredményének illusztrálására bemutatjuk a 9. ábrát, mely a termikus zaj hatását mutatja az 1/b. ábra szerinti vevő struktúra esetén.

5.3. Adaptív módszerek

Megfontolásainkból látható, hogy a MUI, ha nem is egyedül meghatározó, de mindenesetre jelentős hatással van egy OCDMA összeköttetés minőségére.

9. ábra
A számított hibaarány a kvantum-határnak megfelelő hibaarányhoz viszonyítva sötétáram és termikus zaj jelenlétében; független változó a chip-enkénti fotonok száma, paraméter a termikus zaj szórásnégyzete; a sötétáram állandó, 5 foton/chip-nek felel meg.



Ennek megfelelően a döntési küszöb optimális beállítása függ – alapvetően függ – a MUI nagyságától. Amennyiben a döntési küszöböt fixen állítják be, e beállításnak, nyilván, függnie kell a MUI statisztikájától; másfelől ez a felhasználók aktivitásától függ. Bármennyire alapos ismereteink vannak is a felhasználók aktivitásáról, az mindenképpen igen tág határok között változik. Indokolt ezért adaptívan beállítani a küszöböt.

Az adaptív beállításhoz valamilyen becsléssel kell rendelkezünk a MUI aktuális nagyságáról. Ennek egy módja a következő megfontoláson alapulhat. Osszuk fel a jelteret két részre: az egyik rész az, mely a vizsgált vevő számára hasznos jelet és a „rárakódó” MUI-t tartalmazza; a másik rész a jeltérnek ezen kívüli része. E *komplementer* jeltérben van az összes többi (éppen aktív) összeköttetés teljesítményének nagy része, amit meg tudunk mérni. Azonban az aktuális összeköttetés zavaró MUI (a többi adónak a jeltér első részére eső hányada) ezzel arányos lesz.

Az *arányossági tényezőt* a rendelkezésre álló statisztika alapján sokkal megbízhatóbban tudjuk megbecsülni, mint magát a MUI-t, így a döntési küszöb a komplementer jeltérben levő teljesítmény ismeretében adaptívan beállítható.

6. Összefoglaló megjegyzések

Igen vázlatos formában bemutatottuk az optikai kódosztású többszörös hozzáférés elvét, alapvető technikáját és felhasználási lehetőségeit. Utaltunk az elméleti vizsgálatok néhány fő irányára is. Mint látható, az optikai hírközlésnek ez az ága igen nagy érdeklődést keltett a kutatók körében és ez az érdeklődés nem látszik csökkenni a kezdetek – úgy a múlt század kilencvenes éveinek közepe – óta.

Nem akarván a tárgyalást elfogadhatatlanul hosszúra nyújtani, csak digitális jelek átvitelével és azon belül csak a magyarul is elterjedt jelöléssel OOK-nak (On-Off-Keying, ki-be kapcsolás) nevezett modulációval foglalkoztunk, elégségesnek véelve azt az alapelvek bemutatásához. Ehelyütt megemlíjtük azonban, hogy a digitális átvitel körében intenzíven vizsgálták a bifázisúan kódolt átvitel alkalmazását is.

Ugyancsak megemlíjtük, hogy – az elmondottaktól nagyobb mértékben eltérő területként – analóg jelek optikai átvitelében is vizsgáltak OCDMA hálózatokat. Konkrétan egy területen: mikrohullámú jelek optikai átvitelében jósolnak jövőt a kódosztású többszörös hozzáférésű hálózatoknak.

A sok lelkesítő eredmény között egy lehangoló tény is meg kell említenünk: a széleskörű és jelentős elméleti, szimulációs, gyakorlati eredmény ellenére tényleges gyakorlati felhasználásra ismereteink szerint, működő hálózatban még nem került sor. (Ez az információ 2001 közepéről való, de a szerző ismeretei szerint áttöresre azóta sem került sor.)

Irodalom

Ez a cikk a kiválasztott technika vázlatos ismertetésével, inkább csak alapelveivel foglalkozik, a részletek mellőzésével. Ezért a szerző úgy vélte, hogy nem helyénvaló a szövegben referenciákat adni egy-egy gondolatnál. Azonban az alábbi bibliográfia művei részletesen tárgyalják az összes, kisebb vagy nagyobb részletességgel említett témakört.

A kiterjesztett spektrumú hírközlés néhány általános műve:

Dixon, R.C.,
Spread spectrum systems with commercial applications,
New York etc, Wiley, 1994.

Holmes, J.K,
Coherent spread spectrum systems, New York, Wiley, 1982.

Verdù, S.,
Multiuser detection,
Cambridge, Cambridge University Press, 1998

Az OCDMA-t megalapozó művek:

Jawad A. Salehi,
"Code division multiple-access techniques in optical fiber networks – part I: Fundamental principles,"
IEEE Transactions on Communications,
vol.37, pp.824-833, Aug. 1989.

Jawad A. Salehi and C.A. Brackett,
"Code division multiple-access techniques in optical fiber networks - part ii: Systems performance analysis,"
IEEE Transactions on Communications,
vol.37, pp.834-842, Aug. 1989.

http://www.co.it.pt/~slug/research/optical_CDMA/final_report/final_report.html

J.-J. Chen and G.-C. Yang,
"Cdma fiber-optic systems with optical hard limiters,"
IEEE Journal of Lightwave Technology,
vol.19, pp.950-958, July 2001.

J.T. Tang and K.B. Letaief,
"Optical CDMA communication systems with multi-user and blind detection,"
IEEE Transactions on Communications,
vol.47, pp.1211-1217, Aug. 1999.

D. Brady and S. Verdù,
"A semiclassical analysis of optical code division multiple access,"
IEEE Transactions on Communications,
vol.39, pp.85-93, Jan. 1991.

H. Al Raweshidi, S. Komaki ed.:
Radio over Fiber Technologies..., London, Boston, 2002,
Artech House

OOK sorozatok:

S.V. Maric, Z.I. Kostic, and E.L. Titlebaum,
"A new family of optical code sequences for use in spread-spectrum fiber-optic local area networks,"
IEEE Transactions on Communications,
vol.41, pp.1217-1221, Aug. 1993.

G.C. Yang and Wing C. Kwong,
"Performance analysis of optical CDMA with prime codes"
Electronics Letters, vol.31, pp.569-570, March 1995.

Chi-Shun Weng and Jingshown Wu,
Optical orthogonal codes with nonideal cross correlation,
J. Lightwave Tech, vol.19, No.12, pp.1856-63, Dec. 2001.

Wing C. Kwong, P.A. Perrier, and P.R. Prucnal,
"Performance comparison of asynchronous and
synchronous code-division multiple-access techniques for
fiber-optic local area networks," IEEE Transactions on
Communications, vol.39, pp.1625-1634, Nov. 1991.

Szinkronizált rendszerek, 2- és 3-dimenziós kódok:

Antonio J. Mendez & al,
Strategies for realizing optical CDMA for dense,
high-speed, long span, optical network applications
Journal of Lightwave Technology,
vol.18, No.12, pp.1685-1696, Dec. 2000.

Yang Kwong,
Performance comparison of multiwavelength CDMA and
WDMA CDMA, IEEE Transactions on Communications,
vol.45, No.11, Nov. 1997.

Sangin Kim, Kyungsik Yu, and Namkyoo Park,
A new family of space/wavelength/time spread three-
dimensional optical code for OCDMA Networks,
Journal of Lightwave Technology,
vol.18, No 4, pp.502-511, Apr. 2000.

S. Zahedi and Jawad A. Salehi,
Analytical comparison of various fiber-optic CDMA receiver
structures, IEEE Journal of Lightwave Technology,
vol.18, pp.1718-1727, Dec. 2000.

H.M.H. Shalaby,
"Synchronous fiber-optic cdma systems with interference
estimators," IEEE Journal of Lightwave Technology,
vol.17, pp.2268-2275, Nov. 1999.

Minőségi analízis:

Carl W. Helstrom,
"Approximate evaluation of detection probabilities in
radar and optical communications," IEEE Trans. Aerosp.
Electron. Syst., vol. AES-14, pp.630-640, July 1978.

Carl W. Helstrom,
Performance analysis of optical receivers by
the saddlepoint approximation IEEE Transactions on
Communications, COM-27, No.1, pp.186-191, Jan. 1979.

J.T. Tang and K.B. Letaief,
"Bit-error rate computation of optical CDMA communication
systems by large deviations theory," IEEE Transactions
on Communications, vol.46, pp.1422-1428, Nov. 1998.

"Optical CDMA Product Stirs Debate"
in Light Reading, July 11, 2001.
http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=6665

K. Schumacher and J.J. O'Reilly,
"Relationship between the saddlepoint approximation
and the modified chernoff bound," IEEE Transactions on
Communications, vol.38, pp.270-272, March 1990.

OCDMA analóg (mikrohullámú) hálózatokban:

I. Frigyes,
Noise performance of some monopulse processing
schemes for orbital satellite tracking,
Proc. of the 8th MICROCROLL, Bp., 1986, pp. 451-452.

S.J. Park, K. Tsukamoto, S. Komaki,
Proposal of CDMA Cable-to-the-Air System,
Proc. IEICE Spring Conference,
Vol. SB-5-8, March 1996, pp. 665-666.

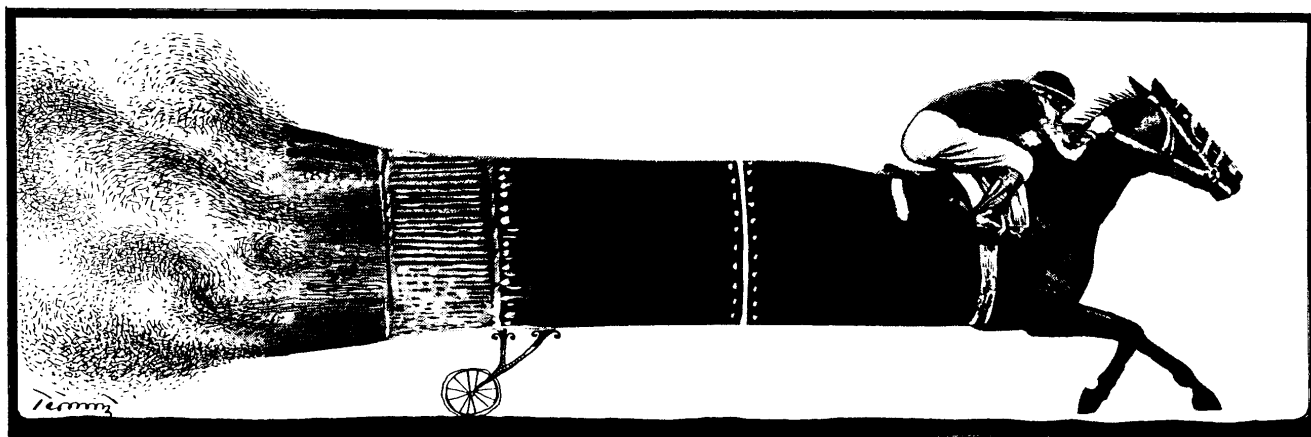
S.J. Park, K. Tsukamoto, S. Komaki,
Polarity-reversing type photonic receiving scheme...,
IEICE Trans on Electron, vol. E81-C, No.3, March 1998,
pp.462-467.

S.J. Park, K. Tsukamoto, S. Komaki,
Performance analysis of DOS SCMA cable-to-the-air network
Proc. SPIE, vol. 3420-04, Taiwan, July 1998, pp.20-29.

W.D. Jemison, PA; E. Funk, M. Bystrom, P.R. Herczfeld,
I. Frigyes, T. Bercei,
Fiber Radio: From Links to Networks paper Tu4-19
IEEE International Topical Meeting Microwave Photonics
October 7-10, 2001.

S. Tamura, S. Nakano, K. Okazaki,
Optical code-multiplex transmission by Gold sequence,
Journal of Lightwave Techn., vol. LT-3 No.1, Feb. 1985,
pp.121-127.

S.J. Park, K. Tsukamoto, S. Komaki,
Polarity-reversing type photonic receiving scheme...,
IEICE Trans on Electron, vol. E81-C, No.3, March 1998,
pp.462-467.



Hullámhossz-osztásos, csomagkapcsolt optikai hálózatok

DEME ILDIKÓ, KOVÁCS ATTILA PH.D. HALLGATÓK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
deme@mht.bme.hu, kovacs@mht.bme.hu

Kulcsszavak: WDM, csomagkapcsolt optikai hálózatok, optikai címfeldolgozás

Napjaink egyre növekvő sávszélesség igénye szükségessé tette a nagysebességű, transzparens optikai hálózatok alkalmazását. Mivel az aktív optikai eszközök nagy része még fejlesztés alatt áll, és a használatukkal járó megkötések miatt a hálózati eszközöket tervező mérnökök a legtöbb esetben korlátokba ütköznek, így joggal merül fel a kérdés: milyen fejlesztési, kutatási irányzatok várhatóak a közeljövőben, milyen konkrét problémák várnak megoldásra? Cikkünk a modern, csomagkapcsolt optikai hálózatok várható fejlődési irányzatait próbálja bemutatni különös tekintettel a soros és segédvívös címzést alkalmazó megoldásra. Az optikai csomagkapcsolás elvi és gyakorlati problémáira egyaránt kitérünk.

Ha végig követjük az elmúlt tíz év IP hálózatainak fejlődését, akkor elmondhatjuk, hogy az szinte minden, a skálázhatósággal, menedzselhetőséggel vagy éppen átlátszósággal szembeni igényt kielégíti. A cikk tartalmi korlátai miatt még az IP hálózatok nyújtotta szolgáltatások töredékét sem tudjuk felsorolni. Azonban, mint a legtöbb rendszernek így ezeknek a hálózatoknak is vannak vele született korlátai. Nevezetesen a sebesség, a sávszélesség és a csatorna kihasználás. A felforruló problémákra az optikai hálózatok alkalmazása nyújt egy lehetséges alternatívát, ám az egyben számtalan, újabb megoldandó probléma elé állítja a kutatókat és a fejlesztőket.

Cikkünk konkrét megoldásokon keresztül világít rá ezek közül néhányra. Az alábbiakban kizárólag a csomagkapcsolt hálózatok vizsgálatára szorítkozunk. Sorra veszünk néhány alapfogalmat, és megvizsgáljuk az optikai címzéslehetőségeit. Bemutatunk egy lehetséges optikai router architektúrát, amely egyben szemlélteti a megoldandó problémákat is.

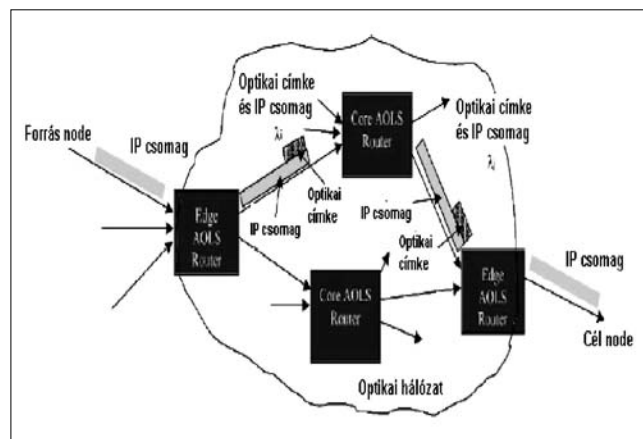
Csomagkapcsolt optikai hálózatok

Nagysebességű optikai gerinchálózatok már néhány éve világszerte működnek, de ezen hálózatokban a dinamikus útvonalválasztás, a széleskörű forgalommenedzsment, a transzparencia és a skálázhatóság a mai napig nem megoldott. Akár az IP hálózatokban, itt is szükség van útvonalválasztó eszközökre, úgynevezett routerekre. Ezek az eszközök számos paraméter figyelembe vétele alapján (pl. a *routing tábla*, amely az egyes bejövő adatcsomagok címe alapján a csomaghoz rendelt útvonalat tartalmazza –, prioritások, adatforgalom, stb.) meghatározzák az adott csomag továbbításának útvonalát. Ez az „útvonal” lehet egy adott optikai szál, vagy (hullámhossz osztásos rendszereknél) egy adott hullámhossz is. A konkrét útvonal kijelölését *optikai kapcsoló mátrixok*, illetve *hullámhossz konverterek* végzik.

A gyors működés alapfeltétele, hogy minél kevesebb optikai/elektromos átalakítást hajtsunk végre, és ahol lehetőségünk van, ott az optikai tartományban végezzük el az adatcsomaggal, az irányítással (routeléssel) járó műveleteket. Nyilván a rendszernek ez a leggyengébb pontja. Ezért, továbbá az IP hálózatokkal való transzparencia miatt, kétféle routert különböztetünk meg. Úgynevezett edge azaz élroutert, és core másnéven belső hálózati routert (1. ábra).

Az élrouterek mindig az optikai és az IP hálózatok határán foglalnak helyet. Szerepük a transzparencia biztosítása és a kapszuláció, enkapszuláció. Ezekben az eszközökben elkerülhetetlen az optikai elektromos átalakítás, ezért sebességük korlátozott, de ugyanakkor kiküszöbölik a tisztán optikai rendszerek egy rendkívül jelentős hátrányát, nevezetesen azt, hogy az optikai rendszerek nem rendelkeznek az elektromos memóriákhoz hasonló optikai tároló képességgel. Emiatt bármilyen műveletet is végzünk az optikai tartományban lévő adattal, azt a művelet idejére csak optikai készletelés használatával tudjuk tárolni (bufferelni). Az optikai tárolás lehetséges megoldásait a core router felépítését taglaló részben említjük meg.

1. ábra Optikai/IP hálózat



Az edge router egyfajta átjáró az IP hálózatok és az optikai hálózat között. Mivel tartalmaz elektromos memóriát, így lehetőség nyílik arra, hogy a változó hosszúságú, többnyire nagyon rövid IP csomagokat tárolja, majd réselt optikai hálózat esetén a megfelelő és mindig állandó csomagméretet létrehozva továbbítja az optikai hálózat felé. Réseletlen optikai hálózatok esetén változó lehet a továbbított csomag mérete, annak csak minimális hosszára kell megkötést tenni. A minimális hosszát a későbbi, core routerekben történő minimális címfeldolgozási idő határozza meg. Az elektronikus memória használatával a különböző hálózatok felé mutatott átlátszóság is megoldott, legyen az szinkron (SDH SONET), vagy aszinkron (IP). Az edge router feladatai közé tartozik az IP címek optikai címmé való leképezése is. Ha maximalista tervezési szempontokból indulunk ki, akkor olyan optikai hálózat kialakítása lenne a cél a jövőben, amely IP transzparens, nem réselt, azaz a csomagok hossza tág határok között változhat, valamint hullámhossz osztásos csomagkapcsolt felépítésű.

A továbbiakban ezen hálózatok lehetséges, és egyben fejlesztés alatt álló változatával foglalkozunk.

Optikai cím

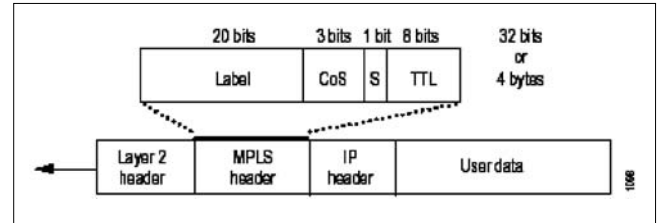
Az optikai cím szerepe hasonló az IP címéhez. Egyrészt kijelöli a hozzá tartozó csomag célcímét és közvetve annak útvonalát, másrészt az optikai csomag kezdetét és végét is jelezheti. A cím kizárólag az optikai hálózaton belül érvényes, mivel az edge router teszi a csomaghoz és távolítja is el az optikai hálózat határainál. Az optikai címek és az általuk kijelölt útvonalak a *routing táblákban* tárolódnak. A cím hosszát és felépítését az alábbi szempontok határozzák meg.

A hossza jelentősen befolyásolja a címinformáció feldolgozási idejét. Ez az idő a cím hosszától és bitsebességétől függő *felismerési időből* (*recovery time*) és a címinformáció alapján történő útvonal kijelölésből tevődik össze. A cím tartalmaz egy *előtagot* (*preamble*) amelynek a szinkronizációban van szerepe, magát a *címinformációt*, opcionálisan *start* és *stop* „*unique word*”-öket, amelyek a címinformáció kezdetét és a végét határolják, és *élettartam biteket*, (*Time to Live, TTL*) amelyek az esetlegesen végtelen ciklusban keringő csomagokat hivatottak kiszűrni. Mindezen kívül szükség lehet a csomagtovábbítás minőségének (sorban állások és ütközések kezelésének) jelzésére is (*QoS, Quality of Service bitek*). Az optikai címezést használó csomagkapcsolt hálózatokat tekintve jelenleg két fő irányzat van kibontakozóban. Az *MPLS (Multi Protocol Label Switching)* rendszerek továbbfejlesztéseként megjelenő *MPλS (Multi Protocol Lamda Switching)** [2,3,4], illetve a tisztán optikai csomagkapcsolású (*AOLS, All Optical Label Swapping*) hálózatok [1].

* Az MPLS általánosítása a GMPLS, mely magába foglalja a „hullámhossz”, helyesebben az „optikai csatorna” kapcsolást is. Az MPλS ennek az eljárásnak egy régebbi megnevezése. (Szerk. megj.)

MPLS struktúra esetén az optikai cím (2.ábra) rövid, fix hosszúságú 32 bites címkéket jelent. Az MPLS rendszer ezeket a címkéket az adatcsomagok (IP csomag fejléce) fölé helyezi. Ebből következően az MPLS transzparens, hiszen nem függ az alatta lévő hálózati rétegtől (ATM, Frame Relay, SDH, stb.).

2.ábra MPLS fejléc



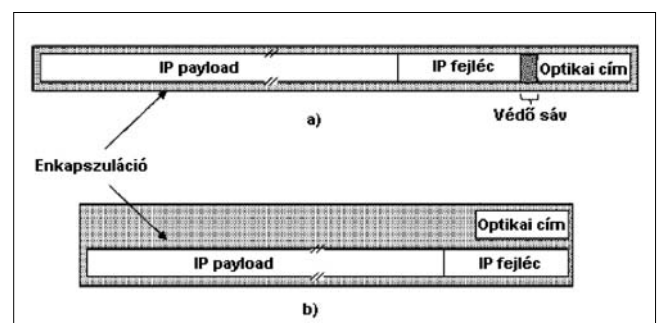
Az MPλS WDM linkekre és OXC (*optical crossconnect*) node-okra épül. Ezenknél a hálózatoknál az OXC útvonalkapcsoló elemek egy-egy hullámhosszat egyedi címként kezelnek. Mivel az OXC egyszerű *optikai kapcsoló*, és nem képes szétosztani az egy hullámhosszhoz tartozó adatot több irányba, így ezen hálózatok hátránya, hogy skálázhatóságuk a rendelkezésre álló hullámhosszak (OXC-k) számától függ, amely jelenleg kb. 100 de a jövőben ez 3000-re is bővíthet. Az MPIS hálózatok legfőbb előnye, hogy valós idejű, dinamikus csatornakiosztást tesznek lehetővé.

