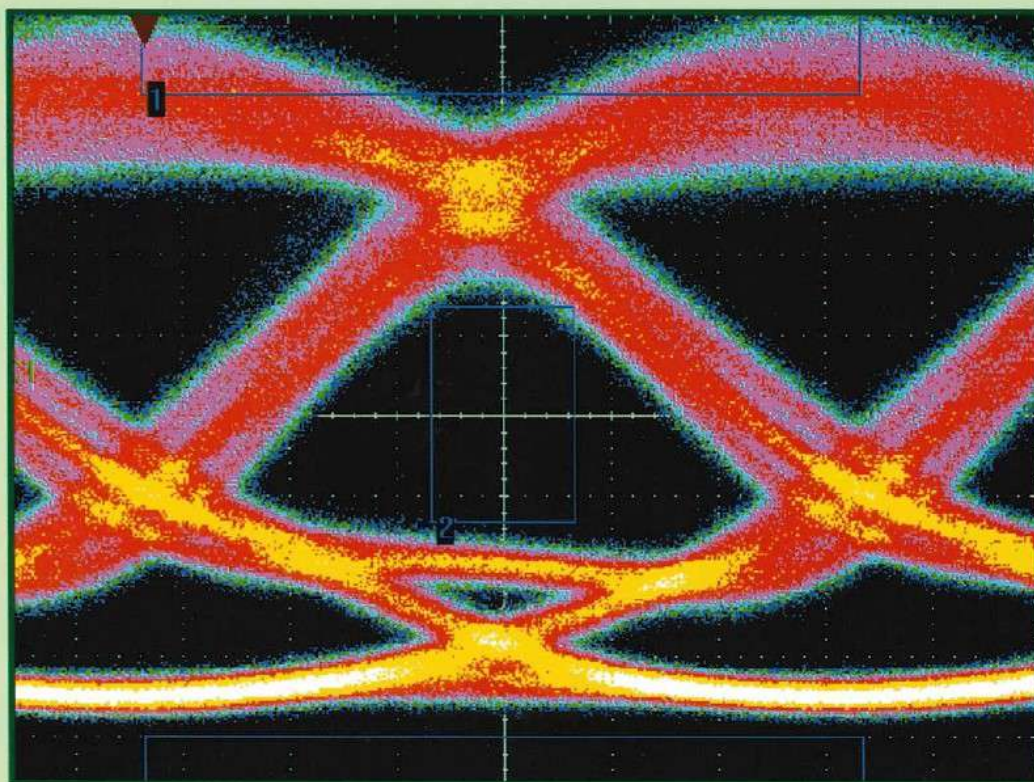


híradástechnika

1945 VOLUME LXI. 2006

hírközlés ■ informatika



Fénytvádközlés

Rendszerek és berendezések

Intelligens optikai hálózatok

2006/2

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

Tartalom

FÉNYTÁVKÖZLŐ RENDSZEREK ÉS HÁLÓZATOK	1
Jeszenői Péter, Szatmári Jenő 10 és 40 Gbit/s sebességű DWDM rendszerek alkalmazhatóságának fizikai korlátai	2
Zsigmond Szilárd Polarizációs Módus Diszperzió és kompenzáciási lehetőségei WDM hálózatokban	11
Farkasvölgyi Andrea Optikai sávú összeköttetések alkalmazása az úrtávközlésben	17
Kovács Gábor, Bánky Tamás, Berceli Tibor Címkefeldolgozás és csomópont-megvalósítás optikai csomagkapcsolat hálózatokban	23
Bódi Tamás, Szekeres Péter Félvezető eszközök és áramkörök optikai vezérlése	27
Kern András, Somogyi György, Cinkler Tibor Statisztikus nyalábolás és forgalom kötegelés együttes hatása optikai hálózatokban	35
Lakatos Zsolt, Szegedi Péter A grid hálózatokban alkalmazható jelzésarchitektúrák és helyreállítási mechanizmusok vizsgálata	41
Kárász Tamás Valós időben konfigurált optikaicsatorna-szolgáltatást nyújtó hálózatok kapacitás-kihasználtságának javítása	47
Geleji Géza, Asztalos Márk, Cinkler Tibor, Hegyi Péter A hullámhossz-utak adaptív fragmentálása forgalomkötegeléses WDM optikai hálózatokban	54