Az MPIS rendszerrel [2,3,4] ellentétben, ahol az optikai címet különböző hullámhosszak kombinációja jelenti, a tisztán optikai csomagkapcsolásos hálózatokban (AOLS) a cím feldolgozása optikai/elektromos átalakítás nélkül, optikai korrelátorok segítségével történik. A rendszer előnye, hogy jóval gyorsabb útvonalirányítást tesz lehetővé. Kivitelezése nehézkes és drága. A jelenleg feldolgozható optikai címek pedig viszonylag rövidek, így a hálózatok mérete korlátozott. Erre csak a címezésre használható hullámhosszak számának növelése nyújthat megoldást. A következőkben két, különböző lehetséges módszerrel megvalósított optikai csomagkapcsolást írunk le.

Soros címezés

Soros címezés esetén (3/a. ábra) az optikai cím az adatcsomag elé van fűzve. Az adat és a cím között biztonsági időrést (*Guard Band*) kell hagyni.

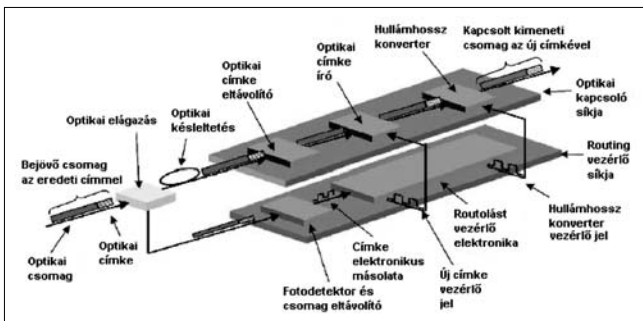
3.ábra Optikai címezési módok
a) soros címezés b) segédvívős címezés



Mivel a cím és az adat is optikai tartományban kerül továbbításra, hogy elkerüljék az optikai-elektromos átalakítást a címet optikai korrelátorok segítségével dolgozzák fel, bár a cím információ elektronikus feldolgozása is lehetséges. Az optikai címfeldolgozás *FBG* (fiber Bragg grating) technológián alapul [2,3,4]. Ebben az esetben az optikai címet hullámhossz billentyűzéssel előállított, néhány bit hosszú szavak jelentik. Ha például 1 csatornában X hullámhossz áll rendelkezésre, akkor az adatcsomag számára dedikált hullámhosszon kívül $W=X-1$ hullámhossz használható az optikai cím leírására. A címeket az egymás után következő hullámhosszak sorrendje különbözteti meg. Ha minden hullámhosszat csak egyszer engedünk meg használni az optikai címben, akkor $K^W - (K-1)^W$ számú egyedi címet hozhatunk létre, ahol W a címzésre használható különböző hullámhosszak száma, K az optikai cím hossza bitekben. Ez például 16 különböző hullámhosszat és 8 bites címet figyelembe véve több mint a ma rendelkezésre álló IP címek száma (2^{32}). Jelenleg mintegy 100 különböző hullámhossz kezelésére képes eszközök állnak rendelkezésre, de a jövőben ez a szám elérheti a 3000-t is. Ez jól tükrözi a több-hullámhosszas címzésű optikai hálózatokban rejlő skálázhatóságot. Az *FBG* címfeldolgozás sajátossága, hogy ha az optikai korrelátor egyezést érzékel, csak az előre meghatározott irányba tudja irányítani a csomagot, az irány dinamikus változtatása nehézkes és lassú.

A másik lehetőség, ha a soros optikai címet a segédvívös címzéshez hasonlóan elektronikusan dolgozzuk fel (4. ábra). Ez úgy történik, hogy az optikai adatcsomag fénytjeljesítményének egy részét kicsatoljuk, és detektáljuk, majd elektromos alapsávi jellé alakítva feldolgozzuk.[1] Ezalatt az eredeti adatcsomag változatlan formában, ám késleltetve halad tovább, miközben a fejléc eltávolításra és hullámhossz konverzió után újraírásra kerül.

Az optikai cím és az adatcsomag bitsebessége egymástól viszonylag függetlenül tág határok között változhat. A címke bitsebességének csak az elektronika borsztös feldolgozási sebessége szab határt.

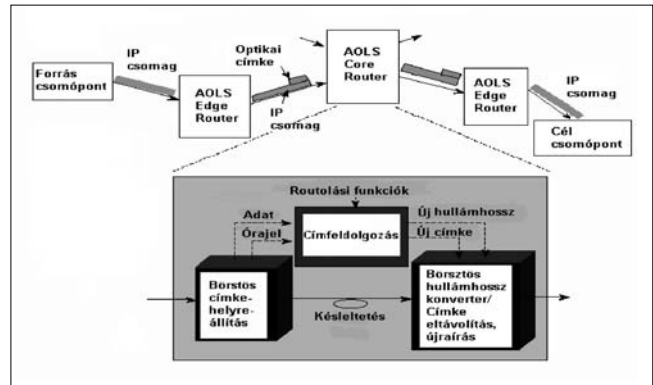


4. ábra AOLS elektronikus címfeldolgozással

Segédvívös címzés

Segédvívös címzést használva [5] (3/b. ábra) a cím információ az adattal megegyező hullámhosszon, ám attól spektrumban néhány GHz-el távolabb kerül továbbításra.

Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy az adattól függetlenül a cím információ optikai szűréssel elkülöníthető, és az adatcsomag módosítása nélkül feldolgozható legyen. Természetesen a tisztán optikai címfeldolgozás nem lehetséges, a cím információt alapsávi elektromos jellé kell alakítani. Az elektronikus címfeldolgozás és útvonalirányítás (5. ábra) az adatcsomag késleltetése alatt történik.



5. ábra Segédvívös címzésű AOLS routing

Az IP csomagok enkapszulációja után az edge router által generált optikai cím változatlan marad az optikai hálózaton belül. Annak feldolgozására és a hullámhossz konverzió után, az új hullámhosszú adatcsomag segédvívjére való modulálására van szükség. A módszer előnye, hogy rendkívül flexibilis címstruktúra használható, hiszen annak csak a címfeldolgozó áramkörök sebessége szab határt. Mivel az optikai cím hossza lényegesen kisebb, mint a *hasznos terhelés* (néhány byte), ez nagyságrendekkel kisebb címfeldolgozási sebességet tesz lehetővé. Így olcsóbb, egyszerűbb áramkörökkel megvalósítható a vezérlés.

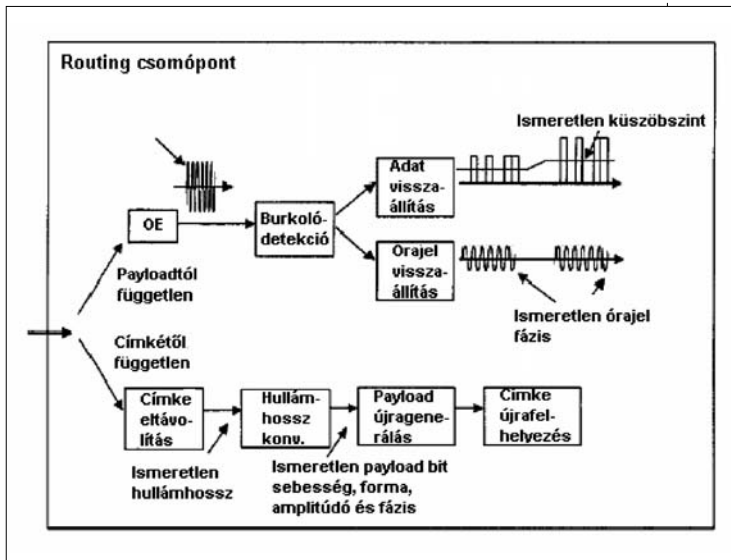
A csatorna kihasználtsága maximalizálható, ha az útvonalirányítást a hasznos terhelés időbeni hossza alatt végrehajtjuk. Ekkor ugyanis a csomagok minimális szünetekkel követhetik egymást. Mivel az adatcsomagok hossza tág határok között változhat, továbbá egy-egy hullámhossz nem csak egy konkrét címnek felletethető meg, így a rendszer rendkívül jól skálázható.

Core router

A belső routerek felépítése és funkciója merőben eltér az edge routerekétől.

Feladata a bejövő adatcsomag optikai címe alapján annak továbbítására használt útvonal kiválasztása, és az adatcsomag hullámhossz konverziójával történő elirányítása. Funkcionális felépítése a következő (6. ábra, 7. ábra):

A bejövő adatcsomaggól vissza kell nyernie a cím információt, amely a különböző hullámhosszúságú csatornák *multiplexálásával* és a fejléc leválasztásával, majd annak optikai vagy elektromos úton történő feldolgozásával történik. Segédvívös címzés esetén a multiplexer és *szűrő fokozatok* után, (amelyek szétválasztják az e-



6. ábra Core router főbb funkciói

gyes hullámhosszakot, illetve a hasznos terhelést és a segédvívön lévő címet), az optikai tartományban lévő címet detektálják (O/E konverzió) és alapsávba keverik le. A bősztős adattovábbítás miatt minden egyes bejövő csomag, azaz új cím feldolgozása esetén újraszinkronozásra van szükség. A szinkronizálás és adatvisszaállítás után feldolgozásra kerül a címinformáció. Ezalatt az adatot változatlan formában késleltetik. A késleltetés történhet cirkulátorral, vagy akár több száz méter hosszú optikai szállal is. A késleltető szál hosszát a vezetett fény sebessége és a feldolgozási idő határozza meg.

Soros címzés használatakor a címinformációt optikai korrelátorok segítségével dolgozzák fel. Ehhez a hasznos terhelés előtt elhelyezkedő címet szintén le kell választani. Hullámhossz billentyűzéses soros címzés esetén a címleválasztás szűrő, cirkulátor és FBG alkalmazásával valósítható meg. Az optikai korrelátort MSFBG (multi section fiber Bragg grating) felhasználásával készíthet [3]. Ez az optikai eszköz annyi szekciót tartalmaz, ahány bites a hullámhossz billentyűzéses cím. A cím egyezése esetén a MSFBG a címben előforduló minden hullámhosszon reflektál. Az így előálló reflektált fénytjeljesítényt elektromos jellé alakítva egy optikai kapu vezérelhető, és a csomag a megfelelő irányba továbbítható.

7. ábra Core router funkciói a címzés módszere szerint

	Címke visszaállítás	Címke törlés	Hullámhossz konverzió	Címke írás	Gyors hullámhossz hangolás
Soros címke	Optikai elágazás+Börsztős feldolgozás	SOA XGM / IWC XPM WC			Hangolható hullámhosszú gyors lézerező
Optikai segédvívös címke	Optikai szűrő + Börsztős feldolgozás		SOA XGM / IWC XPM WC		
	Optikai elágazás+MMIC+Börsztős feldolgozás	SOA XGM / IWC			

A soros cím feldolgozása elektronikusan, szűrés nélkül, az optikai jel kicsatolásával pusztán időzítési alapon is elvégezhető (4.ábra) [1].

Ezt a hasznos terhelés és a cím közötti időrés (time guard) és sebesség különbség (kb. 10:1) teszi lehetővé. A címfeldolgozás ideje alatt az adatot a segédvívös címzéshez hasonlóan itt is minden esetben késleltetni kell.

Segédvívös címzést alkalmazva az alapsávi címinformációt a routing tábla alapján kezelik le. A változatlanul hagyott adatcsomag hullámhossz konverziója után, az adathoz tartozó újírt címet felkeverik és rámodulálják az új hullámhosszú csomag segédvívjére. Meghatározott számú hullámhosszat egy optikai közegbe demultiplexálhatunk. Ebben az esetben az irányítás kizárólag hullámhossz konverzióval történik, de ez kiegészíthető egy optikai kapcsolómátrix

fokozattal is. Ezáltal nem csak elméleti, hanem fizikai irányításról is beszélhetünk.

Gyakorlati és elvi problémák

A teljesség igénye nélkül szeretnénk kitérni néhány, az optikai csomagkapcsolással kapcsolatos problémára. Core routerek esetén az egyik legnagyobb gyakorlati probléma az ütközések (ugyan abban az időben ugyanazon a csatornán/hullámhosszon kell egy vagy több csomagot továbbítása) kezelése. Mivel nem áll rendelkezésre optikai memória, ahol akár több csomag tetszőleges ideig való tárolása lehetséges, az ütközések problémáját vagy kaszkád késleltető láncokkal, vagy a csomagok eldobásával lehet orvosolni amennyiben nem áll rendelkezésre szabad csatorna (hullámhossz). A késleltető láncokkal csak véges számú egymás utáni ütközések kezelhetők le, és alkalmazásukhoz nagyszámú optikai kapcsolóelem illetve rendkívül gyors vezérlő elektronika szükséges.

A bősztős adattovábbítás miatt minden bejövő adatcsomag esetén el kell végezni az adat és órajel visszaállítást. NRZ alapsávi jelből ez csak szinkronizációs előtagok (preamble), vagy speciális kódolás (8B/10B) segítségével lehetséges [6], és a többszörös túlminta-vételezéshez szintén nagysebességű áramkörökre van szükség. Ez az inkább gyakorlati korlát limitálja a minimális csomagméretet, és közvetve a maximális bitsebességet is.

A fenti problémára megoldást nyújtana az, ha a címfeldolgozás valós időben tisztán optikai úton történne. Ez elméletben lehetséges, ám több gyakorlati korlátja van. Egyrészt a szükséges korrelátorok, csatolók, kapcsolók még nem integrálhatók elfogadható méretűvé, másrészt a hullámhosszak, irányítási útvonalak dinamikus kezelése megfelelően hangolható eszközök és a hatalmas számítási teljesítmény hiányában jelenleg nem megoldható.

Összegzés

Cikkünkben megkíséreltünk átfogó képet adni a csomagkapcsolt optikai hálózatok fejlesztésének, megvalósítási lehetőségeinek jelenlegi állapotáról, lehetséges jövőbeni fejlődési irányairól.

Összességében elmondható, hogy számos probléma vár még megoldásra (például: optikai memória implementálása, ütközés kezelés, forgalom menedzsment, bősztös címfeldolgozás sebességének növelése), de a fejlődés egyértelműen az optikai csomagkapcsolt hálózatok felé mutat. Annak ellenére, hogy az optikai csomagkapcsolás terén egyre több funkciót lát el az optikai réteg, úgy véljük, hogy az optikai eszközök jelenlegi korlátai miatt (méret, bonyolultság, költségek) még nem lehet az optikai/elektromos átalakítást teljesen kiküszöbölni. Bár a cél kétségtelenül ez.

Irodalom

- [1] Daniel J. Blumenthal,
„Photonic packet switching and optical label swapping,”
Optical Networks Magazine,
Nov./Dec. 2001.
- [2] H. Harai, N. Wada, F. Kubota, and W. Chujo,
“Photonic packet forwarding in a multi-wavelength
label switching node,”
IEEE ICC 2001, Workshop on Next Generation
Switching/Routing: The Optical Role,
No. WS2-7, June 2001.
- [3] N. Wada, Hiroaki Harai,
“Photonic packet routing based on multiwavelength
label switching using multi section fiber Bragg gratings”
ITCOM 2002.
- [4] K. Habara et al.,
“Large-capacity photonic packet switch prototype
using wavelength routing techniques,”
IEICE Trans.on Communication,
vol. E83-B, pp.2304–2311, Oct. 2000.
- [5] Tamás Marozsák, Attila Kovács, Ildikó Deme:
“All-optical routing for packet switched networks”
Third Hungarian WDM workshop,
“Intelligence in Optical Networks”,
08. April 2003., Budapest
- [6] Attila Kovács, Ildikó Deme:
“Clock and data recovery from high speed
asynchronous NRZ coded data stream”,
Microcoll 2003 Konferencia, Budapest

Hírek

Magyar részvétel európai kutatási projekteken

A **LABELS** (Lightwave Architectures for the Processing of Broadband Electronic Signals) projektben az optikai tartományi mikrohullámú jelfeldolgozás területén olyan alkalmazások kutatásán dolgozik, melyek kulcsfontosságúak lehetnek a következő generációs mobil távközlésben és az azok egyik pilléréként funkcionáló optikai alaphálózat megvalósításában.

A kutatás két egymással összefüggő területre összpontosít:

Azon alkalmazások, melyeknél az RF rendszer elemek által szolgáltatott vagy fogadott jelek optikai tartományban való feldolgozása történik, természetesen előnyösebb jellemzőkkel bírnak a hagyományos áramkör, tápvonal, koaxiális kábel alapú, túlnyomórészt elektronikus alapokon megvalósított technikákhoz képest.

A rádiófrekvenciás jelek közvetlen optikai feldolgozása és szűrése, valamint az ezeket kísérő optikai segédvívön szállított információ alapsávban történő feldolgozása, felhasználása. A tervezett rendszer segédvívő-multiplexált optikai MPLS hálózat részeként kerül megvalósításra, mely technika jelentős szerepet hivatott betölteni a jövő optikai alapú IP hálózataiban a segédvívön hordozott hálózat-management funkciók beépítésével.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tan­székének Optikai- Mikrohullámú Távközlés Laboratóriuma e második alkalmazáscsoport kutatási és megvalósítási feladataiban vállalt és teljesít jelentős szerepet az utóbbi másfél évben.

Útvonalkijelölés és forgalomelvezetés több tartományú kapcsolt optikai hálózatokban

SZIGETI JÁNOS*, TAPOLCAI JÁNOS***, RÉTVÁRI GÁBOR,
LÁPOSI LEVENTE, CINKLER TIBOR***

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
*** cinkler@tmit.bme.hu

Kulcsszavak: GMPLS, optikai útvonalválasztás, optikai PNNI, kapcsolt optikai hálózatok szimulációja

Cikkünkben ismertetjük azon útvonalválasztási technikákat, melyek esélyesek vagy legalábbis hatást gyakorolnak a jövő többretegű, több tartományú, több szolgáltatást támogató hálózatainak útvonalválasztási technikáira. E többretegű hálózatokban a dinamikus útvonalválasztáshoz szükséges, hogy az optikai eszközök is támogassák a kapcsolási funkciót. Bemutatjuk, hogy milyen szabványosítások születtek, és a jelenleg elterjedt protokollok milyen módosításokat igényelnek. Az áttekintés után ismertetjük saját fejlesztésű szimulációs környezetünket, mely segítségével értékeljük ki javasolt új módszereinket, példaként az információ-terjesztés késleltetésének hívásblokkolásra gyakorolt hatását vizsgáljuk.

1. A GMPLS-ről

1. Áttekintés

Napjainkra nyilvánvalóvá vált, hogy a jelenlegi hálózati infrastruktúra képtelen megbirkózni azokkal a kihívásokkal, melyeket a mind nagyobb volumenű és mind változatosabb minőségi követelményeket támasztó adatátviteli igények jelentenek. A szakértők ennek egyik okát az architektúra túlzott rétegződésében látják, mivel a mai adatátviteli hálózatokban egyszerre van jelen a csomagkapcsolt IP és a virtuális áramkör alapú technika, mint az ATM vagy az MPLS (*MultiProtocol Label Switching*), a gerinchálózatban pedig többnyire az időosztásos SONET/SDH rendszer biztosít hozzáférést a fizikai réteg erőforrásaihoz. Míg az egymásba ágyazott infrastruktúra egységes menedzsmentje így szinte lehetetlenné válik, addig a rendszer összteljesítményét többnyire a leggyengébb láncszem korlátozza feleslegesen.

Az előrejelzések azt mutatják, hogy a felhasználói forgalom domináns része továbbra is IP alapú lesz, azonban a QoS követelmények igen sokrétűvé válhatnak. Pillanatnyilag az IP forgalom számára QoS-t, a szolgáltató számára pedig forgalom-menedzsmentet (Traffic Engineering, [1]) biztosító adatátviteli szolgáltatások bevezetésére az MPLS [2] tűnik a legnépszerűbb választásnak. Így kézenfekvő egy olyan vezérlési sík (control plane) definiálása és szabványosítása, mely

MPLS-alapokon teszi lehetővé a jövő heterogén optikai hálózatainak költséghatékony üzemeltetését és menedzsmentjét. Ez a technológia a GMPLS (*Generalized MPLS*, [3]).

A GMPLS keretrendszer a különböző hálózati rétegeket nyálábolási (multiplexálási) képességük és adatátviteli sebességük szerint többszintű hierarchiába szervezve kezeli, ahol az alsóbb rétegek a felsőbb rétegek forgalmát transzparens módon adatátviteli csatornába (tunnel) nyálábolják. Az egyes csatornákat általánosított címkével azonosítjuk és ezeket a rétegeket az IP alapú útvonalválasztási funkció virtuális összeköttetésként érzékeli. A címke adott hálózati rétegben nyeri csak el konkrét jelentését: lehet IPv6 flow label, MPLS címke, ATM VPI/VCI, időrés azonosító egy időosztásos rendszerben, hullámhossz egy frekvenciaosztásos rendszerben (DWDM) vagy akárgy bizonyos szál egy üveg-szálás térosztásos architektúrában.

A GMPLS keretrendszer elemeit a táblázatban, illetve az 1. ábrán foglaljuk össze.

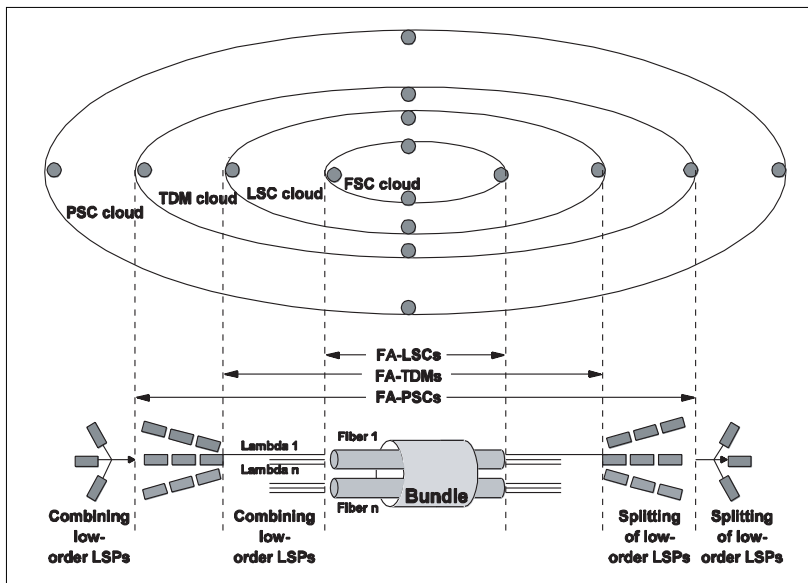
A GMPLS szabványosítása az Internet Engineering Task Force (IETF) Common Control and Measurement Plane (CCAMP) munkacsoportjában történik. A definiált

Kapcsolási tér	Infrastruktúra	Nyalábolás	Címke	Eszköz	GMPLS elnevezés
Csomag, cella	IP, ATM, Frame Relay, Ethernet	Csomag-szint	shim header, ATM VPI/VCI	IP router, ATM switch	Packet-switching capable (PSC)
Idő	PCM, SONET/SDH, stb.	TDM	időrés	digital cross-connect (DCS), add-drop multiplexer (ADM)	TDM capable (TSC)
Hullámhossz, frekvencia	Transzparens	WDM, FDM	Lambda (hullám-hossz)	DWDM ADM/OXC	Lambda-switching capable (LSC)
Fizikai tér	Transzparens	SDM	üveg-szál	OXC	fiber-switching capable (FSC)

* A szerzőt az ETIK (www.etik.hu) támogatta.

** A szerzőt az OTKA a T 42559 számú szerződés keretében támogatta.

*** A szerzőt az MTA János Bolyai Alapítványa, az OM OTKA a 42211számú Posztdoktori Szerződés keretei közt, valamint az ETIK támogatta.



1. ábra GMPLS hierarchia

kiterjesztések két fontos területre különülnek el: az adatátviteli sík (data plane) módosításaira illetve a vezérlési sík módosításaira. Az alábbiakban vázlatosan áttekintjük ezeket a módosításokat.

2. GMPLS: adatátviteli sík

A GMPLS általánosítja az MPLS címke fogalmát. Míg az MPLS-ben egy címke egy bizonyos virtuális áramkört jelöl és lehetővé teszi a virtuális áramkörben haladó IP csomagok gyors kapcsolását, addig – mint azt az előző fejezetben láttuk – a GMPLS-ben egy címke gyakorlatilag bármilyen olyan forgalmi egységet azonosíthat, amelyet adott hálózati réteg egységesen kezel. A GMPLS-ben egy címke-kapcsolt útvonal (LSP, Label-Switched Path) két, azonos rétegbeli eszköz között kifeszített tetszőleges virtuális áramkört jelölhet. Így megvalósítható a rétegek egységes menedzsmentje, mert az útvonalválasztó vagy a hálózatmenedzsment szoftvernek már nem kell az egyes architektúrák sajátosságaiával törődni, hanem elég egy adott virtuális áramkört az általánosított címkével azonosítani. Az MPLS-től eltérően a GMPLS lehetővé teszi a jelzési és az adatátviteli csatornák logikai és/vagy fizikai szétválasztását (out-of-band signaling), mivel például az optikai kapcsolóeszközök nagy többsége nem képes a sávon belüli jelzési információ kinyerésére és kezelésére.

3. GMPLS: jelzési sík

A GMPLS legfontosabb célterülete az ASON környezet. Ahhoz, hogy lehetővé váljék az automatikus LSP kiépítés, menedzsment és lebontás függetlenül a hálózati réteg konkrét megvalósításától, számos tekintetben ki kell terjeszteni a hagyományos MPLS jelzési protokollokat (CR-LDP, RSVP-TE, [4], [5], [6], [7]). Ezek tartalmazzák az alapvető MPLS forgalommenedzsment funkciókat [8], úgy mint explicit forrás-routing (strict/loose), útvonalrögzítés (route-pinning), QoS támogatás, hurokdetektálás, és preemptálhatóság. A GMPLS megvaló-

sítása azonban olyan gyökeres változtatásokat követel, mint a sávon kívüli jelzésrendszer, a kétirányú LSP vagy az általánosított címke bevezetése. A kétirányú LSP-k koncepciója nemcsak felhasználói igényeket elégít ki, de lehetővé teszi olyan alapvetően kétirányú média integrálását is a GMPLS keretrendszerbe, mint a SONET/SDH [9]. Hasonlóan, az optikai rendszerek mind hatékonyabb kezelése érdekében került bevezetésre a javasolt címke (suggested label) és a kiterjesztett hibakezelés (error notification) fogalma.

A hagyományos MPLS jelzési protokollok GMPLS általános kiterjesztését a [10] ismerteti, míg a protokoll-specifikus kiterjesztéseket a [11] és az [12] szabványok specifikálják.

Az IP alapú útvonalválasztó protokollok [13] folyamatos bővítésen mennek keresztül annak érdekében, hogy megfeleljenek napjaink új kihívásainak, például a QoS útvonalválasztásnak, stb. Hasonlóan, a GMPLS útvonalválasztási funkciók is a hagyományos IP routing protokollok kiterjesztéseként valósíthatóak meg [14], [15]. Ezen kiterjesztések központi kérdése a skálázhatóság, hiszen a DWDM bevezetésével az útvonalválasztó protokollnak képesnek kell lenni két kapcsolóeszköz között párhuzamos csatornák akár százait is kezelni. Ezenkívül fontos szempont a sávon kívüli jelzések vagy az egyes rétegek eltérő granularitású címketerének megfelelő használata illetve a védelem és helyreállítás (protection and restoration) biztosítása meghibásodások esetére.

A GMPLS útvonalválasztási kiterjesztéseinek lényege, hogy az LSP-k virtuális összeköttetéseként kerülnek meghirdetésre a hálózatban, pontosan specifikálva azok nyalábolási képességeit és védelmi tulajdonságait (osztott, 1:1, 1+1, stb). Az útvonalválasztó algoritmus ezek után különösebb módosítások nélkül is képes figyelembe venni ezeket az LSP-eket útvonalválasztási döntése meghozatalakor. A sávon kívüli jelzések továbbítására szolgáló jelzési csatornák is megjelennek az útvonalválasztási információk között, azonban speciális attribútumok biztosítják, hogy ezekre adatforgalom ne kerülhessen. Az esetlegesen igen nagyszámú párhuzamos összeköttetés számára nem kell interfészenként egyedi IP címet lefoglalni (ami súlyos skálázhatósági és menedzsment nehézségeket vetne fel), hanem ezek ún. számozatlan (unnumbered) interfészek közötti virtuális összeköttetésekbe vonhatók össze (link bundling). Fontos megjegyezni, hogy míg a GMPLS útvonalválasztási architektúra már szabványosított és kereskedelmi forgalomban kapható [16], addig maga az útvonalválasztási algoritmus, mely védelemmel ellátott hatékony és QoS szempontjából is megfelelő útvonalak kiszámítására is képes, még nem került definiálásra. A GMPLS útvonalválasztási specifikumainak igen jó összefoglalása olvasható a [17]-ben.

A sávon kívüli jelzésrendszer és a nem csomagkapcsolt hálózati rétegek egységes menedzsmentje olyan kulcsfontosságú problémákat vet fel a GMPLS-ben, mint a dedikált jelzéscsatornák menedzsmentje, vagy az általánosított címkék konzisztenciájának biztosítása a szomszédos kapcsolóelemek között. Ezekre a feladatokra a GMPLS egy speciális protokollt, az LMP-t (Link Management Protocol [18]) használja. A kétirányú dedikált jelzéscsatornák igény szerint felépíthetők és lebontathatók, folyamatos fenntartásukról az LMP Hello protokoll gondoskodik (Control Channel Management). A számozatlan interfészek címezését, védelmi tulajdonságait és prioritását (Link Property Correlation) és az összeköttetések működőképességének biztosítását, illetve hiba esetén a hiba helyének azonosítását és a hiba-kezelést is az LMP végzi.

A GMPLS bevezetése számos nehézséget róhat a szolgáltatóra, ezért a költségek leszorítására az IETF CCAMP munkacsoport módszereket dolgozott ki a GMPLS kisebb lépésekben történő bevezetésére [19]. Mivel a GMPLS által orvosolni kívánt problémák egyre sűrűbben jelentkeznek napjaink heterogén adatátviteli hálózataiban, ezért az architektúra mind fokozottabb elterjedésére lehet számítani az elkövetkező években.

2. OSPF-BGP – mint működő megoldás

Az optikai hálózatok útvonalválasztásához egy lehetséges alternatíva az IP (*Internet Protocol*) központú vezérlési modell. Ennek létjogosultsága az IP hálózatok elterjedtségében rejlik, ami az optikai hálózatok felett is gyakran alkalmazott réteg. További előnyt jelentenek az IP megbízható, jól működő útvonalválasztó protokolljai (*routing protocol*). Egy meglévő, működő megoldást mindig könnyebb fejleszteni, kiegészíteni, mint a komplett rendszert valami újra cserélni. Emiatt látjuk célszerűnek részletesen foglalkozni az IP hálózatokkal, a protokolljaival és azok lehetséges továbbfejlesztésével.

A legjobban adaptálható megoldás az OSPF-BGP útvonalválasztó protokoll páros. Két útvonalválasztó protokoll kombinációja azért szükséges, mert különböző feladatokra tervezeték őket. Az OSPF (*Open Shortest Path First*) egy Interior Gateway Protokoll (IGP), amely az autonóm rendszereken (AS – *Autonomous Systems*) belüli kommunikációban játszik szerepet. A BGP (*Border Gateway Protocol*) egy Exterior Gateway Protokoll melynek az AS-ek közötti együttműködésben van szerepe. Az autonóm rendszerek a nagy hálózatokat (skálázhatósági és adminisztrációs) szempontból szétbontják kisebb egységes menedzsmentet (és routingot) működtető hálózatokra.

Az IP csomagkapcsolt hálózatokban az összes OSPF útvonalválasztó (*OSPF router*) minden egyes bejövő csomagra külön-külön mindig elvégzi az útvonalválasztást. Az OSPF egy ún. *szakaszállapot* (link-state) protokoll, melyet az IETF fejlesztett ki. A link-state protokollok működése két részből áll. Először

minden router felderíti a hálózat topológiáját, majd a kapott gráfban minden csúcshoz megkeresi a legrövidebb elérési utat és az úthoz tartozó első szakaszt, amelyen továbbítani fogja a csomagot.

Az elosztott struktúra miatt fontos, hogy az útvonalválasztókban levő topológia megegyező legyen, és így a legrövidebb út kiszámításakor mindenhol ugyanazt az eredményt kapjuk, különben inkonzisztencia alakul ki, ami odáig fajulhat, hogy egy csomag két vagy több csomópont alkotta hurkon körbe-körbe kering, és így a célállomást sosem éri el.

Az útvonalválasztás konvergenciája kritikus a rendszer stabilitása szempontjából. A hálózat topológiáját a szakaszok állapotát leíró rekordok (link-state records) terjesztésével tudatják egymással az állomások. A szakaszok állapotát leíró rekordokat szétküldik a hálózatban, ezt nevezzük flooding mechanizmusnak. A hálózat csomópontjai a kapott rekordokat feljegyzik saját topológiai adatbázisukba, majd továbbadják. Ha olyan rekordot kapnak, amely már szerepel az adatbázisban, de annál régebbi verziójú, akkor eldobják. Ezzel megakadályozzák, hogy egy-egy rekord örökké keringjen a hálózatban.

Amikor egy szakasz meghibásodik, a két végén levő csomópont észleli ezt, és mindketten körbeadnak egy üzenetet, hogy a kérdéses szakasz költsége végtelen. Mivel erről mindenki értesül, a topológiai adatbázisok szinkronban maradnak. Az OSPF link-state működése miatt nagy hálózatokat nem célszerű építeni, hiszen a flooding mechanizmus túlságosan leterheli a hálózatot. A probléma megoldására az egyes OSPF útvonalválasztókat *tartományokba* (*Area*) lehet szervezni. Valamennyi tartomány egy speciális tartományhoz az Area 0-hoz kapcsolódik és az útvonalválasztók topológia adatbázisa egy tartományon belül azonos. Az egyes területek között kitüntetett ún. Area Border Routerek (ABR) gondoskodnak az információk cseréjéről.

Az OSPF hierarchia a szerkezeti kötöttsége miatt nem bővíthető a gyakorlatban. Ezért a hierarchiabővítés következő lépcsőfoka az AS-ek közötti együttműködést megvalósító BGP lesz. A BGP az Internet növekedésével fejlődött ki mostani formájára. Jelenleg a BGP negyedik verzióját használjuk, amely 1995 márciusában készült el [RFC1771].

A BGP elsődleges funkciója a hurkok megszüntetése a hálózatban. Erre egy, az OSPF-ben látottól eltérő megoldást, az út-vektorokat (path vectors) használja. A módszer lényege, hogy minden terjesztett útvonalban a célpontig vezető teljes utat leírjuk. Így a hurokmenteséget minden útvonalválasztó könnyen ellenőrizheti: ha egy kapott útvonalban már szerepel, eldobja a csomagot. Így nincs szükség az egész Internetben egységes költség definiálására, minden router a teljes útvonalat saját szempontjai szerint pontozza. Az eljárás hátulütője a nagy memóriaigény.

Minden út-vektorban szerepel az AS-ek egy listája, és ki van egészítve különböző attribútumokkal. A BGP útvonalválasztók nem csupán a szomszédos AS-ben levő BGP útvonalválasztókkal építenek ki kapcsolatot,

hanem a saját AS-ükben lévővel is. Az előbbieket külső, az utóbbiakat belső partnereknek nevezzük (external peer, internal peer). A belső kapcsolatra a hatékony információterjesztés miatt van szükség, mert ha az útvonalválasztó út-vektorokat kap egy külső partnertől, akkor azokat el kell juttatnia az AS összes többi BGP útvonalválasztójához, hogy azok továbbadhassák.

Természetesen a BGP átadja az elérhetőségi információt az OSPF-nek, hogy az OSPF útvonalválasztók is tudjanak a külső célpontokról, de az út-vektorok átadása a BGP kapcsolaton zajlik. Ezen keresztül egyeznek meg a BGP útvonalválasztók abban is, hogy több lehetséges külső útvonal közül melyiket használja az AS (ezt adják át az OSPF-nek) és hogy mit terjesszenek kifelé. Szigorú harmóniának kell uralkodnia ugyanis abban, hogy milyen útvonalat adnak át az OSPF-nek és milyen hálózatok elérhetőségét terjesztik kifelé, hiszen a kintről érkező csomagokat a belépő útvonalválasztótól az AS-en keresztül az OSPF fogja eljuttatni a kilépő BGP útvonalválasztóhoz.

Az IETF kiterjesztette az OSPF-et optikai hálózatokra [20], a BGP optikai hálózatokon való alkalmazhatóságának kutatása (OBGP [21]) jelenleg háttérbe szorult.

3. PNNI alkalmazása optikai hálózatokban

A PNNI (*Private Network to private Network Interface*) egy „link-state” útvonalválasztó protokoll, amelyet az ATM Forum (<http://www.atmforum.org>) hozott létre és szabványosított az ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) hálózatok összekapcsolási és útvonalválasztási problémáinak megoldására.

Bár az ATM kapcsolatorientált, mégis szükség van egy a datagram jellegű hálózatokban megszokott útvonalválasztásra a kapcsolat felépítésekor, hiszen ilyenkor még nincs semmiféle kiépült útvonal, amit a jelzés követhetne.

Ilyen módon számos hasonlóságot mutat az OSPF-BGP útvonalválasztási protokollokkal, azonban a PNNI minden eddiginél összetettebb. Egyrészt a skálázhatóság követelménye, másrészt pedig a QoS (*Quality of Service – Szolgáltatásminőség*) támogatás miatt. Viszont pontosan ezek a tulajdonságok azok, amelyek egy optikai hálózati útvonalválasztó protokollnál jó kiindulópontot jelentenek.

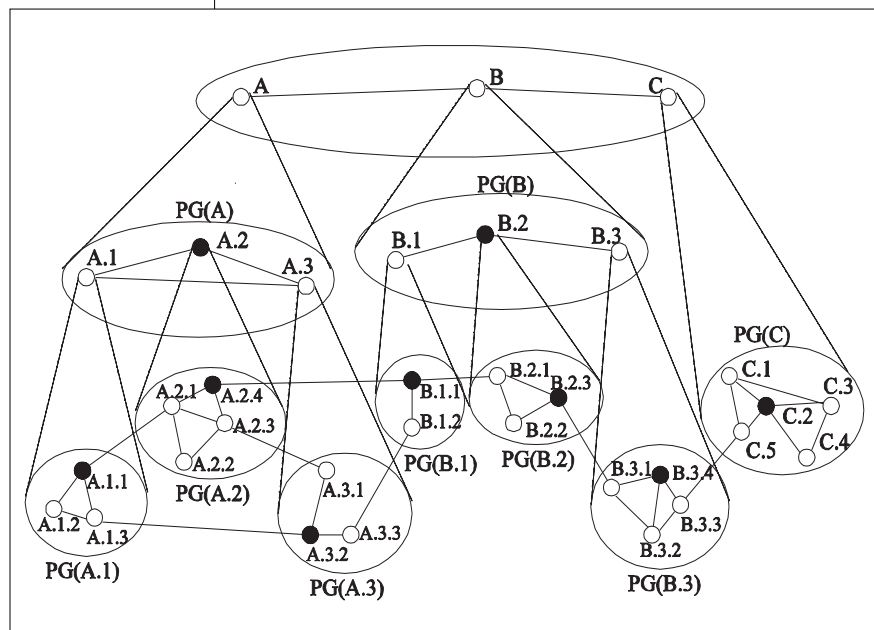
A PNNI protokoll két részből tevődik össze: a PNNI útvonalválasztó protokollból és PNNI jelzési protokollból. Cikkünkben csak a PNNI útvonalválasztó funkciójára térünk ki, amelynek feladata hálózati topológia és elérhetőségi információk terjesztése az ATM kapcsolók között.

Tekintsük át a PNNI jellemzőit!

1. Link State

A PNNI link-state protokoll, azaz minden kapcsoló információkat tárol a hálózat topológiájáról. Ez azonban nemcsak a szakaszok, hanem a kapcsolók adatait is tartalmazza, minthogy ez is befolyásolhatja a rendelkezésre álló erőforrásokat. Az adatok minőségi paramétereit is tartalmaznak, mint a maximális késleltetés, késleltetés-ingadozás, cellavesztés, sávszélesség stb. Ezeket az információkat PTSEs (PNNI Topology State Elements) üzenetek formájában terjesztik a kapcsolók egymás között. Így minden kapcsoló áttekinthető képpel rendelkezik a hálózat képességeiről és éppen aktuális terheltségéről. Ezek a leírások nagyon egyszerűen kiterjeszthetők lennének további (pl.: hullámhossz) információkkal is. Hasonlóan érvényes ez a kapcsolókra vonatkozóan, ahol pedig a hullámhossz konverziós képességeit lehetne hirdetni a hálózatban.

A PNNI a szomszédok, és a szakaszok felderítését a Hello protokoll segítségével végzi. A Hello és PTSE csomagokat periodikus rendszerességgel adják egymásnak a kapcsolók. A PTSE-k terjesztése az OSPF-ben leírtakhoz hasonlóan történik.



2. ábra PNNI hierarchia

2. Hierarchikus topológia

Mint láttuk az OSPF-nél, egy link-state protokoll nem szolgálhat ki korlátlan méretű hálózatot, a topológiai adatbázis mérete miatt. A PNNI viszont a QoS támogatás mellett a nagy hálózatokban igényelt skálázhatósági követelményeknek is meg kíván felelni. Ezt hierarchia szintek bevezetésével oldották meg. A 20 byte-os ATM címek 13 byte-ja csak a hálózatok címzését szolgálja, vagyis 104 szint definiálható ilyen módon.

Egy PNNI hierarchia szint logikai állomásokból áll, amelyek logikai szakaszokkal vannak összekapcsolva. A legalsó szinten a fizikai kapcsolóknak és fizikai szakaszoknak lesznek a logikai kapcsolók és a szakaszok. Ezek úgynevezett PG (Peer Group) csoportokat alkot-

nak Azonos PG-ben lévő kapcsolók topológiai adatbázisa megegyezik, és a csoport topológiájáról minden információt tartalmaz.

A PG-k maguk is PG-kba szerveződnek, ezáltal alakítva ki egy újabb hierarchia szintet. A hierarchia egyel magasabb szintjén a csoportok logikai kapcsolóként jelennek meg. Fizikailag ez olyan módon valósul meg, hogy az egyes csoportok kapcsolói kiválasztanak (prioritás érték szerint megszavaznak) egy kitüntetett kapcsolót, amelyet *PGL-nek (Peer Group Leader)* nevezünk. A PGL feladata, hogy képviselje a csoportot a következő hierarchia szinten, és az összes általa kapott információt megossza a csoport kapcsolóival. Továbbá a PGL feladata, hogy a csoport topológiai adatbázisát összefogja (aggregálja) és ezt továbbítsa a vele egy hierarchia szinten lévő összes kapcsolónak.

Az aggregálást magában foglalja a címek összegzését valamint a topológia aggregációt is. A topológia összegzésekor az egyes csoportok közötti fizikai szakaszokat összevonjunk egyetlen virtuális szakasszá, illetve a csoportot egyetlen komplex csomópontként reprezentáljunk a hierarchia egyel magasabb szintjén. A hierarchia minden egyes szintjén a címek is aggregálásra kerülnek egyre rövidebb prefixekké, hasonlóan az IP címzéshez. Így az aggregáció révén csökkenteni tudjuk a jelzésrendszer forgalmát. A PNNI előnye még, hogy automatikusan konfigurálódik az ATM kapcsolók címzése alapján.

3. QoS és forgalomszabályozás

Az erőforrás igények kezelésének nehézségeit az ATM hálózatok (vagyis a PNNI) azzal oldja fel, hogy az elosztott adatbázisú útvonalválasztók helyett úgynevezett source routing mechanizmust használ. Ilyenkor a hívás a teljes útvonalát a forrás útvonalválasztó határozza meg. Minthogy az útvonalválasztónak a saját topológiai adatbázisa alapján kell megbecsülnie, hogy mely kapcsolókon keresztül épülhet fel a kapcsolat, szükség van egy általános CAC (*Call/Connection Admission Control*) függvényre, amivel a döntést végző kapcsoló modellezheti egy távoli kapcsoló viselkedését. A PNNI erre specifikált egy Generic CAC (GCAC) függvényt, amelynek segítségével a topológia gráfból a QoS igényeknek nem megfelelő útvonalakat kizárhatjuk. A fennmaradó útvonalakból kiválasztva a kapcsoló elkészíti a DLT-t (Designated Transit List), amely leírja, hogy a hívásfelépítésnek mely kapcsolókon kell keresztülhaladnia. Ezen az útvonalon minden kapcsoló az aktuális (Actual) CAC (ACAC) függvényével leellenőrzi, hogy a hívást valóban képes-e vállalni. A hálózat állapota ugyanis időközben megváltozhatott, illetve a PG-ok közötti összesítések miatt sokkal pontosabb adatok állhatnak az érintett kapcsolók rendelkezésre. A forrás útvonalválasztó tehát mindössze egy (a rendelkezésre álló információk alapján) optimális utat próbál „tippelni”. Ha az egyik kapcsoló visszautasítja a hívást, akkor egy jelzésüzenet visszafelé haladva felszabadítja a lefoglalt erőforrásokat egy kapcsolóig, ahonnan más irányban újra megpróbál eljutni a hívott félhez.

Ezt a PNNI specifikáció Cranckback néven említi.

A PNNI egy potenciálisan erős jelölt arra, hogy tartományközi optikai útvonalválasztó protokollok alapja legyen. A PNNI támogatja a QoS útvonalválasztást. Hátánya viszont, hogy rendkívül összetett protokoll és talán ennek következményeképpen az optikai kapcsoló iparban alacsony a részesedése a PNNI alapú optikai útvonalválasztó megoldásoknak. Ennek következményeképpen a már meglévő optikai kapcsolók és a PNNI alapú kapcsolók között az együttműködés problémás lehet.