Címlap: 10 Gbit/s sebességű jel „szemábrája” 100 km hosszú optikai szál esetén (Fotó: Jeszenői Péter, PKI)

Védnökök

SALLAI GYULA a HTE elnöke és DETREKŐI ÁKOS az NHIT elnöke

Főszerkesztő

SZABÓ CSABA ATTILA

Szerkesztőbizottság

Elnök: ZOMBORY LÁSZLÓ

BARTOLITS ISTVÁN
BÁRSONY ISTVÁN
BUTTYÁN LEVENTE
GYŐRI ERZSÉBET

IMRE SÁNDOR
KÁNTOR CSABA
LOIS LÁSZLÓ
NÉMETH GÉZA
PAKSY GÉZA

PRAZSÁK GERGŐ
TÉTÉNYI ISTVÁN
VESZELY GYULA
VONDERVISZT LAJOS

Fénytvávközlő rendszerek és hálózatok

paksy@tmit.bme.hu

szabo@hit.bme.hu

Immár harmadik alkalommal jelenik meg az optikai hírközlés egyre bővülő területére koncentráló Híradástechnika célszám. A 2004/2-es és a 2005/2-es célszámokhoz hasonlóan az ezévi februári szám szerkesztési célkitűzése is az volt, hogy áttekintés adjon a hazai fénytvávközlési kutatás-fejlesztés és alkalmazások területén elért eredményekről és hogy bemutasson néhány olyan újabb felhasználási területet vagy technológiát, amely érdeklődésre tarthat számot a szélesebb szakmai olvasókör számára is.

Ma már nem kétséges, hogy a vezetékes távközlő hálózatokban a leggyakrabban és legszélesebb körben alkalmazott információ-hordozó és -továbbító médium az optikai szálban vezetett vagy szabad térben terjedő fényhullám, és nem szükséges alkalmazásának előnyeit, az óriási sávszélességet, a megbízható, közel bithiba-mentes átviteli képességet, vagy a széleskörű alkalmazási lehetőségeket ecsetelni az olvasó számára. A hagyományosnak számító SDH/WDM gerinchálózati és tengeralatti rendszereknek már harmadik technológiai generációja üzemel világszerte és az előfizetői hálózatokban is egyre inkább megközelíti a felhasználókat. A szélessávú és mindenhol elérhető Internet társadalmi igénye, a multimédia tartalmat közvetítő szélessávú mobil szolgáltatások és az IPTV vagy DVB alapú digitális televíziózás elterjesztéséhez is elengedhetetlen a megfelelő lefedettségű és sűrűségű fényvezető hálózat.

A fénytvávközlésről tehát biztosan állíthatjuk, hogy egy olyan „diszruptív” technológia, amely fokozatosan kiszorítja a régebbi technológiákat és átveszi azok szerepét. Erre láttunk példát az elmúlt évtizedben a nagytávolságú koaxiális kábeles és mikrohullámú rendszerek és a nagyvárosi (metró) hálózatok esetén. Manapság a LAN és az előfizetői hálózatokban való rohamos terjedésnek vagyunk szemtanúi a szimmetrikus rézkábelek rovására.

A nagysebességű, gerinchálózati rendszerek teljesítőképességének növelésére irányuló fejlesztések több irányban is folynak. Lehetséges a WDM hullámhosszak számának, vagy az egy hullámhosszon átvitt TDM nyálábok sebességének, vagy például hatékonyabb modulációval az egy hertzre eső adatsebesség (bit/Hz) növelése. Mindhárom fejlesztési irányban előbb-utóbb az átvivő optikai szál lineáris vagy nem-lineáris fizikai tulajdonságai domináns korlátozó tényezővé válnak. Ezekkel a korlátozó tényezőkkel foglalkozik két cikk a folyóiratban. Az első a 10 és 40 Gbit/s sebességű (STM-64, -256) átviteli rendszerek szemszögéből vizsgálja az átvitelre ható fizikai jelenségeket. Egy másik cikk pedig az ebben a sebességtartományban meghatározó polarizációs mó-

dusú diszperzióval és hatásának kiküszöbölési lehetőségekkel foglalkozik.