4. Tanszékünkön fejlesztett hálózati modell bemutatása

A Budapesti Műszaki Egyetem Távközlési és Média-informatikai Tanszékén régóta folynak már kutatások, amelyek azt vizsgálják, hogyan lehet távközlő hálózatok megbízhatóságát növelni, vagyis hogy egy esetleges meghibásodás minél kisebb fennakadást okozzon az átvitelben. Az optikai hálózatok vizsgálata is eme kutatások keretében indult.

Az előző fejezetekben képet vázoltunk arról, hogy a világ a jelenleg elérhető és megvalósítható technológiák segítségével hogyan igyekszik megoldani nagy kiterjedésű optika hálózatokban a forgalomelvezetés feladatát. Az OSPF/BGP elv az IP hálózatok miatt a gyakorlatban széles körű elterjedtségének örvend, viszont nem fektet hangsúlyt az összeköttetések védelmére, különféle védelmi stratégiák kialakíthatóságára. A GMPLS lehetővé teszi ugyan, hogy az útvonal meghatározását teljes hosszában a forrás végezze el saját adatbázisa és számítása alapján, így kiegészíthető védelemmel, viszont ez egyelőre csak tartományon belül megoldott, azaz tartományok határain átvívelő összeköttetések védelme még nyitott probléma. A PNNI nagyon jól kezeli a hálózat skálázhatóságát, de a hálózati csomópontokban tárolt topológiaiinformáció ahhoz túlságosan vázlatos, hogy védelmi módszereket optimálisan alkalmazzunk benne.

Ezeket a megfontolásokat vettük figyelembe hálózati modellünk kialakításakor, melyben ötvözni próbáltuk a meglévő technikák előnyös tulajdonságait.

1. Információ aggregálása és terjesztése

Az útvonalválasztó algoritmusok nem közvetlen a hálózaton, hanem annak absztrakt, logikai képén keresnek egy pontpár között összeköttetést.

Az egyes tartományoknak kétféle logikai képeről beszélünk. Belső képről, amit a tartományon belül minden forrás ugyanolyannak ismer, és ami hűen tükrözi a fizikai sík tulajdonságait, valamint a tartományon kívülre terjesztett, külső képről, ez az, amilyenek a többi résztvevő az adott tartományt látja. Teljes belső hálózati képet tartományon kívülre, vagyis idegen tartománynak terjeszteni nem célszerű. Egyrészt azért, mert igen gyakran a kapcsolódó szomszédos hálózat egy konkurens szolgáltató tulajdona, aki elől üzleti szempontból jobb,

ha minél több információt rejtünk el, másrészt pedig teljes topológiai információ terjesztése hamar skálázhatósági problémához vezet. A külső képet tehát úgy célszerű megalkotni, hogy a belső hálózati képet olyan nyira tömörítjük (aggregáljuk), hogy csak az útvonalválasztáshoz elengedhetetlenül szükséges információk legyenek benne.

Aggregált információ

Lássuk, mik legyenek ezek a szükséges információk! Elsősorban az elérhetőségről kell tudnunk, hogy az egyes távoli tartományokat milyen úton érhetjük el. A PNNI hierarchikus topológiájából is ilyen információt kaphatunk, és részleges megoldást (csak egyféle elérési útvonallal) kínál a BGP-4 is. Ezekkel összhangban az elérhetőséget mi is a két pont közti összekötő éllel (*aggregált éllel*) jelöljük. Mivel a forrásban az útvonalat hullámhossz szinten határozzuk meg, az elérhetőséget is hullámhosszonként kell megadnunk. Tehát egy aggregált él egy hálózati eszköz kimenő hullámhosszáról (esetleges hullámhossz konvertereken keresztül) egy másik eszköz bemeneti hullámhosszának elérhetőségére vonatkozik. Elérhetőségi paraméterként három dolgot adunk meg:

- költség, ami az optimalizáláshoz szükséges, és a kapcsolat kiépítésének anyagi költségét reprezentálja;
- kapacitás, ami a blokkolás elkerüléséhez nyújt gyakorlati segítséget;
- késleltetés, ami szolgáltatásminőség biztosítása esetén kerül előtérbe, ám egyelőre nem foglalkozunk ezzel a paraméterrel.

A tartomány képeit legegyszerűbben gráf-terminológiával élve írhatjuk le. A külső kép tulajdonképpen egy olyan gráf, mely aggregált információkat tartalmaz, így gyakran *aggregált gráfnak* is nevezzük. Ez tartalmazza a tartomány határán levő hálózati csomópontokat az egyes hullámhosszokon külön-külön egy-egy csúcsként jelölve. Ezeket a csúcsokat kötjük össze aggregált élek és az opcionálisan beszűrt kiegészítő, ún. *virtuális csúcsok* segítségével. Az összekötés módja tartományra van bízva, nincs rá általános szabály. Ha a tartomány nem kíván bonyolult számításokat végezni, nem vezet be virtuális csúcsokat, hanem az aggregált gráfban egyszerűen összeköti az egymásból elérhető csomópontokat, s a virtuális élek költségét legrövidebb út algoritmus alapján számítja ki, az így talált legrövidebb út késleltetését állítja be késleltetésnek, a kapacitást pedig *maximális folyam* algoritmussal nyeri.

Világos, hogy ez a megoldás igen hamar skálázhatósági korlátokba ütközik, mert n határmenti csomópont és l hullámhossz esetén $(n*(n-1)/2)*(l^2)$ aggregált él lesz a gráfban. Mivel napjaink hálózataiban n alacsony (1-6) szokott lenni, inkább a szorzat második tényezőjének, a hullámhossztól függő komponens lezorítását kell megcélozni. Ha a tartomány úgy dönt, hogy külső forgalomelvezetési kérések esetén nem engedélyez hullámhossz-konverziót, az aggregált élek maximális száma $1/l$ -ed részére csökken az eredetinek.

Szintén kedvező aggregált gráf alakítható ki abban az esetben, ha a hálózat mindegyik határmenti csomópontja képes hullámhossz-konverzióra. Ilyenkor a csomópontot jelölő l darab csúcs mellé elhelyezünk egy virtuális csúcsot, ezt összekötjük az eredeti l csúccsal (ahol az összekötő él paraméterei: konverziós költség, hullámhossznyi kapacitás, konverziós késleltetés), s a tartomány belsejében az elérhetőséget csak a virtuális csúcsok között vizsgáljuk. Így $(n*l) + (n*(n-1)/2)$ virtuális él fog az aggregált gráf maximálisan tartalmazni.

Kísérleteink azt mutatják, hogy a tartomány külső képének nem kell valós belső állapotokat tükröznie. Folytathat a tartomány óvatos politikát, magáról mérsékelt mennyiségű információt terjesztve, ám ezzel vállalja azt, hogy kevesebb igény fog rajta áthaladni, így az üzleti haszna is kisebb lesz a szolgáltatónak. Akár azt a stratégiát is választhatja a tartomány, hogy nem vesződik külső kép számításával, és egy nagyon egyszerű, statikus képet szolgáltat magáról. A kívülről érkező kéréseket vagy el tudja vezetni, vagy nem, viszont utóbbi esetben számolnia kell azzal, hogy intelligens útvonalválasztó algoritmusok az adott tartományt előbb-utóbb megbízhatatlannak fogják nyilvánítani. Mindazonáltal ez a terület még mélyebb vizsgálatokat igényel.

Információ terjesztése

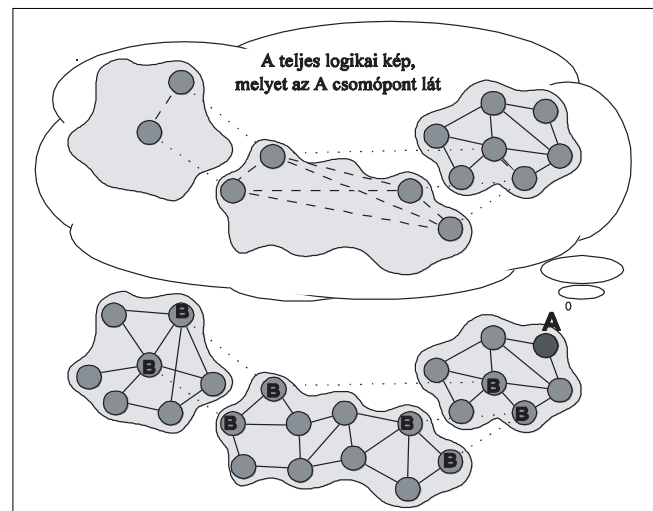
Több tartományból álló hálózatban nem várhatjuk el, hogy egy csomópont minden tőle távol történő eseményről értesüljön, még akkor sem, ha ez alapvetően befolyásolná útvonalkijelölési döntéseit. Minden csomópont a távoli tartományokban lejátszódó események hatásairól kétféleképp értesül:

- amikor forrásként egy másik tartományba irányított kapcsolatának kiépítése blokkolódik;
- amikor távoli tartományról külső képet kap.

Mi az utóbbival foglalkozunk részletesen.

Az aggregált gráfo(ka)t a tartomány valamilyen belső stratégia alapján megalkotja, és a határmenti csomópontok ezt rendszeres időközönként elküldik külső ügyfeleknek. Arra, hogy mekkora legyen a frissítési periódus, az utolsó fejezetben (5) végeztünk vizsgálatokat.

3. ábra Belső és külső logikai képek illesztése



Ha egy határmenti csomópont egy távoli tartományról új külső képet kap, akkor azt terjeszti mindenfelé, kivéve arra, amerről kapta, így a tartománybeli csomópontok ez alapján frissítik a teljes hálózati (belső és több külső) képüket.

A nem határmenti csomópontok pedig tartományon belül gondoskodnak arról, hogy egy külső kép minden csomóponthoz eljusson mihamarabb.

2. Forgalmkötegelés támogatása

A forgalmkötegelés [22] (grooming) lehetősége akkor kerül előtérbe, amikor több, egy hullámhossz kapacitásánál lényegesen kisebb sávzélességű igényt kell elvezetni. Sokat nyerhetünk, ha ezeket a kis igényeket – TDM technikával – egyetlen hullámhosszban tudjuk továbbítani. Viszont az igények kötegelésére nem minden csomópont képes, csak az olyan kapcsolók, amelyek az optikai mellett az elektromos rétegben is dolgoznak.

Tartományon belül természetesen a forrás számára ismert, hogy mely kapcsolók támogatják a forgalmkötegelést, melyek nem, viszont ezt az információt kifelé terjeszteni hiba lenne. Ehelyett megelégszünk azzal, ha grooming szempontjából egy tartományról csak anynyi információt közlünk, hogy mely határcsomópontok között van rá lehetőség.

A kötegelés jellemzője, hogy terhelt hálózat nagyban támogatja, mert ha két forgalmat egy hullámhosszba tud összefogni, akkor nyer egy hullámhossznyi szabad kapacitást. A támogatás abban jelentkezik, hogy a hálózat olcsóbban szállítja a kötegelt forgalmat. Ennek tükrében mi is a költség paraméternél fogtuk meg a groomingot.

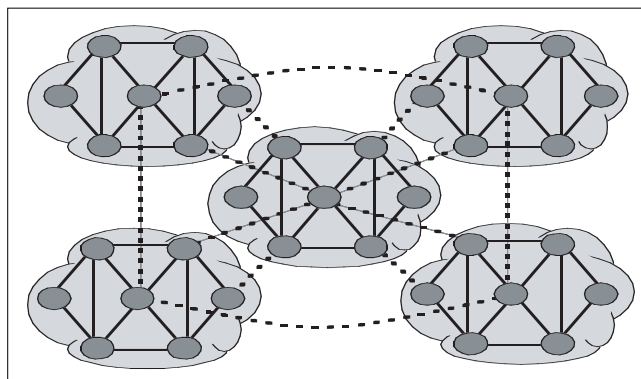
Minden tartomány, mely támogatja a forgalmkötegelést, készít egy hullámhossznál finomabb felbontású (*sub-lambda*) aggregált gráfot kifejezetten az egy hullámhossz kapacitásánál kisebb sávzélességű külső igények számára, melyben az építőelemek (csúcsok, élek) ugyanazok, mint előző alfejezetben bemutatottak, persze a virtuális él kapacitása itt valós és használt érték lesz.

5. Eredmények és értékelésük

Jelenleg, kezdeti fázisban azt vizsgáljuk, hogyan lehet a tartományközi útvonalválasztást és forgalomvezetést megoldani. Tudjuk, hogy a külső képek periodikusan frissülnek, ezért az útvonalválasztást csak állott információ alapján végezhetjük el. De vajon mekkora mértékű állottságot engedhetünk meg, vagyis milyen időközönként frissítsük a külső képet? Erre kerestük első tesztünkben a választ.

A vizsgált hálózat

A vizsgált hálózat 5 tartományból, tartományonként 7 csomópontból áll, és mindegyik csomópont képes az elektromos rétegben is dolgozni. A topológiát a 4. ábra mutatja.



4. ábra A teszhálózat topológiája

Az egyes pontpárok közti forgalom mennyiségével kapcsolatban megkötöttük azt, hogy egy forrásból átlagosan háromszor akkora forgalom fog egy tartományon belüli célhoz tartani, mint tartományon kívülihez. Így, mivel minden forráshoz 6 tartományon belüli és 28 tartományon túli cél tartozik, összességében számottevő (69%) lesz a tartományközi forgalom aránya.

Látható, hogy minden tartománynak 3-5 határmenti csomópontja van, a külső képek konstruálására nem alkalmaztunk intelligens algoritmust, hanem megelégszünk a virtuális csúcsok nélküli, hullámhosszanként a minden csúcsból minden csúcsba közvetlen aggregált éllel való leírással.

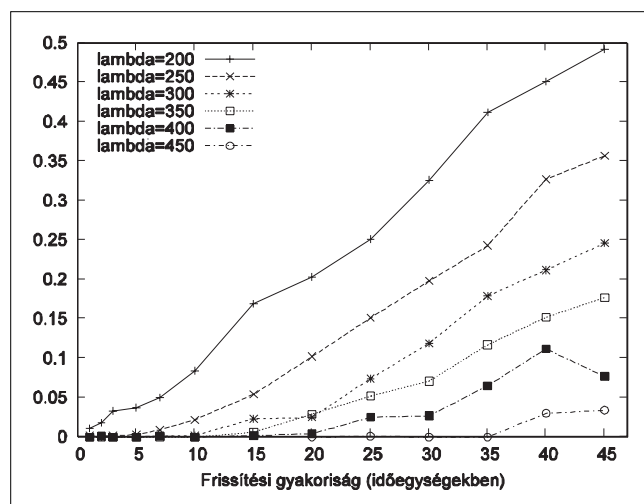
Szimuláció

Megvizsgáltuk, hogy bizonyos hálózati terheltség mellett mekkora információfrissítési késleltetésnél tapasztalhatunk jelentős blokkolási arányt.

Az igények hossza átlagosan 10 időegység. A lambda paraméter segítségével az igények érkezésének gyakoriságát befolyásoljuk. Azt kell látnunk, hogy alacsony forgalom mellett viszonylag hosszabb frissítési periódusokkal is élhetünk anélkül, hogy a rendszerben komolyabb mennyiségű igény kiépítése blokkolódna. Frissítési időköz és blokkolási arány között az összefüggés nagyjából lineáris.

5. ábra

Blokkolási arány az információ állottságának függvényében



Összefoglalás

A közeljövőben várható a többretegű, több tartományból álló hálózatok terjedése, noha az alkalmazandó útvonalválasztási megoldás még nyitott kérdés. Várhatóan, tekintettel az IP fontos szerepére és az IP forgalom mennyiségére részben IP specifikus lesz; a megoldatlan IP-problémák miatt várhatóan az ATM féle PNNI-ből is meríteni fog, azonban az optikai alsó rétegek miatt több optikai jellemzőt is figyelembe kell venni. Cikkünk egyik célja e problémakör bemutatása volt.

Másik célunk a saját fejlesztésű szimulációs rendszer működésének bemutatása volt, melyet az útvonalválasztási technikák fejlesztésére, kiértékelésére használunk. Példaként bemutattuk, hogy hogyan befolyásolja a blokkolási valószínűséget a terjesztett információ gyakorisága különböző hálózat terheltségek mellett. A kívánt gyakoriság beállítása egy kompromisszum az alacsony blokkolás és a túl gyakran árasztott információ szakasz és processzor kapacitásra gyakorolt terhelése között.

Irodalom

- [1] D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, and X. Xiao, "Overview and Principles of Internet Traffic Engineering." IETF RFC 3272, 2002.
- [2] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture." IETF RFC 3031, 2001.
- [3] L. Berger, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling, Functional Description." IETF RFC 3471, 2003.
- [4] R. Braden, L. Z. S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification." IETF RFC 2205, 1997.
- [5] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, and G. Swallow, "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels." IETF RFC 3209, 2001.
- [6] L. Berger, D. Gan, G. Swallow, P. Pan, F. Tommasi, and S. Molendini, "RSVP Refresh Overhead Reduction Extensions." IETF RFC 2961, 2001.
- [7] B. Jamoussi, "Constraint-based LSP Setup using LDP." IETF RFC 3212, 2002.
- [8] D. Awduche, J. Malcolm, J. Agogbua, M. O'Dell, and J. McManus, "Requirements for Traffic Engineering Over MPLS." IETF RFC 2702, 1999.
- [9] G. Bernstein, E. Mannie, and V. Sharma, "Framework for GMPLS-based Control of SDH/SONET Networks." draft-ietf-ccamp-sdhsonet-control-02.txt, 2003.
- [10] A. Banerjee, J. Drake, J. Lang, B. Turner, D. Awduche, L. Berger, K. Kompella, and Y. Rekhter, "Generalized multiprotocol label switching: An overview of signaling enhancements and recovery techniques," IEEE Communications Magazine, vol. 39, pp.144–151, July 2001.
- [11] L. Berger, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling, Resource ReserVation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions." IETF RFC 3473, 2003.
- [12] P. Ashwood-Smith and L. Berger, "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling, Constraint-based Routed Label Distribution Protocol (CR-LDP) Extensions." IETF RFC 3472, 2003.
- [13] J. Moy, "OSPF Version 2." IETF RFC 2178, 1998.
- [14] D. Katz, D. Yeung, and K. Kompella, "Traffic Engineering Extensions to OSPF Version 2" draft-katz-yeung-ospf-traffic-09.txt, 2003.
- [15] S. Jamadagni, "OSPF extensions for flexible CSPF algorithm support" draft-satish-ospf-cspf-support-00.txt, 2003.
- [16] L. Berger and Y. Rekhter, "Generalized MPLS Signaling – Implementation Survey." draft-ietf-ccamp-gmpls-signaling-survey-04.txt, 2003.
- [17] A. Banerjee, J. Drake, J. Lang, B. Turner, K. Kompella, and Y. Rekhter, "Generalized multiprotocol label switching: An overview of routing and management enhancements," IEEE Communications Magazine, vol. 39, pp.144–150, Jan 2001.
- [18] J. Lang, "Link Management Protocol (LMP)." draft-ietf-ccamp-lmp-10.txt, 2003.
- [19] X. Shao, T. H. Cheng, and K. Veerayah, "Requirements for MPLS over GMPLS-based Optical Networks (MPLS over GMPLS)." draft-xushao-ipo-mplsovergmpls-00.txt, 2003.
- [20] R. Coltun, "The OSPF opaque LSA Option" IETF RFC 2370, 1998.
- [21] M. Blanchet, F. Parent, B. St-Arnaud, "Optical BGP (OBGP): Inter-AS lightpath provisioning" draft-parent-obgp-01.txt, 2001.
- [22] T. Cinkler, "Traffic- and λ Grooming" IEEE Network, pp. 16-21, March/April 2003, Vol. 17, No.2.

Automatikusan kapcsolt optikai hálózatok (Automatically Switched Optical Networks, ASON)

LAKATOS ZSOLT

BME Híradástechnikai tanszék
lakatos@hit.bme.hu

Kulcsszavak: optikai transzport-hálózatok, vezérelt optikai rendezők, ASON, hálózati esettanulmányok

A cikk az EURESCOM P1012 FASHION projekt eredményei alapján összefoglalja a kialakulás fázisában lévő automatikusan kapcsolható optikai hálózati technológia alapjait (ITU G.8080/Y.1304 (11/01)). A cikk célja a motivációk, elvárások, szolgáltatói és szolgáltatási igények, valamint a lehetséges megvalósítások bemutatása. Az összefoglaló néhány esettanulmányra alapozottan a követelmények kielégítésére kialakított hálózati architektúrák meghatározó tulajdonságait is illusztrálja.

1. Bevezetés

Az internet felhasználók számának gyors növekedése egyre nagyobb sávszélességet követel a gerinchálózatban. A meglévő gerinchálózati optikai infrastruktúrát legjobban a hullámhossz-multiplexáláson (WDM, Wavelength Division Multiplexing) alapuló technológia használja ki. A már kereskedelemben kapható eszközök szálanként akár 320 [Luc01] hullámhosszt néhány 100 km-es távolságra hullámhosszanként 10 Gb/s sebességgel is képesek megvalósítani.

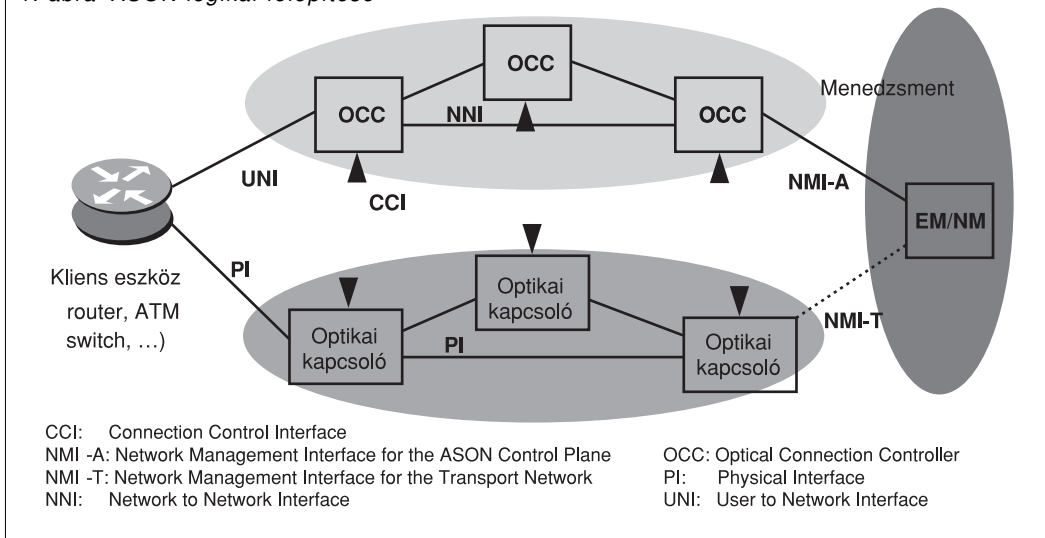
A jelenlegi WDM rendszerekből a globális menedzsmentrendszer hiánya miatt lassú, félrekonfigurálási veszélyeket is magába foglaló szolgáltatásnyújtási folyamat, valamint kizárólag egyszerűbb pont-pont kapcsolatok és az ezekhez tartozó pont-pont szerkezetű védelmi megoldások alakíthatók ki, illetve az optikai átviteli rendszertechnikák fizikai megvalósítása miatt a csomóponti funkciók bizonyos része elektronikus (hullámhossz-konverzió, a 3R /regenerálás, jelújraformálás, újraidőzítés/). A hálózati funkciók részhalmozának elektronikus megvalósítása az optikai réteget kliensspecifikussá teszi, ami jelentősen megnöveli a későbbi hálózatfejlesztés és a változó követelmények kielégítésének költségeit. A követelmények megváltozásának legtriviálisabb formája az adott kliens (például IP) forgalmi szerkezetének (irányultság és mennyiségének) átalakulása, vagy az általa kiszolgált forgalom minőségi elvárásainak megváltozása (például QoS IP forgalom).

2. Célkitűzések, elvárások, követelmények

Az OTN (Optical Transport Network) [Gla01] koncepcióját továbbfejlesztve és az új követelményeket figyelembe véve alakult ki a Kapcsolt Optikai Hálózat (Automatically Switched Optical Networks, ASON). Az ASON alapja a klasszikus OTN, amely az elvárásokhoz igazodva kiegészült számos fejlett menedzsmentfunkcióval, illetve egy önálló vezérlő síkkal, amely jelentősen leegyszerűsíti a hálózat üzemeltetését. A kapcsolt optikai hálózat transzportrétegbeli csomóponti építőeleme az OXC (Optical Cross Connect), és az ezeket vezérlő OCC-k (Optical Connection Controller) (1. ábra).

A kapcsolás alapegysége az optikai csatorna (OCh, Optical Channel), ami tipikusan 1 Gb/s, 2,5 Gb/s vagy 10 Gb/s sávszélességű összeköttetést jelent. Köszönhetően az automatikus konfigurálási és menedzsmentfunkcióknak, a gyorsan felépíthető és lebontható összeköttetések kiválóan alkalmazkodnak a változó forgalmi terheléshez, a módosuló topológiához és az esetleges hálózati meghibásodásokhoz.

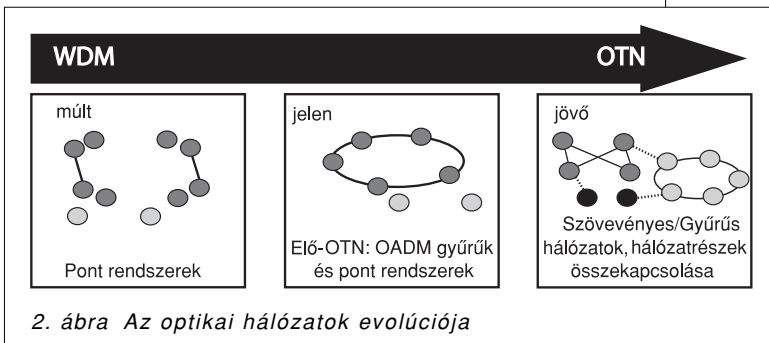
1. ábra ASON logikai felépítése



Az ASON jelzésrendszere lehetővé teszi, hogy a felhasználó az UNI-n keresztül kérje a kapcsolat-felépítést, ezért ez később majd felhasználható arra, hogy a szolgáltatások gyors megvalósítása érdekében a kapcsolatokat közvetlenül a felhasználó vezérelhesse.

3. Migrációs, bevezetési megfontolások

Néhány évvel ezelőtt a szolgáltatók többsége megkezdte a WDM rendszerek bevezetését, amelyek segítségével a fényvezetők kapacitását a többszörösére tudták növelni. A szálak jobb kihasználása kisebb kapacitáségszámra jutó költséget eredményezett. A hálózati csomópontok kialakításában résztvevő gyártási technológiák gyors fejlődése mára már lehetővé teszi, hogy a csomóponti berendezések a hálózat menedzselését elősegítő funkciókat is tartalmazzanak. Ez volt az első lépés az optikai transzporthálózathoz vezető úton (2. ábra).



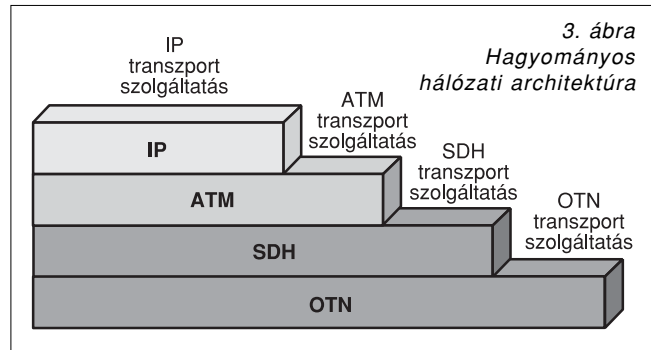
2. ábra Az optikai hálózatok evolúciója

A WDM technológia későbbi szakaszaiban, a termékek integráltsági fokának növekedése következtében a következő hálózati funkciók is fokozatosan elérhetővé váltak:

- teljesítménymonitorozás és riasztás
- optikai csatorna-kezelés és védelem
- hálózatmenedzsment
- hálózati szolgáltatók (önállóan menedzselte hálózatrészek) közötti kommunikáció

Az OTN kialakulásának következő fázisa az elő-OTN állapot. Ebben a fázisban a növekvő kapacitási igény hatására az üzemeltetők célja a meglévő optikai infrastruktúra minél hatékonyabb kihasználása, ezért a pont-pont rendszerekre és a fix eszközökre alapozva összetettebb gyűrűs szerkezetek is kialakításra kerülnek.

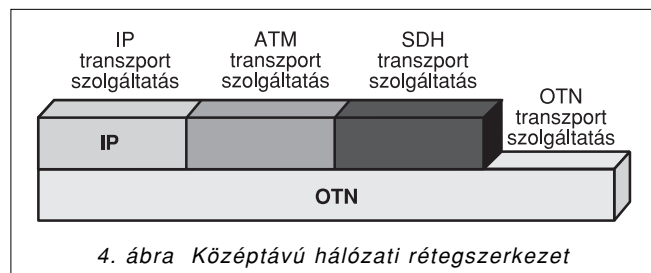
Az egyes hálózati funkciók eltérő rétegbeli implementálása miatt napjaink távközlési hálózatai több rétegből épülnek fel (IP, ATM, SDH, Ethernet, WDM). Tipikusan az OTN réteg szolgáltatja a nagykapacitású pont-pont összeköttetéseket, az Ethernet alacsony költségek mellett biztosít nagysebességű, de az optikai infrastruktúra kihasználása szempontjából nem túl hatékony, egyszerű védelemmel rendelkező átviteli utakat, az SDH hatékonyan képes kiszolgálni a minőségi követelményeket igénylő kapcsolatokat (dedikált sávszélesség, védelem), az ATM biztosítja a rugalmas átkonfigurálást és a minőségi követelmények betartását és a



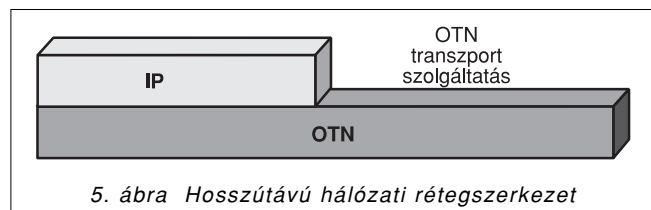
traffic-engineering funkciókat, illetve az IP rétegben találhatóak a nagyszámú felhasználó számára közvetlenül értékesíthető alkalmazások. Az eltérő hálózati szerepek mellett, az egyes rétegek számos funkciót rétegenként redundánsan is tartalmaznak (pl. védelemi funkciók) (3. ábra).

A hálózati szolgáltatók egyszerűsíteni kívánják a rétegszerkezetet, elkerülve a funkciók többszöröződését, csökkentve a hálózati eszközök számát és az ezzel járó költségeket, továbbá egyszerűsíteni kívánják a hálózat üzemeltetését egy közös felügyeleti réteg kialakításával.

Középtávon a rétegszerkezetet „laposabbá” igyekeznek tenni, szakítva a rétegek kliens-szerver viszonyával. Az egyszerűsített rétegszerkezet egy lehetséges megvalósítása lehet, amikor minden réteg közvetlenül az optikai transzportréteghez kapcsolódik. (4. ábra).



Kialakulófélben vannak olyan elképzelések is, hogy elhagyva a többi klienst, az integráló szerepet IP réteg töltené be. Ennek szellemében alakult ki az ALL IP koncepció [ALL_IP1], [ALL_IP2], amely szerint kizárólagosan az IP réteg kapcsolódik az optikai transzport réteghez (5. ábra), ezért minden szolgáltatás ebben a rétegben lenne megvalósítva.



A klasszikus OTN hálózatok fejlődését három jól elkülönülő követelmény motiválta. Az első fejlődési irányt a hálózatmenedzsment területén meglévő hiányossá-

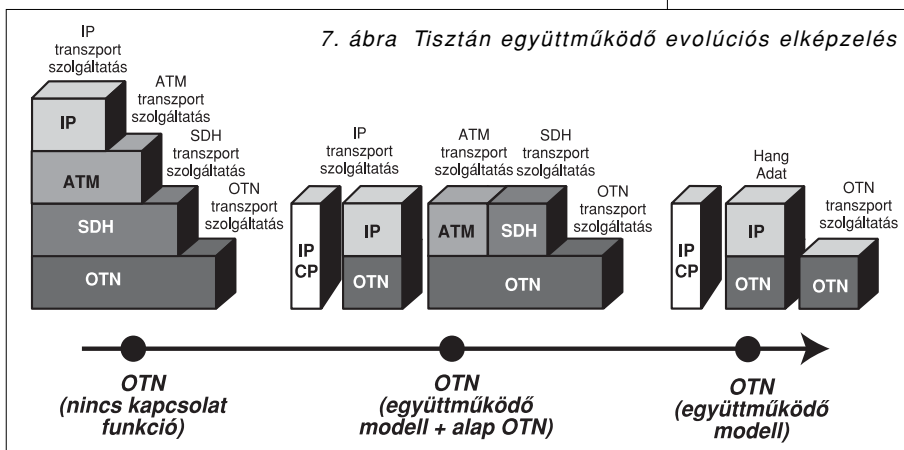
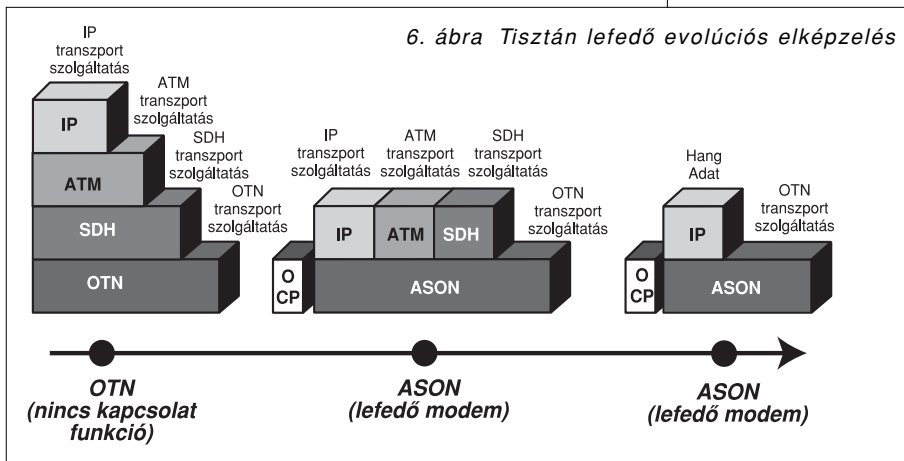
gok pótlása jelenti. A nagyszámú hálózatelemből álló rendszerek működtetése komoly nehézségekbe ütközik a fejlett, illetve automatizált felügyeleti folyamatok hiánya miatt. A második fejlődési irányt a forgalmak növekedésének általános trendje indukálta. Az IP világ közelmúltban végbemenő fejlődéséből származó megnövekedett forgalom jelentősen növelte a transzport-hálózatok terhelését is. Ugyanakkor a növekvő hálózati forgalom a jövedelmezőség csökkenését eredményezte, ezért előtérbe kerültek a gazdaságossági szempontok [Gla01]. Mivel a hálózati költségek jelentős hányadát az üzemeltetési költségek teszik ki, napjaink szolgáltatóinak fontos ezeknek a költségeknek a csökkentése. Az üzemeltetési költségek csökkentésének egy lehetséges módja az üzemeltetést automatikus vezérlési és menedzsment funkciókra felépíteni. A harmadik fejlődést motiváló követelmény az IP réteg egyeduralmává válásának következménye. Az IP elosztott működése az optikai hálózatoktól is megköveteli az elosztott működést, vagyis a korábbi centralizált üzemeltetést (TMN) elosztott módon kell implementálni. Az IP és optikai réteg együttműködésének két jelentősen eltérő alternatívája alakult ki, az első a lefedő (overlay), a második az együttműködő (peer-to-peer) modell.

A lefedő hálózati modell egy kliens-szerver szolgáltatási struktúrán alapul. Az optikai transzportréteg elkülönül a vezérlési és a menedzsment rétegtől, feladata pont-pont összeköttetéseket létrehozni a megfelelő csomópontok között. Ha egy kliens összeköttetést kíván

létrehozni két csomópont között, akkor az összeköttetés létrehozását a transzportréteg szolgáltatásként nyújtja neki. Ilyen esetben a kliensrétegnek semmiféle információra nincs szüksége az optikai réteg szerkezetéről.

A másik lehetséges modell az együttműködő (peer-to-peer) modell, melynél nincs klasszikus értelemben vett rétegszerkezet, hanem a kliensréteg (esetünkben az IP) közvetlenül vezérli az optikai transzportréteget, vagyis a kliensréteg vezérlési információi alapján épülnek fel és bomlanak le a kapcsolatokat. Mivel a kliensréteg vezérli az optikai réteget, számára elengedhetetlen, hogy ismerje annak szerkezetét és állapotát. E megoldás létjogosultsága az IP folyamatosan erősödő dominanciájával párhuzamosan egyre jelentősebb. Az IP és az optikai hálózatok együttműködésének fejlesztése érdekében alakult ki az Újgenerációs Hálózatok Kezdeményezés (Next Generation Networks Initiative) részeként az Újgenerációs Fotonikus Hálózatok (Next Generation Photonics Networks, NGPN) projekt. A projekt lényege, hogy azonosítsa az elkövetkezendő időszakban megépíteni kívánt távközlési hálózatokkal szemben támasztott követelményeket, elemezze és értékelje a lehetséges technológia és architektúrális megvalósításokat. Az NGPN lényeges célkitűzése az IP és az optikai hálózatok közötti protokollverem jelentős egyszerűsítése, amely célkitűzés megvalósításához jól illeszkedik az ASON együttműködő hálózatmodellje [Ngpn01].

A lefedő modellen alapuló evolúciós elgondolás szerint a hálózat hosszútávon is a hagyományos, de „lapos” rétegekből épülne fel (6. ábra).



A megoldás előnye, hogy ha az IP és az ASON rétegnek különböző szolgáltató a tulajdonosa, akkor az IP-t menedzselő szolgáltató képes közvetlenül együttműködni az optikai transzportréteggel. Mivel az ASON réteghez, illetve az optikai csatornákhöz közvetlenül hozzá lehet férni, ez a megközelítés megengedi, hogy a csatornaszintű összeköttetéseket igénylő felhasználók (ISP, ASP, SAN, NAS, másik szolgáltató, OVPN) közvetlenül igénybe vehessék az ASON optikai szintű szolgáltatásait.

A másik evolúciós elképzelés az együttműködő szerkezeten alapul (7. ábra). A tisztán együttműködő evolúciós elképzelést a már középtávon gyorsan növekvő Internet forgalom motiválta. Forgalombecslések szerint a jelzésrendszert nem igénylő forgalom (klasszikus OTN) az összes forgalomnak csak kis hányadát teszi ki, vagyis a forgalom nagy része az IP vezérlést felhasználva kerül a továbbításra.

4. Megoldások

4.1. Architektúra áttekintése

A kapcsolt optikai hálózatok fő alkalmazási területe a nagy megbízhatóságú, nagy sávszélességű pont-pont kapcsolatok kialakítása. Az így kialakított hálózatok topológiája jelentősen függ az adott szolgáltatási terület földrajzi, gazdasági, demográfiai tulajdonságaitól. Az ASON konfigurálási rugalmasságához leginkább a szövevényes hálózati topológia illeszkedik. A hálózat csomópontjai megvalósítási módtól függően lehetnek hullámhossz-konvertálásra képesek, korlátozottan képesek vagy egyáltalán nem képesek. A kereskedelemben kapható eszközök a hullámhossz-konverziót O/E/O (optikai/elektromos/optikai) átalakítás segítségével valósítják meg. Az O/E/O átalakítás során az elektronikus tartományban elengedhetetlen az adatfolyam keretezésének legalább részleges ismerete vagyis az adott megvalósítás kliensfüggő. A kliensfüggőség fejlesztési és üzemeltetési szempontból hosszabb távon hátrányos, de előnye a kisebb megvalósítási költség, valamint a hullámhossz-konverzióból adódó rugalmasság.

A tisztán konverziós csomópontokra épülő megoldás alkalmazása mellett, a két modell előnyeit egyesítő ésszerű kompromisszum lehet a konverziós csomópontokkal határolt transzparens szigetek kialakítása. Az eddigi szimulációs vizsgálatokból arra lehet következtetni, hogy a transzparens szigetek között elhelyezkedő konverziós pontok következtében lehetőség van az útszakaszonkénti rugalmas hullámhossz-választásra, a konverzió nélküli hálózatokban végponttól-végpontig megkövetelt hullámhossz-folytonosság kritériuma enyhül, csökkentve az erőforrás-szükségletét. Amennyiben a hálózatot felépítő csomópontok mindegyike kizárólag optikai tartományban dolgozza fel a jelfolyamokat, akkor tisztán optikai, más néven optikai értelemben transzparens hálózatról beszélhetünk. Annak ellenére, hogy az optikai jelkezelési technológiák felhasználásával már jelenleg is képesek vagyunk ilyen hálózatot kiépíteni, a magas költsége és az üzemeltetési problémái miatt üzleti szempontból jelenleg még nem jelent valós alternatívát [Trans01].

Az ASON architektúrális felépítése hasonló a korábbi optikai hálózatokéhoz, vagyis a hálózat fizikai rétegét /a transzportsík/ optikai átviteli rendszerek és optikai kapcsolók alkotják (transport plane) (lásd 1. ábra). Az átviteli eszközöket a transzportréteg tartalmazza, mely szállítási szolgáltatást nyújt a kliensrétegnek. A vezérlési sík (control plane) irányítja a transzportréteg hálózati elemeit és végzi el a végpontok között szükséges kapcsolatok felépítését. A hálózat menedzselése független a vezérlési síktól és szerepe csupán a hálózati elemek üzemállapotának felügyelete.

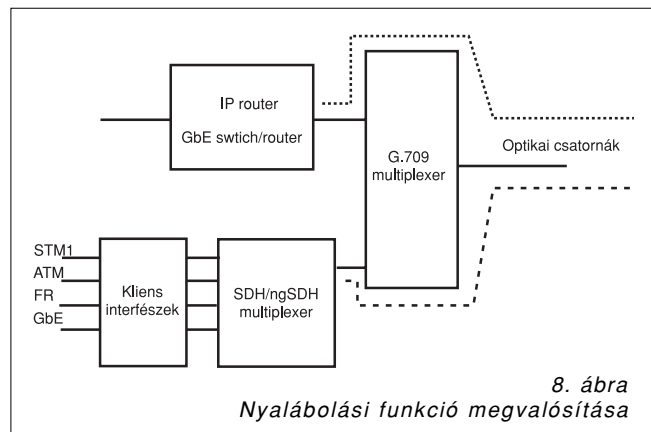
4.2. Nyalábolás

Az automatikusan kapcsolt optikai hálózatok kapcsolási alapegysége az optikai csatorna (OCh). Az optikai szintű kapcsolás megköveteli a kapcsolási egység-nél finomabb felbontású adatfolyamok nyalábolását. A

nyalábolási funkció megvalósítására a következő két lehetséges megoldás merült fel:

Az első esetben maga a nyalábolási funkció az ASON hálózat határoló csomópontjaiban kerül megvalósításra, vagyis a hálózatot felépítő OXC-khez közvetlenül kapcsolódnak a kliensek. Ekkor az eltérő technológiájú kliensek forgalmának azonos optikai csatornába nyalábolásához fel kell használni valamilyen konvergencia-réteg (GFP, ngSDH) nyalábolási funkcióját. A másik nyalábolási megvalósításnál maga az optikai csatorna szinten nyalábolt folyam lép be az ASON hálózat peremén, amit az egész hálózatban együttesen kell kezelni. A megfelelő irányultságok szétválasztása a nyalábolást elvégző csomópont feladata. Mivel az optikai csatorna felbontásban belépő igényeknek a hullámhossza már előre meghatározott, elengedhetetlen az ASON csomópontokban a hullámhossz-kiválasztási funkció megléte.

A két nyalábolási technika közös eleme, hogy maga a nyalábolás az ASON hálózat határán kívül helyezkedik el.



A 8. ábrán az SDH/ngSDH és az OTN-re (G.709) alapozott nyalábolási megvalósítás szerepel. Ebben az esetben az GbE és IP/POS kliensek adatforgalma már önmagában is optikai csatorna szinten aggregált, vagyis közvetlenül illeszthető az ASON hálózathoz. Más kisebb adatsebességű kliensek az SDH multiplexálási funkciójának felhasználásával érik el az optikai csatorna szintű aggregáltsági fokot.

Mind az IP router, mind a GbE (Gigabit Ethernet) switch csatlakozása az optikai réteghez különösen az ISP-k számára előnyös, mert a saját eszközeiket közvetlenül hozzá tudják kapcsolni a hálózati végberendezésekhez. A GbE a nagyvárosi hálózatok (MAN) kialakításában játszik kulcsfontosságú szerepet, ezért megfelelő támogatása alapvető követelmény.

Az ASON alapkonceptió kialakítása óta jelentős fejlődésen ment keresztül az SDH technológia is. Számos korábban nem létező funkció került implementálásra (GFP, Generic Framing Procedure, G.7041), Virtual Concatenation (G.707)- LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme, ITU-T G.7042), amelyek felhasználásával a kliensek szélesebb körében képes hatékonyan betölteni a nyaláboló technológia szerepét.

4.3. Csomópontok szerkezete

A következőkben az ASON hálózatot felépítő csomópontok belső szerkezetét tekintjük át. Három alapvetően eltérő csomóponti szerkezet került definiálásra az ASON szabványosítási folyamata során, mint lehetséges alternatíva:

- ha a csomóponti funkciók elektronikus tartományban vannak, akkor a csomópont nem transzparens a kliens rétegek számára (9. ábra)
- ha a funkciók egy része optikai, egy része elektronikus tartományban van, akkor a csomópont hibrid (10. ábra)
- ha funkciók az optikai tartományban vannak, akkor a csomópont transzparens (átlátszó) (11. ábra)

A transzparens csomópontok a rugalmas OXC helyett lehetnek kevésbé rugalmas OADM-ek (Optical Add Drop Multiplexer).