Fénytvávközlő rendszerek között különleges helyet foglalnak el a műholdak közötti kommunikációra alkalmas szabad téri terjedésű optikai linkek. Áttekintést adunk az ilyen típusú rendszerek felépítéséről és fontosabb jellemzőiről. Egy másik cikkben pedig a fénytvávközlés és a fotonikai közelmúltban indult új és ígéretes területének, az optikai csomagkapcsolásnak egy részterületével foglalkozunk. Az optikai tartományi csomagkapcsolás várhatóan IP alapú elektronikus csomagkapcsoláshoz hasonló szerepet fog magának kivívni. Egy érdekes kutatási téma a fénnel vezérelhető félvezető eszközök és áramkörök területe. E tématerület csak abban az értelemben tartozik a fénytvávközléshez, hogy az így megvalósított félvezető eszközök és áramkörök fontos alkalmazási területe lehet a távközlés.

A cikkek második csoportja az optikai hálózatok alkalmazástechnikájával, hálózattervezési és üzemeltetési kérdésekkel foglalkozik. A hálózatok tervezésében, útvonal irányításában és ennek optimalizálásában jelentős változást hozott, hogy ma már az átviteli igények meghatározó része az adatforgalomból ered. Ennek következtében a hagyományos nyálábolási technikák helyett, az adatjelek tulajdonságaihoz jobban illeszkedő statisztikus multiplexálás válik a nyálábolás hatékony eszközévé. Egy cikkben a szerző bemutatja a statisztikus multiplexálás és a forgalomkötegelés (grooming) kapcsolatát.

A nagy számítási igényű feladatok megoldására ma már egyre inkább a sok számítógép grid hálózatokkal összefogott erőforrásait használják. Az ilyen típusú számítási igény jelentős feladatot ró az összekötő hálózatra. Az ezzel kapcsolatos európai kutatásban való részvétel eredményeiről számol be egy szerzőpáros. Két cikk is foglalkozik az optikai hálózatok optimális útvonal irányításának kérdéseivel. Az egyik a már létező útvonalak időnkénti – optimálisához közeli – újrendezésével, azaz konszolidálásával kapcsolatos stratégiákat mutatja be, míg a másik a gyengén kihasznált optikai csatornák optimális kihasználása érdekében szükséges forgalomkötegelési lehetőségeket elemzi. E két cikk a nagy hálózatokkal rendelkező szolgáltató számára nyújthat segítséget.

Összintén reméljük, hogy a új optikai célszám cikkei felkeltik az olvasó érdeklődését valamelyik új téma iránt, illetve a fénytvávközléssel kapcsolatban álló vagy ott dolgozó mérnökök hasznos információkat kaphatnak munkájukhoz.

*Paksy Géza,
vendégszerkesztő*

*Szabó Csaba Attila,
főszerkesztő*

10 és 40 Gbit/s sebességű DWDM rendszerek alkalmazhatóságának fizikai korlátai

JESZENŐI PÉTER, SZATMÁRI JENŐ

Magyar Telekom PKI Távközlésfejlesztési Intézet

{jeszenoi.peter, szatmari.jeno}@t-com.hu

Kulcsszavak: DWDM, optikai hálózat, optikai erősítő, fényvezetősál, diszperzió, SPM, XPM, FWM, SBS, SRS, Q-faktor

Az átviteli igények és a technikai fejlődés következtében egyre nagyobb sebességű nyalábokat továbbító, egyre több csatornás DWDM rendszerek kerülnek alkalmazásra. 10 Gbit/s, de különösen 40 Gbit/s alkalmazása esetén a fényvezetők diszperziós tulajdonságai kerülnek előtérbe. Az optikai erősítők által létrehozott nagy optikai szintek miatt a fényvezetőkben nemlineáris jelenségek tapasztalhatók. A hullámhosszak multiplexálására, demultiplexálására használt passzív optikai eszközök tökéletlensége a csatornák között áthallásokat okoz. A fenti jelenségek szorosan kapcsolódnak a nagysebességű átvitelhez, hatásukkal a rendszerek tervezése, telepítése, üzemeltetése során számolni kell. Általában a fizikai szint problémái a nagysebességű, több hullámhosszas átvitel esetén fokozottabban jelentkeznek, mint azt az alacsonyabb sebességű rendszereknél megszoktuk.

1. Bevezetés

A jelenlegi DWDM összeköttetések 40-160 darab 10 Gbit/s-os csatorna átvitelét teszik lehetővé, de a 40 Gbit/s-os berendezések fejlesztése is abba a fázisba jutott, hogy megjelennek az első üzemszerű forgalmat bonyolító rendszerek.