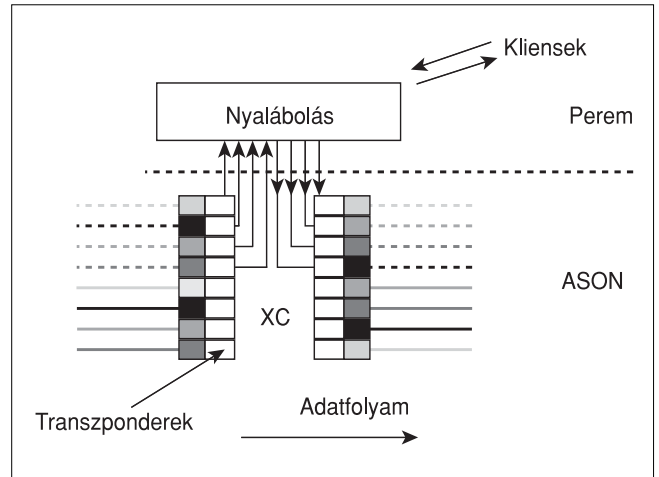
A tisztán elektronikus (nem-transzparens) csomópont be- és kimenetein egyaránt transzponderek találhatóak. A csomópont alkalmas arra, hogy a bemeneti csatlakozó összeköttetések egy részét elektronikus XC (Cross Connect) kapcsolás segítségével tranzitálja, másokat pedig ki- és be tudjon csatolni a hálózathoz. A ki- és becsatlakozás során a kliensek hozzá tudnak férni a megfelelő alacsonyabb rendű adatfolyamokhoz, ami a határoló csomópontoknál természetes követelmény. Ez a nyalábolási megvalósítás jól illeszkedik az SDH/ngSDH multiplexálási/demultiplexálási szerkezetéhez.

A hibrid csomópont egyaránt képes optikai értelemben transzparens módon, és O/E/O átalakítások felhasználásával is kezelni a rajta keresztül megvalósított összeköttetéseket. A csomópontból kiinduló vagy regenerálást igénylő tranzitforgalom a kimeneti portokon lévő transzpondereken keresztül lép ki, míg a regenerálást nem igénylő összeköttetéseket a csomópontban lévő OXC transzparens módon képes tranzitálni. Az optikai csatornák regenerálását vagy hullámhossz-konverzióját a bemeneti és kimeneti transzponderek végzik. A kimenőportok hangolható lézeres megvalósítása nagyfokú rugalmasságot biztosíthat a csomópontnak.

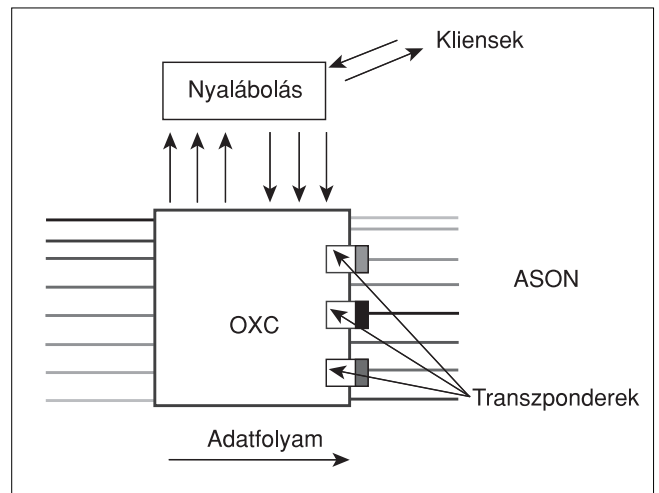
Az OADM (Optical Add Drop Multiplexer) csomópont képes az optikai tartományban a bemeneteinek egy részét kicsatolni, még másokat kapcsolni. A korai nem konfigurálható fix OADM-ektől eltérően, napjainkban már kaphatóak flexibilis, sőt már vezérelhető OADM-ek is. Ezekre az olcsó eszközökre alapozva a hálózatüzemeltetők képesek kellő rugalmasságú, akár XC funkcionális csomópontokat is kialakítani

A változó hálózati szerkezet erőforrásainak kihasználásához az útvonalválasztó algoritmusoknak ismerniük kell a hálózat aktuális állapotát. Az útvonalválasztások során alapvetően kétfajta információ szükséges, a csomópontok közötti linkek és a csomóponti erőforrások állapota. Az ASON vezérlési sík birtokolja a hálózat mind fizikai, mind logikai szerkezetét. Fizikai szerkezet alatt a csomópontok címét, a portok számát, sáv szélességet, Link ID-t, hullámhossz ID-t, kapcsoló és hullámhossz-konverziós képességet értjük. A logikai szerkezet

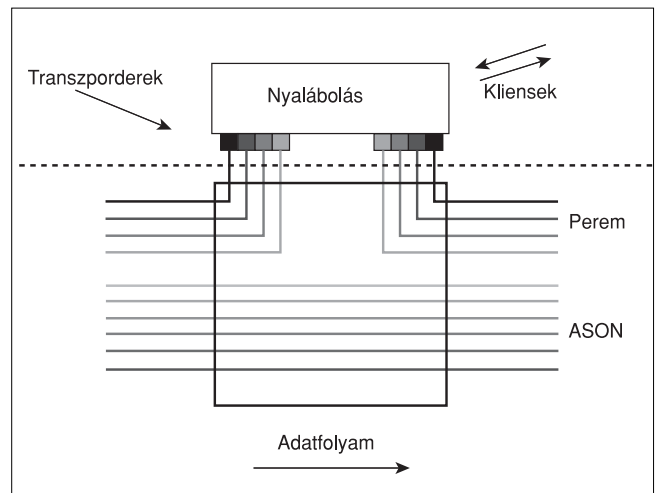
a végpont-végpont összeköttetéseket leíró információk (üzemi utak, védelmi utak), optikai virtuális magánhálózatok, valamint a forgalmi leírók (rendelkezésre álló sáv szélesség, QoS) összességét értjük. A topológia változásait felismerő mechanizmusokat a vezérlési réteg tartalmazza, felhasználva az OCC (Optical Connection Controller)-k funkcióit.



9. ábra Átlátszatlan csomópont szerkezete



10. ábra Hibrid csomópont szerkezete



11. ábra Transzparens csomópont szerkezete

4.4. Transzportrétegbeli szolgáltatások

Most az ASON hálózat transzportrétege által nyújtott szolgáltatásokat tekintjük át. Az ASON technológia öt transzportrétegbeli szolgáltatást képes nyújtani:

A *permanens optikai csatorna (Permanent OCh)* szolgáltatás során az összeköttetést a hálózat két végpontja között garantálja a hálózat. Ennek legfontosabb tulajdonsága, hogy időben stabil, vagyis a szolgáltató és a felhasználó közötti szerződés szerint hosszútávra jön létre (pl. hónapokra). A kapcsolat felépítését, illetve az ehhez szükséges információk kezelését a hálózati operátor végzi el, ami történhet manuálisan vagy a menedzsmentrétegen keresztül. Ez a szolgálati osztály felel meg a permanens vagy béreltvonali összeköttetésnek. A szolgáltatás által megcélzott felhasználók lehetnek más hálózati operátorok vagy nagykapacitású béreltvonali összeköttetést igénylő szolgáltatók (ISP, ASP, SAN, NAS, mobil szolgáltatók, helyi telefontársaságok).

A *szoft-permanens optikai csatorna (Soft-permanent OCh) szolgáltatás* a permanens optikai csatorna szolgáltatástól csak a kapcsolat felépítésének módjában különbözik. Míg a permanens optikai csatornát a felhasználóval kötött szerződés alapján a szolgáltató részben vagy egészében manuális konfigurálás útján építi fel, addig a szoft-permanens kapcsolatot a szolgáltató a hálózat automatikus konfigurációs képességeire alapozottan a menedzsmentrendszeren keresztül, a vezérlési sík funkcióit felhasználva alakítja ki. A szoft-permanens optikai csatorna megvalósításához ennek érdekében megfelelő hálózat és csomópont közti interfész (Network-Node Interface – NNI) szükséges.

A *Automatikusan kapcsolt optikai csatorna szolgáltatás (Automatically switched OCh)* a hálózat két végpontja között jöhet létre. A kapcsolat felépítése és lebontása igény szerinti. A kapcsolat felépítését a felhasználó kezdeményezi a felhasználó és a hálózat közti interfészén (UNI) keresztül folyó jelzést váltás keretében, a hálózat és a felhasználó által kötött szolgáltatási szerződés alapján. Mivel az erőforrás-lefoglalás konkurens módon történik, a felhasználók versenyeznek a szabad erőforrásokért. Ha nincs elég szabad erőforrás egy adott kapcsolat felépítéséhez, akkor a kapcsolat blokkolódik, és a felhasználó kérése kiszolgáltatlan marad. A felhasználó szempontjából fontos paraméter a blokkolt kérések aránya, a már felépült kapcsolatok útszintű fizikai paraméterei és a kapcsolatokat meghibásodás ellen védő védelmi mechanizmusok.

Az *optikai virtuális magánhálózati szolgáltatás (Optical Virtual Private Network – OVPN)* keretében a felhasználói csomópontok között egy külön logikai hálózat jön létre, amely a szabad erőforrásoknak a szoft-permanens optikai csatorna szolgáltatás mechanizmusaira alapozott alkalmas összekapcsolásával valósítható meg. A szolgáltatás azokat a nagyobb felhasználókat célozza meg, akik nem rendelkeznek kellő infrastruktúrával, ugyanakkor saját maguk szeretnék menedzselni a hálózatukat. Mivel a virtuális magánhálózatok erőforrásaival kizárólag a felhasználó rendelkezik, biztonsági szempontból kedvező ez a szolgáltatás. A meghibásodás

elleni védelem szempontjából, a kialakított OVPN védelme lehet a felhasználó önálló feladata, vagy a szolgáltatójával együttműködve közösen alakíthat ki védett összeköttetéseket.

Az *optikaicsatorna-nyaláb (Lambda Trunking)* szolgáltatás azonos minőségi paraméterű optikai csatornák egy egységbe foglalása. Az azonos minőségi paramétereket igénylő szolgáltatás érdekében a csatornákat azonos útvonalon, lehetőleg azonos optikai szálban jelölik ki. Mivel az egy egységbe foglalt optikai csatornákat együtt kezelik, meghibásodás esetén azonos védelmi útvonalakat igényelnek. A szolgáltatás alkalmas lehet olyan felhasználók kiszolgálására, akik nagykapacitású és azonos minőségű összeköttetéseket igényelnek (például mobilszolgáltatók).

4.5. Hálózatvédelmi vonatkozások

A hálózati infrastruktúra meghibásodásakor a védelem első lépése a bekövetkezett hiba felismerése. Hálózati hiba lehet egy link kiesése, egy csomópont részleges vagy teljes meghibásodása, kiesése. A transzport hálózatokban három alapvető védelmi stratégia létezik: a hozzárendelt (dedikált) és megosztott védelem, valamint a helyreállítás. Hozzárendelt védelem esetén előre lefoglalt erőforrások tartoznak a tartalék elvezetésekhez, ezért egy hiba bekövetkezésekor a küldő és a vevő csomópont automatikusan átkapcsol erre a védelmi tartaléokra. Megosztott védelem esetén a hálózat védelemre lefoglalt erőforrásait, több előre meghatározott kapcsolathoz rendeljük hozzá. Csak azok az üzemi elvezetések osztozhatnak azonos védelmi erőforrásokon, amelyek nem lehetnek egyszerre érintettek egy hálózati elem meghibásodásakor. A harmadik lehetséges stratégia a helyreállítás. A helyreállítás alapvetően abban tér el a védelemtől, hogy a hálózat szabad kapacitásai nincsenek előre lefoglalva a védelmi célokra, hanem minden hibaeseménykor megkezdődik egy hibafüggő, dinamikus átkonfigurálása a hálózatnak. Az ASON vezérlési funkciói lehetővé teszik a gyors helyreállítás megvalósítását. Egy meghibásodás esetén a vezérlési réteg felhasználva az MPLS/GMPLS jelzési protokollokat, képes gyorsan meghatározni és felépíteni az új összeköttetéseket. A jelenlegi elképzelések szerint az alábbi helyreállítási mechanizmusok kerülnek megvalósításra:

- 1+1 dedikált útvédelem (minden üzemi elvezetéshez tartozik egy dedikált védelmi elvezetés),
- 1:n osztott útvédelem (n üzemi elvezetéshez tartozik egy védelmi elvezetés, az üzemi elvezetéseknek diszjunktaknak kell lenniük),
- n:m osztott útvédelem (m üzemi elvezetéshez n védelmi elvezetés tartozik),
- gyors helyreállítás előre megtervezett utakkal (Szoft-permanens OCh mechanizmus),
- helyreállítás hívás-újrafelépítéssel (meghibásodás esetén a kapcsolat lebomlik és újra felépül, Automatikusan kapcsolt OCh mechanizmus),
- pre-emptive védelem: nemvédett összeköttetés, az erőforrásait egy magasabb prioritású összeköttetés felhasználhatja meghibásodása esetén.

5. Funkciók, megvalósíthatóság (üzleti modellek)

A csomóponti funkciókat kétféle szempontból lehet csoportosítani. A hálózat logikai helye alapján tranzitálási- és végződtetési funkciókról, a funkcionális rétegszerkezet alapján transzport-, vezérlési és menedzselési funkciókról beszélhetünk.

A tranzitfunkciók a hálózat belsejében lévő optikai csatornák kezelésében játszanak szerepet. A végződtető csomópontok feladata kezelni a kívülről jövő kliensrétegek adatfolyamait, illetve a hálózat belső része felől jövő, itt kezdődő vagy végződő optikai csatornákat, illetve feladata az SLA-et (Service-Level Agreement, BER (Bit Error Rate), rendelkezésreállítás stb.) betartani és betartatni. Az ASON egyaránt támogatja az IP, GbE, ATM, FR, SDH/ngSDH klienseket. A kliensek kezeléséhez szükséges funkciókat az alábbi három kategóriába lehet sorolni:

Az *adaptációs funkciók* előkészítik a kliens adatfolyamokat a hálózat gerincrétegebe való továbbításához, aminek szükséges feltétele a QoS, CoS követelmények ellenőrzése. A hálózati erőforrások jobb kihasználtsága érdekében az azonos minőséget igénylő összeköttetések közös egységet alkotnak. Fontos kiemelni, hogy az adaptációs funkciók nem részei az ASON technológiának, de szorosan kapcsolódnak hozzá.

A *gerinchálózattal összefüggő funkciók* a végpont-végpont kapcsolatok felépítéséhez kapcsolódnak, mely során a felépítést a küldő perem csomópont kezdeményezi. Ezek a hálózati funkciók tartalmazzák a gerinchálózati részek közötti kommunikációhoz szükséges protollokat is.

A *fizikai interfésszel összefüggő funkciók* a hálózat-hoz kapcsolódó különböző kliensekhez szükséges interfészek kezelését végzi el, beleértve a keretezést, nyalábolást is.

Az ASON architektúra három funkcionálisan jól elkülönülő síkra bontható, a transzport-, vezérlési-, illetve a menedzsmentsíkra. A *transzportsík* biztosítja az egy- vagy kétirányú adatfolyamok számára az átviteli utakat és detektálja az összeköttetések állapotát leíró információkat (hiba, jelminőség stb.) A *vezérlési sík* feladata a felhasználó vagy a hálózatmenedzsment-rendszer által kezdeményezett kapcsolatok felépítésének és lebontásának támogatása. A vezérlési sík feladata lehet még, a meghibásodott összeköttetések újrafelépítésének elősegítése a linkállapot információk (szomszédosság, rendelkezésre álló kapacitás, hiba) terjesztésével. A *menedzsmentsík* felelős a hiba, teljesítmény, konfiguráció, számlázási, és biztonsággal kapcsolatos menedzselési funkciókért, illetve ezeknek a funkcióknak a rendelkezésre bocsátása a vezérlési és transzportsík számára [Manz01].

A menedzsmentfunkciók megvalósítása lehet központosított vagy elosztott. A központosított megvalósítás előnye, hogy a hálózat aktuális állapotát leíró adatbázis (MIB- Management Information Database) egy-

etlen helyen van megvalósítva, elkerülve a szinkronizációból adódó problémákat, illetve a további funkciók fejlesztése egyetlen helyen kell, hogy megtörténjen. Hátránya a nagy komplexitás, a változások bejegyzésének nagy késleltetése, és az ebből következő nem valósidejű működés, illetve a meghibásodásokkal szembeni érzékenysége. Mivel az ASON célkitűzése szerint az elosztott működésű IP-re optimalizált, a centralizált menedzsment csak átmeneti megoldásként képzelhető el, az elosztott menedzsment bevezetéséig.

Az elosztott menedzsment lehetővé teszi a végpontokban elérhető menedzsment funkciók elosztott megvalósítását (beleértve a védelmi menedzsmentet is). Támogatja az együttműködést a kliensek menedzsment rendszereivel (UNI interfészen keresztül). Hátránya az adatbázis bonyolult karbantartása és az átviteli hibákkal szembeni érzékenysége (sebezhetősége).

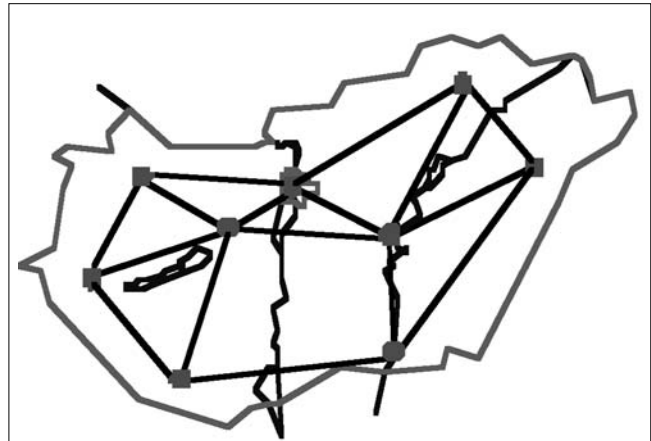
Mivel egy szolgáltatási területen egyszerre több szolgáltató hálózati infrastruktúrája található meg, elkerülhetetlenné válik ezek együttműködése. Feltételezve, hogy az infrastruktúra különböző mértékben van egy szolgáltató birtokában, négyféle üzleti modell képzelhető el. Az első esetben a teljes transzportréteg egy szolgáltató tulajdona, és ezen nyújt szolgáltatásokat, ekkor a szolgáltatások kialakítása a transzportréteggel teljes összhangban történhet meg. Ez lehetővé teszi, hogy a szolgáltató saját infrastruktúrája felett többféle felhasználói hálózatot is megvalósíthatson. A második esetben a transzportréteg csak egy részét birtokolja a szolgáltató vagy együttműködik más szolgáltató transzportrétegeivel. Az együttműködő szolgáltatók egymástól bérlik a hálózati infrastruktúrát, ami a szolgáltatási rétegek kialakításakor közös megegyezést igényel. A transzportréteg több részből áll, és ezek együttműködése szükséges a hatékony erőforrás-kihasználáshoz. A harmadik esetben a szolgáltató egy hálózati rész teljes infrastruktúráját birtokolja és az ezen nyújtott szolgáltatásokat adja el viszonteladóknak. Ekkor a szolgáltató semmilyen információval nem rendelkezik a hálózatán kiszolgált ügyfelek forgalmának tulajdonságairól, ezért bizalmi kapcsolatnak kell fennállnia a szolgáltató és a viszonteladó között. A negyedik esetben a szolgáltató az általa birtokolt hálózaton nyújt szolgáltatást másikkal szolgáltatóknak. A vevő szolgáltató szemszögéből a hálózati infrastruktúra egy kapcsolt transzportrétegnek felel meg, ekkor minden szolgáltató saját maga vezérli az igénybevett transzportréteget, ezért ez a vezérlési funkciók többszörözéséhez vezet.

6. Illusztratív esettanulmányok

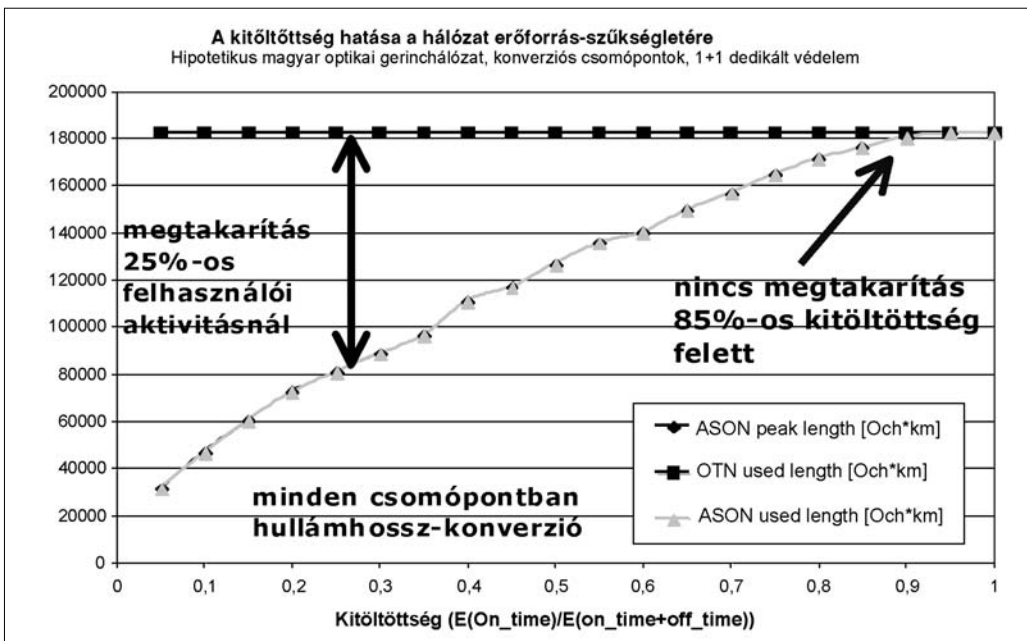
Az esettanulmányok tárgyalása előtt meg kell említeni, hogy a távközlés közelmúlt változásai miatt valamelyest megváltozott az ASON technológia szerepköre. A korábbi nagy dinamikájú automatikusan kapcsolt összeköttetésekre épülő hálózat létjogosultsága jelentősen csökkent az ilyen összeköttetéseket igénylő szolgáltatások hiánya miatt.

Ettől eltérően a távközlési szolgáltatók között zajló éles verseny miatt sokkal nagyobb jelentőséget kapott az ASON által nyújtott rugalmas és automatikus át-konfigurálás, amely segítségével csökkenthetőek a kiadások jelentős hányadát kitevő üzemeltetési költségek. Az intelligens optikai hálózat (ION) koncepciójében más vizsgálati módszereket igényel, mint a nagy dinamikájú ASON eset. Ebben az esetben a vizsgálatok középpontjában az úgynevezett "szolgáltatásnyújtás" (provisioning), vagyis az eltérő felhasználói igények minél hatékonyabb kiszolgálása áll. A felhasználói igények eltérősége jelenthet eltérő szolgáltatásminőséget, megbízhatóságot, alkalmazott védelmi stratégiát.

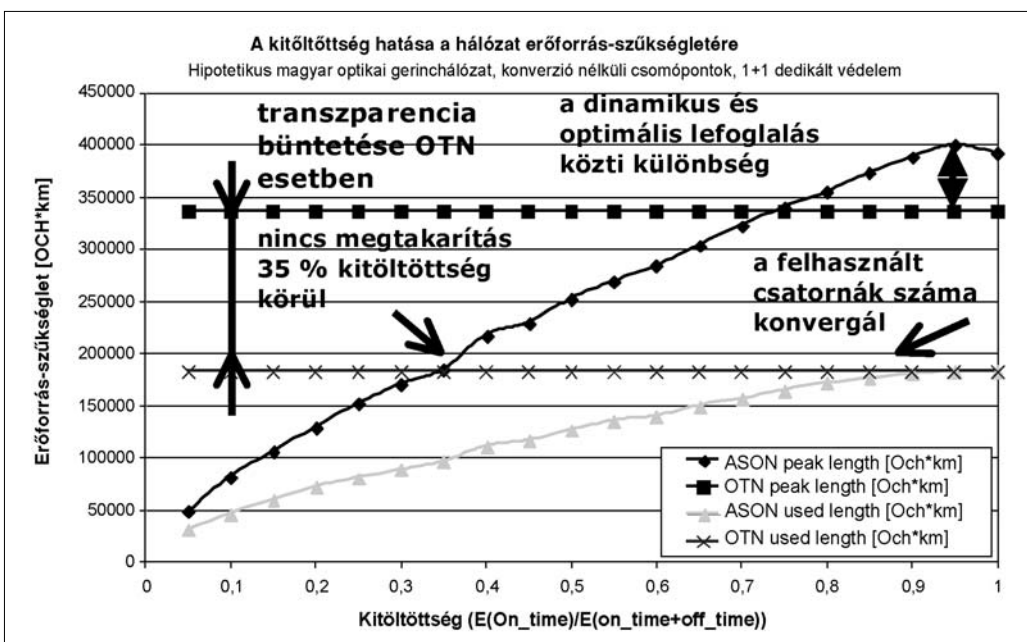
Az első esettanulmány a fejlett ASON automatikus kapcsolási képességgel és nagy dinamikájú összeköttetéseket feltételező hálózatra alapozott vizsgálatait mutatja be.



12. ábra
Hipotetikus magyar optikai gerinchálózat (9 csomópont, 16 él)



13. ábra
OTN és ASON erőforrás-szükségletének összehasonlítása védett, hullámhossz-konverziót tartalmazó hálózat esetén



14. ábra
OTN és ASON erőforrás-szükségletének összehasonlítása védett, hullámhossz-konverziót nem tartalmazó hálózat esetén

A vizsgálat során a kapcsolt optikai hálózatok szimulációs eredményeinek elemzése a szemi-permanens (OTN) megvalósítások összehasonlításával történik. Az összehasonlítás alapját hálózati megvalósítások erőforrás-szükségletének meghatározása képi.

Az illusztratív példák alapjául egy hipotetikus magyar optikai gerinchálózat (9 csomópont, 16 él, átlagos fokszám 3.5, igénymátrix összege 364 optikai csatorna) többféle megvalósítása szolgál (12. ábra).

A permanens összeköttetések függetlenül a forgalom meglététől, állandóan élnek. Ezzel szemben a kapcsolt hálózatban az igényforrás és nyelő között, csak a tényleges kommunikáció idejére épül fel a szükséges számú optikai csatorna.

A 13. és 14. ábrákon megfigyelhető, hogy kis kitöltöttség esetén az osztott erőforrás-kezelésből származó statisztikus nyereség miatt, minden esetben kisebb a kapcsolt megvalósítás erőforrás-szükséglete, mint a szemi-permanensé. A kitöltöttség növelésével a hullámhossz-konverziót tartalmazó hálózatban, a kapcsolt optikai hálózat erőforrásigénye az OTN-éhez konvergál, ugyanis egyhez közeli kitöltöttség mellett nem realizálható megtakarítás a dinamikus kapcsolat felépítésből. A hullámhossz-konverziót nem tartalmazó hálózatokban, a konverzió hiányából adódó többletköltség a kapcsolt megvalósításnál már 50%-os kitöltöttség esetén meghaladja az OTN erőforrás-szükségletét.

A megvalósításokat megvizsgálva nyilvánvalóvá vált, hogy a hullámhossz-konverziós képesség megléte vagy hiánya jelentősen befolyásolja a kapcsolásból adódó előnyök mértékét. A kereskedelemben kapható berendezések moduláris szerkezetéből következő hatás (több azonos hullámhossz egy átviteli rendszerben) a hullámhossz-konverzióhoz hasonló költségmegtakarítást eredményez. A szakirodalomban számos cikk foglalkozik ennek a hatásnak a vizsgálatával (pl. [Ling01]). Jelen cikk szerzői arra a következtetésre jutottak, hogy már kevés számú modul felhasználásával megközelíthető a hullámhossz-konverziót is alkalmazó hálózat teljesítménye.

A második esettanulmány az ASON technológia korai fázisának, az ION koncepció szolgáltatásnyújtási kérdéseit tárgyalja.

Az ASON hálózatok fejlett menedzsmentfunkcióira alapozva lehetségessé válik összetett védelmi stratégiák implementálása is. A második példában a kapcsolt hálózatokban kialakítható védelmi stratégiákat hasonlítjuk össze, vizsgálva azok hatékonyságát és erőforrás-szükségletét. A védelmi stratégiák teljesítményanalízise során kizárólag egyszeres szakaszhibákat tételezünk fel.

Az első megvizsgált védelmi stratégia a többleterőforrást fel nem használó, a kapcsolatok újrafelépítésén alapuló helyreállítás. A meghibásodás által érintett hívások lebomlanak és újra kezdeményezik a kiszolgálásukat. A megszakadt hívások újra-felépítése átmeneti túlterhelést okozhat a hálózatban, megnövelve a meghibásodott és kívülről jövő hívások blokkolási valószínűségét. Ez a helyreállítás nem igényel többleterőforrást, viszont nem garantálja a megszakadt optikai szintű összeköttetések újrafelépítését. Az optikaicsatornákérések közötti prioritás kezelésével a megszakadt hívások felépítése elősegíthető a kívülről jövő hívások hátrányára.

A második megvizsgált védelmi megoldás működési mechanizmusa megegyezik az újrakapcsoláson alapuló helyreállítással, azzal a különbséggel, hogy itt a hálózatban rendelkezésre állnak a védelemhez felhasználható többleterőforrások. A többleterőforrások felhasználásával kiküszöbölhető a meghibásodott optikaicsatornákérések újrafelépítésekor bekövetkező forgalmi túlterhelés.

A meghibásodásokra különösen érzékeny összeköttetések védelmére 1+1 dedikált útvédelmet célszerű kialakítani. A dedikált útvédelemmel ellátott összeköttetés felépítésekor két szakasz- és csomópont-független elvezetés kerül kialakításra és mind a két elvezetésen továbbítódik az átvinni kívánt információ. Meghibásodás esetén a nyelő csomópont egyszerű teljesítménymonitorozással képes észlelni a minőségi paraméterek leromlását és átváltani a meghibásodás által nem érintett kapcsolatra. A dedikált útvédelemnek előnye a gyorsasága és az egyszerű – lokális döntésen és beavatkozáson alapuló – működése, hátránya a helyreállítás-hoz viszonyított nagyobb erőforrásigénye. A kapcsolt optikai hálózatokban a dedikált útvédelem megvalósítható többleterőforrás felhasználása nélkül (kizárólag a két független út létrehozásához szükséges erőforrásokat felhasználva). Ekkor egy meghibásodás bekövetkeztekor, az aktuálisan élő kapcsolatok nem szenvednek minőségromlást, viszont az újonnan bejövő hívá-

A négy védelmi megvalósítás vizsgálatának eredményei [Tiv01]

Védelmi megoldás	Összes linkkapacitás	A maximális blokkolás mértéke fix vagy alternatív útvonalválasztással	A helyreállítás idejének nagyságrendje	A helyreállítás minősége
Helyreállítás többlet erőforrás nélkül	100,00%	0.07 / 0.014	Topológia felfedezés az útvonal irányító táblák frissítésével + hívásfelépítési idő	Nem garantált
Helyreállítás többlet erőforrással (az eredeti blokkolás visszaállítása)	149,64%	0.005	Topológia felfedezés az útvonal irányító táblák frissítésével + hívásfelépítési idő	Nem garantált
1+1 dedikált védelem többlet erőforrás nélkül	194,96%	0.11/0.1	Védelmi kapcsolás	Egyszeres hibánál garantált
1+1 dedikált erőforrással (az eredeti blokkolás visszaállítása)	258,99%	0.0012	Védelmi kapcsolás	Egyszeres hibánál garantált

sok nagyobb blokkolást fognak szenvedni a hálózat erőforrásainak csökkenése miatt. Amennyiben az új hívásoknak is alacsony blokkolási szintet szeretnénk biztosítani, akkor a két független elvezetéshez szükséges erőforrásokon kívül továbbiakat kell beépítenünk a hálózatba.

A kapcsolt optikai hálózatokban megvalósított védelmi mechanizmusok minőségi paramétereinek vizsgálatával kialakíthatóak a különböző szolgáltatási osztályoknak megfelelő védelmi osztályok, illetve megbecsülhetőek ezek erőforrás-szükséglete.

7. Végkövetkeztetés, konklúzió

A távközlési szolgáltatók – megtapasztalva az eddigi OTN megvalósítások problémáit –, olyan hálózati megoldásokat kívánnak kialakítani, amelyek alkalmasak a jelenlegi és jövőbeni igényeik megfelelőbb kiszolgálására. Az új hálózati koncepciónak a lehető legnagyobb mértékben a már meglévő megvalósításokhoz célszerű alkalmazkodnia, azok hálózati funkcióit maximálisan felhasználva. A kapcsolt optikai hálózat alapja egy hagyományos optikai transzport-hálózat, kiegészítve fejlett menedzsmentfunkciókkal, amelyek logikailag egy különálló menedzsmentréteget alkotnak. A fejlett menedzsmentfunkciók lehetővé teszik új transzportrétegbeli szolgáltatások megvalósítását, a gyors szolgáltatnyújtást, a hálózat változásainak automatikus észlelését, valamint a helyreállítás alapú védelmek menedzselését.

A bemutatott illusztratív példák, a szemi-permanens OTN hálózatokkal való összehasonlítás alapján, kívántak rávilágítani a kapcsolásból adódó előnyökre és hátrányokra, valamint a fejlett menedzsmentfunkcióknak a védelmi mechanizmusokban kihasználható lehetőségeire.

Mivel a kapcsolt optikai architektúra meg csak kialakulási fázisában van, számos tervezési és megvalósítási kérdés még megválaszolatlan. Számos jelenleg is folyó kutatási projekt célja ezeknek a kérdéseknek a megválaszolása. Megemlíthető, hogy 2002 októberében az IST-LION projekt keretében lezajlott az első működő ASON implementáció demonstrációja, amely jól tükrözi a koncepció jelenlegi megvalósítási állapotát [IST01].

Köszönetnyilvánítás

Ezúton mondok köszönetet Dr. Lajtha Györgynek, aki a cikk elkészítését értékes észrevételeivel segítette, valamint az ASON tématerülettel foglalkozó EURESCOM P1012 FASHION projekt minden hazai és külföldi résztvevőjének (Swisscom, France Telecom R&D, Matáv, Telecom Italia Lab SpA, Telenor, OTE SA, Portugal Telecom Inovação), illetve a BME Híradástechnikai Tanszék munkatársainak, akik lehetővé tették számomra a projekt munkájába való bekapcsolódást.

Irodalom

[Gla01] Dr. Andreas Gladisch (DT-Germany): Why do we need intelligence in optical networks? ASTN, GMPLS, ASON, "Intelligence in Optical Networks", Third Hungarian WDM Workshop, 8. April 2003. Budapest, Hungary

[Manz01] Antonio Manzalini, Katsuhiro Shimano, Carlo Cavazzoni, Alessandro D'Alessandro: Architecture and Functional Requirements of Control Planes for Automatic Switched Optical Networks: Experience of the IST Project LION, IEEE Communications Magazine, November 2002

[Eur01] EURESCOM P1012 FASHION project eredményei megtalálhatóak: <http://www.eurescom.de/public/projects/P1000-series/p1012/default.asp> WEB

[Ling01] L. Li and A. Somani: Blocking performance analysis of fixed-paths least-congestion routing in multifiber WDM networks. All optical networking 1999: architecture, control, and management issues, pp.56–67, Boston, MA 1999.

[Tiv01] T. Jakab, Zs. Lakatos: Protection and restoration based resilience in Automatic Switched Optical Networks, Proceedings of 10th International Telecommunications Strategy and Planning Symposium – NETWORKS 2002, München, Germany, June 2002, pp.459–467.

[ALL IP1] Antonio Rodrigues-Moral, Paul Bonenfant, and Murali Krishnaswamy: The Optical Internet: architectures and protocols for the global infrastructure of tomorrow. IEEE Communications Magazine, 39(7):152–159, 2001.

[ALL_IP2] Paul Bonenfant, Antonio Rodriguez-Moral: Framing techniques for IP over fiber. IEEE Network, 15(4):12–18, 2001.

[Luc01] <http://www.lucent.com/press/0400/000417.nsb.html>

[Ngpn01] Next Generation Photonic Networks (NGPN), Deliverable, (www.ngi.org)

[Trans01] B. Ramamurthy, S. Yaragorla, X. Yang: „Translucent Optical WDM Networks for the Next-Generation Backbone Networks,“ in the Proceedings of IEEE GLOBECOM 2001, San Antonio, TX, Nov. 2001.

[IST01] <http://www.ist-optimist.org>

Fejlődési trendek az optikai hálózatok piacán

- innováció, fejlesztés, várható fejlemények és növekedési kilátások -

ANDREAS ANTONOPOULOS PH.D.

A Közép-Európai Egyetem Üzleti Továbbképző Intézetének
információs technológiai és távközlésgazgatási oktatója

Kulcsszavak: távközlő berendezések piaca, innováció, SDH, Ethernet, nagyvárosi WDM rendszerek

Cikkünkben röviden áttekintjük az optikai hálózati piacon érvényesülő általános trendeket. A felvetődött kérdések fontossága és összetettsége, valamint a cikk áttekintő jellege miatt alapos elemzésre nem volt módunk. Igyekeztünk betekintést adni azokról a tényezőkről, amelyek az optikai hálózati piacot a következő években előrelendítik, s amelyek az ágazat történeke legnehezebb éveit követően megteremtik az annyira várt növekedés szükségét és lehetőségét.

1. Bevezetés

Az optikai hálózatok piaca mélyreható változásokon ment át az elmúlt öt év során. A beruházásoknak köszönhetően 1998-1999-ben szédítő növekedésnek indult, majd 2001-2002-ben ugyanilyen látványos hirtelenséggel összeomlott. Hosszan tartó beruházási szabadesés és súlyos depresszió után az optikai hálózati piac csak a közelmúltban kezd ismét magára találni. A válságos időszakban számos piaci résztvevő eltűnt, a beruházásokat drasztikusan visszafogták, kutatási és termelési projektek maradtak félbe, a kulcsszereplők érdeklődése pedig más technológiák felé fordult. A most kialakulóban lévő optikai piacot olyan környezet határozza meg, amelyben merőben más a jelentős résztvevők ereje, magának a piacnak a nagysága és a beruházói közösség érdeklődése is. Ebben a környezetben a szolgáltató igényesebb, új hálózati megoldásokra törekszik, a gyártó pedig kisebb, de érettebb szériákat szállít, jobban „oda valót”, nagyobb értéket kap a gyártósorától. Kialakulnak azok a végfelhasználói szolgálatok, amelyeket nem a piaci divat, hanem a tényleges igények határoznak meg, ennek nyomán áttekinthetőbb és egyértelműbb az optikai hálózati piac jövője, az új technológiák és termékek ismeretében jobban behatárolhatók a lehetőségek. Cikkünkben az optikai hálózati piacok legújabb fejleményeit tekintjük át, betekintést nyerünk a piac várható alakulásába és megvitatjuk a piacok néhány fontosabb meghatározó tényezőjét.

2. Az optikai hálózati ágazat

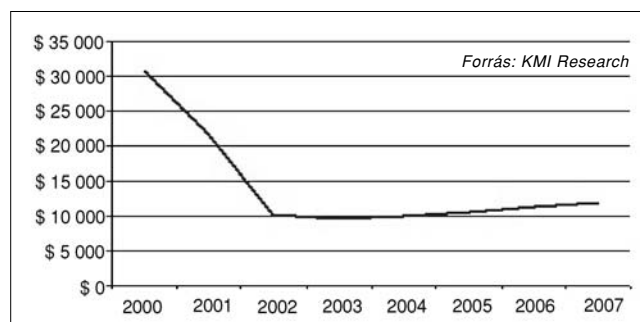
Az utóbbi években az optikai piac meglehetősen görgyös úton haladt, s egyik legnagyobb áldozata volt a távközlési piac lejtmenetének. Az ezredfordulón több milliárd dollárt költöttek új optikai gerinchálózatok kiépítésére, számos vállalat csapott le az új lehetőségre. 2003-ra azután pénzügyileg teljesen ellehetetlenült az optikai kapcsolás, a 40G technológiák, a fejlett optikai alkatrészek és sok más felkapott technológia piaca. Ezen területek egy részén valójában ma is működik a korábbi-

nál kisebb számú piaci résztvevő, amelyek továbbra is fejlesztenek és küzdenek a piaci részesedésért, ezeknek a technológiáknak a többsége előbb-utóbb „piacképes” is lesz. Ha azonban mérleget vonunk, azt mondhatjuk, hogy a túlfűtött lelkesedés idő előtt juttatta ezeket a technológiákat a piacra, s bukásuk után egy ideig a raktárakban maradnak.

Az optikai hálózati berendezések piaca 2002-ben 10,05 milliárd dollárt tett ki, ez egyetlen év alatt 53 százalékos csökkenést jelentett, 2003-ban a csökkenés további 6 százalékos volt, így a piac 10 milliárd dollár alá esett [1,2]. Ezt megelőzően, 2000 és 2001 között a piac már elszenvedett egy 29 százalékos értékvesztést. Úgy tűnik azonban, hogy az optikai hálózati berendezések piaca 2003 második felében stabilizálódott és 2004-ben enyhe fellendülésre is számítani lehet. Az 1. ábra szerint a következő években kis mértékben, de folyamatosan nő az ezen a területen elköltött pénz mennyisége.

Ahhoz képest, hogy 2003-ban a teljes szolgáltatói Capex több mint 12 százalékkal csökkent [3], az optikai hálózati piac 6 százalékos visszaesése nem is tűnik rossznak. A teljes optikai hálózati piac előreláthatólag csak mérsékelt növekedésnek indul, a 2003. évi 10 milliárd dollárról 2007-ben közel 12 milliárd dollárra nő, ami kb. évi 3 százalékos növekedésnek felel meg.

A 2003. évre vonatkozó piaci adatok szerint megváltozott a piaci tevékenység, elsősorban a nagyvárosi és egyéb kis hatósugarú hálózatok építése van fellendülőben, ami egyes kategóriákban a piaci részesedés



1. ábra Az optikai hálózati berendezések piaca,

átalakulásához is vezetett. Észak-Amerikát és Nyugat-Európát különösen erősen érintette a távközlési ágazat összeomlása, ezekben a térségekben esett vissza a legdrasztikusabban a beruházás, míg Ázsiában és a csendes-óceáni térségben Kínának, Tajvannak és Koreának sikerült tompítani a piac visszaesésének negatív hatásait.

2000-ben még a beruházások többsége (több mint 40%) Észak-Amerikában valósult meg, míg 2003-ban már nagyjából egyenlően oszlott meg a jelentős térségek között: Ázsia és csendes-óceáni térség: 33%, Észak-Amerika: 30%, Európa és Közel-Kelet: 30%, Közép- és Dél-Amerika: 7%. Ázsiában és a csendes-óceáni térségben jól halad a hálózatépítés, Kínában lelassult, Indiában viszont felgyorsult.

A teljes optikai hálózati piac a 2002. évi 10,05 milliárd dollárról 2007-ig 12 milliárd dollárra bővül. Ez a lassú növekedés azonban termékkategóriánként jelentős eltéréseket takar. A következő generációs Sonet és SDH termékek éves növekedési üteme például az említett időszakban megközelíti majd a 20%-ot. Ugyanakkor a hagyományos Sonet és SDH piac éves csökkenése meghaladja a 35%-ot, az optikai hálózaton belül ez a kategória produkálja majd a legjelentősebb visszaesést. A szóródás más berendezéskategóriáknál is hasonlóan nagy lehet.

A piacot befolyásolni fogja az is, hogy a szolgáltatók óvatosabb beruházási politikát folytatnak, stratégiájuk a meglévő hálózat maximális kihasználását célozza. Hasonlóképpen hat majd a piacra a szolgáltatók közötti fúzió illetve felvásárlás és az árcsökkenés is. Végül, de nem utolsó sorban, a piactisztítás következtében rendelkezésre álló olcsó hálózati eszközök is fékeznek majd az optikai hálózati berendezések piacának fellendülését.

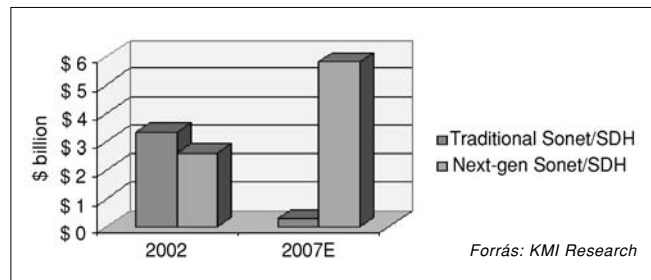
3. Innováció és trendek az optikai hálózati ágazatban

Az optikai hálózati piacon tapasztalható visszaesés ellenére az innováció változatlan lendülettel folytatódik. Ha megvizsgáljuk az aktuális piaci kilátásokat és figyelembe vesszük azt a tényt is, hogy a gyártók és a szolgáltatók minden korábbinál ésszerűbb magatartást tanúsítanak, kirajzolódnak előttünk az optikai hálózatok terén működő berendezésgyártókra és szolgáltatókra vonatkozó rövid- és középtávú trendek illetve az előttük álló lehetőségek.

A kirajzolódó trendek mögött a már említett innováció és a tényleges ügyféligények jobb megismerése áll, ezek határozzák meg az ágazat legígéretesebb növekedési területeit. A legjelentősebb növekedési területek a következők:

3.1. Következő generációs Sonet/SDH

Jelenleg minden valószínűség szerint a következő generációs Sonet/SDH az optikai hálózatoknak az a területe, amelyen a hagyományos berendezések gyártói a legnagyobb harcot vívják az utóbbi időben egyre



2. ábra A kiadások prognosztizált változása a hagyományos és a következő generációs Sonet/SDH terén

aktívabb új vállalkozásokkal. A szolgáltatók felismerték, hogy gyors ütemben nő az igény nagyvárosi és transzport hálózatok átviteli kapacitásai iránt, ezért szinte kivétel nélkül mindegyikük elkezdte felvásárolni ezekhez az új transzport berendezéseket az új alkalmazások kialakításához. A hagyományos SDH-t már csak az előfizetői hálózat bővítésére használják, igény esetén. A piacon jelen lévő nagy számú kezdő vállalkozás és hagyományos gyártó miatt megnőtt a különbségtevés jelentősége a marketing terén, s egyre nagyobb az eltérés a műszaki zsargonban is az Atlanti-óceán két partján, számtalan kifejezést használnak a berendezések gyakran nem is olyan nagyon eltérő jellemzőinek vagy szolgáltatásainak leírására.

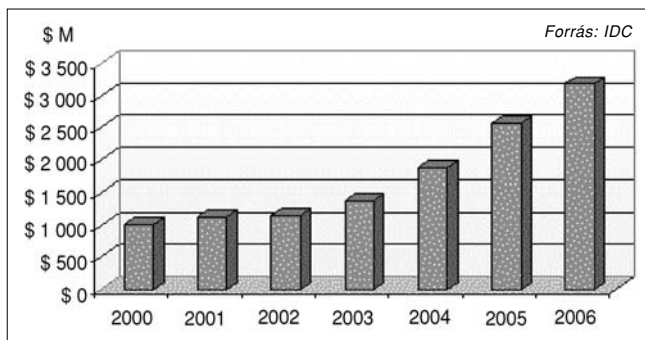
Mivel a hagyományos beszédhang-forgalom a teljes forgalomnak egyre kisebb hányadát teszi ki, új szállítóhálózati architektúrák jöttek létre, például MSPP (Multi Service Provisioning Platform), RPR (Resilient Packet Ring), OED (Optical Edge Device), optikai Ethernet. Az ilyen rendszereknek sokkal jobb az automatikus konfigurációs képességük, többféle forgalmat tudnak átvinni a sávszélesség kiosztása szempontjából igen rugalmas mechanizmusok használatával.

A következő generációs Sonet berendezések piaca 2007-ig évente kb. 21 százalékkal bővül, a következő generációs SDH rendszereké 17 százalékkal, miközben a hagyományos Sonet/SDH rendszerek forgalma jelentős mértékben csökken a jelzett időszakban [2]. Ez látható a 2. ábrán.

A következő generációs Sonet/SDH-hoz tervezett eszközök fel fogják váltani a meglévő Sonet/SDH ADM-eket, mivel kisebbek, költséghatékonyabbak, valamint egyszerűbben menedzselhetők és konfigurálhatók. A legfontosabb szempont az, hogy a következő generációs rendszerek biztosítják mind a csomag alapú szállítást (például Ethernet), mind a vonal alapú TDM támogatást egyetlen olyan egységben, amely úgy működik, mint egy Sonet/SDH ADM.

A kapható különféle következő generációs berendezések közül messze az MSPP a legkeresettebb, egyúttal e mögött vannak a legnagyobb gyártók és ezek biztosítják a legjobb szolgáltatói háttérrel. A következő öt évben az MSPP szegmens adja a nagyvárosi optikai hálózati bevételek legnagyobb részét, a várható bevételeket a következő oldali, 3. ábra mutatja [4].

A most piacra kerülő következő generációs Sonet/SDH vizsgálatok kiderül, hogy tulajdonképpen a pia-



3. ábra Prognosztizált MSPP beruházások

con jelen lévő Sonet/SDH berendezések harmadik generációjáról van szó. Az első generáció az add/drop multiplexer volt, melynek alapjait még az 1980-as évek vége felé kidolgozott eredeti SDH szabványok rakták le. A második generáció, a „következő generációs” Sonet/SDH körülbelül öt évvel ezelőtt jelent meg, ebben az ADM átalakult Sonet/SDH DXC-vé, amelynek képes volt az Ethernet leképezésére Sonet/SDH-ba vagy az ATM kapcsolás integrálására adatátviteli alapszolgáltatások céljára. A „harmadik generációs” Sonet/SDH ennél is tovább megy, amennyiben az ITU által szabványosított funkciók – GFP (Generic Framing Procedure), VCAT (virtual concatenation), LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme) és RPR használatával igen változatos adatorientált Sonet/SDH platform építését teszi lehetővé, amely szinte bármilyen szolgáltatói forgalmat képes összefogni, kapcsolni és szállítani a meglévő Sonet/SDH hálózaton [5].

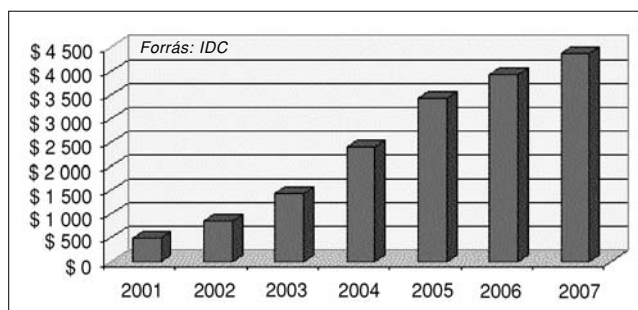
A harmadik generációs Sonet/SDH szegmens lesz a legfontosabb terület az új optikai hálózati projekteknél, ez a fő oka annak, hogy a meghatározó gyártók elsősorban optikai hálózati termékeikre koncentrálnak és igyekeznek behozni azt a hátrányt, ami néhány éve még jelentős volt az újonnan piacra lépő vállalkozásokhoz képest.

3.2. Ethernet technológia és szolgálatok

Az Ethernet technológia és különösen az Ethernet szolgálatok már a távközlési válság közepén is egészséges növekedési ütemet mutattak, s a következő években is várhatóan további látványos növekedést produkálnak, s ezzel megteremtik az alapját az olyan szolgálatoknak, mint például a virtuális privát LAN-ok. Az Ethernet szolgálatok és forgalmak a legfőbb hajtóerői az előző pontban tárgyalt következő generációs Sonet/SDH berendezések fejlesztésének. Az Ethernet jövője és hatása az optikai hálózatok egyéb területeire olyan jelentős, hogy csak önmagához mérhető. Az Ethernet ezenkívül utat nyit magának a hagyományos Sonet/SDH hálózatokba is, ami olyan új szállítóhálózati architektúrák kifejlesztéséhez vezet, amelyek az Ethernetet az egyik legfontosabb szolgálati klienssé teszik. Ugyanakkor számos egyéb szállítási mechanizmus is rendelkezésre áll a nagyvárosi Ethernet hálózatokhoz, ilyen például a fényvezető szálon biztosított Ethernet és a WDM-en nyújtott Ethernet. Mivel a nagyvárosi hálózati

piacokra sokféle Ethernet technológiát fejlesztenek ki, az Ethernet egy mindenütt – fényvezető szálon, koaxiális kábelben és rézvezetékben – jelen lévő technológiává válik.

A nagyvárosi Ethernet-eladások értéke 2002-ben 2,5 milliárd dollár volt, ez az összeg 2006-ig várhatóan 5,9 milliárd dollárra nő; 2002-ben 906 ezer portot helyeztek üzembe, a portok száma 2006-ig 3,6 millióra nő [3]. Az említett kiadások java része útválasztók és kapcsolók beszerzését jelenti, s csak kisebb részben képviselik a közvetlenül fényvezető szálon nyújtott Ethernet működtetését. Jelentős részt tesz ki a Sonet vagy SDH útján biztosított Ethernet is. A 4. ábrán a nagyvárosi Ethernet-piac következő években várható növekedése látható. Az Ethernet szolgálatok növekvő népszerűségének legfőbb oka a szórakoztató és üzleti szolgálatok iránti igény növekedése. A 2/3. rétegű kapcsolók és útválasztók képviselik az Ethernettel kapcsolatos kiadások legnagyobb részét.



4. ábra Nagyvárosi Ethernet berendezések prognosztizált világti bevétel, 2001-2007 (millió dollárban)

A szabványok – például a GFP (generikus keretező eljárás) és az RPR – rugalmasságának célja az, hogy Ethernet forgalommal töltsék ki a Sonet/SDH kapacitást. Ugyanakkor új szabványok is jelennek meg, hogy az Ethernetet még alkalmasabbá tegyék a szolgáltatói hálózatok számára [6]. Ide tartoznak az üzemviteli, igazgatási és üzemfenntartási (OAM) funkciók, valamint több olyan szabványtervezet is, amely az Ethernet hozzáférő hálózatban való használatát szabályozza, elsősorban a rézvezetékben és a passzív optikai hálózaton (PON) nyújtott Ethernet rendszereket.

Kiemelt szempont az, miként lehet az Ethernetből igazán „szolgáltatói kategóriát” varázsolni, vagyis megnyugtatóan rendezni a bővíthetőséggel, biztonsággal, szolgálatminőséggel, együttműködéssel és menedzselhetőséggel kapcsolatos kérdéseket.

3.3. Optikai rendezőn (OXC-n) alapuló maghálózatok

Annak ellenére, hogy a kérdés a távközlési buborék kipukkanásának idején a napirend előkelő helyén szerepelt és soha nem látott mértékű összeomlást produkált 2002-2003-ban, számos szolgáltató ilyen irányban kezdte alaphálózatának korszerűsítését (az AT&T és a Sprint volt a két élvonalas). Az optikai rendezőn alapuló, átkonfigurálható hálózatok felé fordulás helyes döntés volt a szolgáltatók részéről, csak kicsit korai. A trend azonban egyre szélesebb körben érvényesül, ami egyúttal

jó lehetőség is a túlélésért küzdő piaci szereplőknek, különösen akkor, ha komoly FTTP (Fiber to the Premises)-építési tanulmányokkal párosul. Az alaphálózat forgalmi igényei ugyanis jelentősen megnőnek, s ez várhatóan felgyorsítja az OXC-n alapú hálózatokra való átállást. Előrejelzések szerint az OXC-re költött összeg 2007-ig kétszámjegyű értékkel növekszik [1].

3.4. Átkonfigurálható optikai ADM-ek (ROADM-ek) és hangolható szűrők

Szinte minden előrejelzésből az derül ki, hogy az optikai alaphálózatok piaca egy ideig még nyomott marad, elsősorban azért, mert az ilyen hálózatok többségében felesleges sávszélesség-kapacitás mutatkozik. A nem túl rózsás kilátások ellenére a hangolható szűrők fejlesztése sokat lendít a ROADM-ek helyzetén, nem csak új létesítményekben való alkalmazásukkor, hanem a meglévő optikai gyűrűk korszerűsítésekor is. A ROADM-ek bevezetése ez utóbbi esetben is kitűnő üzleti megoldás. Mivel a hangolható szűrők ára a prognózisok szerint 2004-2005-ben jelentősen csökkenni fog, a ROADM bevezetésével komoly megtakarítások érhetőek el a transzponderek üzemeltetésében, az ilyen irányú továbbfejlesztés tehát igen vonzó lehetőség számos nagyobb szolgáltató számára. A ROADM-piac tehát várhatóan növekedni fog, számítások szerint a forgalom 2007-ig évente több mint 15%-kal nő, miközben az optikai piac összességében nyomott marad [1,5].

3.5. Multiprotocol Label Switching (MPLS)

A távközlési ágazat értéklánca mentén elhelyezkedő jelentősebb piaci szereplők olyan hálózati modellt keresnek, amely egyetlen csomag alapú infrastruktúrát használ az összes szolgálatok szállítására, ez lenne a középtávú hálózati architektúra cél. A modell lelke egy olyan IP mag, amely MPLS használatával biztosítja az ATM jellegű szolgáltatásokat, például a szolgálati kategóriákat.

A szolgáltatókért folyó csatát a jelek szerint az MPLS nyeri, egyre több szolgáltató vezet be, mivel a gyártók már nem arra törekszenek, hogy a technológia működését bizonygassák, hanem arra, hogy pénzt csináljanak belőle. Az MPLS gyors átirányítás szabványosítási munkái jól haladnak, ez a mechanizmus alternatív útvonalakat létesít 60 ms-nál rövidebb idő alatti helyreállításal [3,4]. 2003 folyamán a szolgáltatói körben nőtt a 3. rétegű virtuális magánhálózatok (VPN-ek) népszerűsége is. Az utóbbi két évben sokat fejlődött a virtuális magán LAN szolgálat (VPLS) és az Etherneten nyújtott 2. rétegű VPN-ek többpontú megvalósítása is. Az MPLS az ágazat egyik megbízhatóan növekvő területe, noha rövid időn belül számos kérdést kell még megoldani, ilyen például az MPLS igazgatása és fenntartása, a végponttól végpontig biztosított szolgálatminőség különböző MPLS hálózatok között, a GMPLS megvalósíthatósága, meglévő berendezések kihasználása vagy az MPLS-en nyújtott multicasting.

Az MPLS ma már a hálózat- és szolgálatmenedzsment továbbfejlesztett eszközeként van jelen az átviteli

hálózatokban. Az MPLS azonban – a GFP-nek köszönhetően – ennél sokkal mélyebben is beépülhet a Sonet/SDH hálózatokba. Napjainkban a GFP-nek az a nagy előnye, hogy sokkal jobb leképezési illetve kerekezési képességekkel rendelkezik, mint a HDLC (High-level Data Link Control), ami azt jelenti, hogy érzékeny bűcsút vehetünk a Sonet/SDH-n nyújtott csomagátvitel modelljének. A későbbiekben azonban a GFP a forgalom adaptálásánál többre is képes lesz: egész hálózatok összevonása válik lehetővé egy olyan mechanizmus segítségével, amely az MPLS folyamatokat közvetlenül Sonet/SDH csatornába képezi le, az MPLS vezérlő síkot pedig ezen csatornák overheadjébe.

3.6. Nagyvárosi WDM

Többéves izgatott találgatás után most úgy tűnik, divatba jön a nagyvárosi WDM. A növekedés stabil, de távolról sem akkora, mint amire a távközlési boom idején számítottunk. Ebben a piaci szegmensben a növekedés a sávszélesség-igény növekedésének eredménye, ami a hálózat korszerűsítésére ösztönöz, a szolgáltatók egyre jobban kényszerülnek átalakítani szállítási architektúrájukat a sokféle szolgálat, mindenekelőtt az Ethernet befogadása érdekében.

A CWDM (Coarse WDM – a DWDM olcsóbb változata) is kezd szárnyra kapni, de a fejlesztések ellenére egyre több kérdés merül fel az együttműködéssel és a kivitelezéssel kapcsolatban. A nagy szolgáltatók – attól tartva, hogy a boom miatt túl nagy kapacitást építhetnek ki – egyelőre kivárnak a teljes körű DWDM telepítésével hálózataikban. Ennek következtében több berendezésgyártó a CWDM fejlesztése felé fordult, ami lehetővé teszi az ingadozó, konzervatív pénzügyi politikát folytató szolgáltatók számára is a nagyvárosi WDM kiépítését. Mivel azonban a korszerű szabványok hiányoznak (akárcsak a DWDM esetében), a szolgáltatók igen változatos CWDM-megoldások közül választhatnak.

A DWDM középtávon, a CWDM pedig rövidebb távon is jó növekedési kilátásokkal kecsegtet, s várhatóan egyenletes, tartós növekedést produkál a következő öt év során. A nagyvárosi WDM terén megvalósuló beruházásokért komoly küzdelem várható, mivel a szolgáltatók száma nagy, az architektúrák pedig jelentős eltérést mutatnak [7].

Irodalom

- [1] Working Knowledge Market Research Reports, www.working-knowledge.com
- [2] KMI Research Market Research Reports, <http://kmi.pennnet.com/>
- [3] Infonetics Market Research Reports, <http://www.infonetics.com/home.htm>
- [4] IDC Market Research Reports, <http://www.idc.com>
- [5] Heavy Reading Market Research Reports, <http://www.heavyreading.com>
- [6] IETF Reports, <http://www.ietf.org>
- [7] Metro Ethernet Forum, <http://www.metroethernetforum.org/>

RARE-EARTH METAL DOPED FIBER OPTIC AMPLIFIERS AND THEIR COMPUTER AIDED MODELING

Keywords: Fiber optic amplifiers, EDFA, population inversion
Amplification characteristics of fiber optic amplifiers are defined by bearing and doping materials together. The amplification problems experienced by the more and more wider communications bands lie in the selection of doping materials and the raw materials of the fiber. Modeling and designing of these systems can be based on the measurement of the operating cross-section of doping materials being present in the bearer material and on the solution of propagation equations.

APPLICATION AND MODELING OF VCSELS IN DIRECT MODULATED OPTICAL CONNECTIONS

Keywords: Semiconductor lasers, direct modulated laser, VCSEL modeling

VCSELS (vertical cavity surface emitting lasers) are very important developments in optical communications. Their operational parameters are equal to those of traditional side emitting semiconductor lasers while their cost of production can be a fraction of them. This article introduces the features and potential applications of the new laser type in high-speed direct modulated optical connections. The proposed circuit model can simulate spatial effects – such as diffusion or spatial hole burning – operating in VCSELS.

IMPLEMENTATION OF WAVELENGTH CONVERSION USING OPTICAL SEMICONDUCTOR AMPLIFIERS

Keywords: WDM, semiconductor optical amplifiers, wavelength conversion

The development of a device for wavelength conversion is an important issue for the efficient use of WDM-based optical networks. These devices should be able to alter the wavelength of the optical channel in the optical domain. This paper provides a short overview on possible solutions, their features and applications as well as on the testing of parameters of this promising method.

APPLICATION ISSUES OF 40 GBIT/S TRANSMISSION SYSTEMS

Keywords: DWDM, SDH, optical fiber dispersion, modulation
Today's cutting-edge DWDM systems allow for the transmission of 40...160 channels of 10 Gbit/s each. This seems to be an immense transmission capacity, however, current trend of the increase in traffic suggests that in course of the next few years Hungary should consider the introduction of 40 Gbit/s systems being now under field tests. Our article discusses technical and technological issues in the development and applications of 40 Gbit/s systems.

PACKET-SWITCHED OPTICAL ROUTER WITH SUB-CARRIER ADDRESSING

Keywords: WDM, optical packet switching, sub-carrier
As part of an international project, our laboratory is working on the research and development of an optical core router. This device is based on the wavelength-division packet-switched technology using sub-carrier addressing. The aim of this paper is to offer an insight into our development concept and the results achieved up to now.

CODE DIVISION IN OPTICAL COMMUNICATIONS

Keywords: Multiple optical access, spread spectrum systems, orthogonal optical codes
This tutorial tries to provide an overview on the basics and field of application of the OCDMA technology. The pa-

per starts with a short summary of DS spread spectrum systems widely used in radio systems for CDMA which is followed by some basic features of appropriate spectrum spreading codes. The next section introduces OCDMA systems and optical spectrum spreading codes. Finally diverse fields of application and some systems are discussed and a short summary is given. In addition to the article a detailed bibliography is given for our readers' reference.

WAVELENGTH-DIVISION PACKET-SWITCHED OPTICAL NETWORKS

Keywords: WDM, optical packet-switched networks, optical address processing

The increasing demand for bandwidth has made necessary the implementation of high-speed transparent optical networks. Since a large part of active optical devices are still under development and engineers are often facing restrictions in use, an obvious question arises: what will be the research and development trends in the near future and what particular problems are to be solved? Theoretical and practical problems of optical packet switching are also dealt with.

ROUTING AND TRAFFIC BY-PASS IN MULTI-DOMAIN OPTICAL SWITCHED NETWORKS

Keywords: GMPLS, optical routing, optical PNNI switched optical network simulation

This paper outlines routing techniques which may have influence on or have a good chance to the application as routing technique supporting future multi-layer, multi-domain and multi-service networks. Resulting standards are introduced and modification required by widely used protocols are also dealt with. In the second part of the paper an in-house developed simulation environment is discussed which is used for the assessment of proposed new methods. The effect of the delayed of information spreading on call blocking is, among others, studied.

AUTOMATICALLY SWITCHED OPTICAL NETWORKS

Keywords: Optical transport networks, managed optical cross-connects, case studies in networking

This article provides a summary of the emerging automatically switched optical networking technology based on the results of the EURESCOM P1012 FASHION project. The purpose of the article is to bring forward motivations, expectations, demands of operators and service provision as well as possible implementations. Based on some case studies determinative features of networking architectures are demonstrated.

DEVELOPMENT TRENDS IN THE MARKET OF OPTICAL NETWORKING

Keywords: Telecommunications equipment market, SDH, Ethernet, metropolitan WDM systems

The emerging optical networking market is determined by an environment in which the power of significant players, the size of the market itself and the interest of the investment community is greatly different. In this environment service providers are seeking for new, more attractive networking solutions while equipment manufacturers supply smaller but more mature series and in this way they get more value, "better fitting" equipment from the production lines. This paper surveys current developments of optical networking markets, depicts the development trend of these markets, finally some decisive factors of the optical networking markets are discussed.

Contents

Dr. György Lajtha, Dr. László Zombory: *NEW YEAR, NEW LOOK OF THE MAGAZINE* 1

Géza Paksy: *INTRODUCTION OF THE GUEST EDITOR* 2

OPTICAL ACTIVE DEVICES

Várallyay Zoltán, Jakab László, Richter Péter, Varga Gábor
Rare-earth metal doped fiber optic amplifiers and their computer aided modeling 3

Marozsák Tamás
Application and modeling of VCSELs in direct modulated optical connections 8

Kovács Gábor
Implementation of wavelength conversion using optical semiconductor amplifiers 15

OPTICAL COMMUNICATIONS EQUIPMENT

Jeszenői Péter
Application issues of 40 Gbit/s transmission systems 19

Kovács Attila, Deme Ildikó
Packet-switched optical router with sub-carrier addressing 25

NETWORKING TECHNOLOGIES AND PROTOCOLS

Frigyes István
Code division in optical communications 28

Deme Ildikó, Kovács Attila
Wavelength-division packet-switched optical networks 37

Szigeti János, Tapolcai János, Rétvári Gábor, Láposi Levente, Cinkler Tibor
Routing and traffic by-pass in multi-domain optical switched networks 42

OPTICAL NETWORKS

Lakatos Zsolt
Automatically Switched Optical Networks 50

Andreas Antonopoulos
Development trends in the market of optical networking 60

Cover: *MEMS micro-mirrors might be optical switches of Managed Optical Cross-connects (Source: www.lucnet.com)*

Szerkesztőség

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451, e-mail: hte@mtesz.hu

Hirdetési árak

1/1 (205x290 mm) 4C 120.000 Ft + áfa
Borító 3 (205x290mm) 4 C 180.000 Ft + áfa
Borító 4 (205x290mm) 4 C 240.000 Ft + áfa

Cikkek eljuttathatók az alábbi címre is

BME Szélessávú Hírközlő Rendszerek
Budapest XI., Goldmann Gy. tér 3.
Tel.: 463-1559, Fax: 463-3289,
e-mail: zombory@mht.bme.hu

Előfizetés

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451
e-mail: hte@mtesz.hu

2004-es előfizetési díjak

Hazai közületi előfizetők részére:
1 évre bruttó 31.200 Ft
Hazai egyéni előfizetők részére:
1 évre bruttó 7.000 Ft

Subscription rates for foreign subscribers:

12 issues 150 USD,
single copies 15 USD

www.hte.hu

Felelős kiadó: MÁTÉ MÁRIA
Lapmenedzser: Dankó András

HU ISSN 0018-2028

Layout: MATT DTP Bt. • Printed by: Regiszter Kft.