A korai egycsatornás, egymódusú fényvezető rendszerek idején az üvegsál szinte ideális átviteli közegnek számított. Az áthidalható távolságnak csak az optikai csillapítás szabott határt, mert a 2,5 Gbit/s-os rendszerek megjelenéséig az egymódusú fényvezetőt használó rendszerekben a kromatikus diszperzió hatása is elhanyagolható volt. Az alkalmazott lézerforrások direkt modulációja meglehetősen egyszerűen kivitelezhető volt, szabályos jelalak és jó kioltási arány mellett. Az alkalmazott, legfeljebb néhány milliwatt optikai teljesítmények mellett a fényvezető teljesen lineárisan viselkedett, a vonalszakaszon zajforrással, áthallással nem kellett számolni. A nagysebességű (≥ 10 Gbit/s) DWDM rendszerek esetén a fenti közel ideális állapottól messze kerültünk.

2. Az optikai átvitel fizikai korlátai

A fényvezetősálas átviteli rendszerekben – az analóg kábeltévés alkalmazásoktól eltekintve – digitális jeleket továbbítunk, de ennek ellenére mégis azt mondhatjuk, hogy az optikai szinten az átvitel teljesen analóg módon történik. A TDM eljárással „előmultiplexált” digitális információ optikai úton történő továbbításához az optikai vivőn intenzitásmodulációt alkalmaznak. Ezt a modulációs eljárást azért nem szoktuk amplitúdó-modulációnak nevezni, mert az optikai hordozó nem egyetlen egyfrekvenciás vivőhullám, hanem általában egy több MHz sávzélességű optikai spektrum. Az intenzitás-mo-

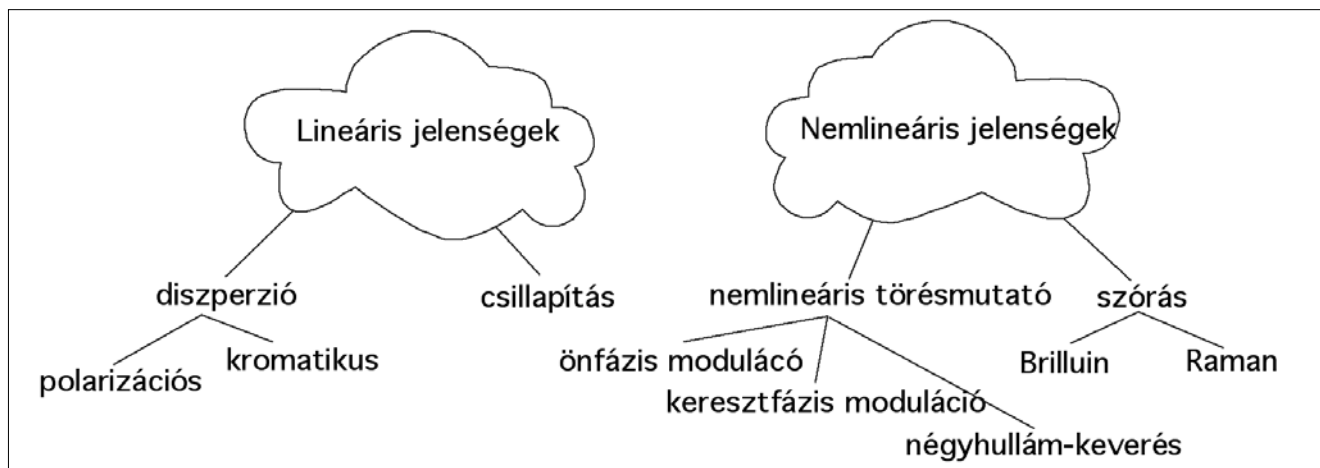
duláció egyszerűen kivitelezhető a fényforrásként használt félvezetőlézer meghajtó áramának ki-be kapcsolásával vagy külső modulátor alkalmazásával. A vételi oldalon nagyon egyszerű, direkt detektálás történik, nincs szükség a vivő előállítására, az eredeti digitális jelet a vevő fotódetektor áramának változása tartalmazza. A jel továbbításához nincs szükség különleges kódolásra, a szkemblerezett NRZ vagy RZ kódolású jelek továbbíthatók.

Az NRZ kódolás ugyanakkor nem a legelőnyösebb az átvitel szempontjából két tekintetben is: a kisugárzott vivő nem hordoz információt, ezért feleslegesen terheli az optikai erősítőket, és meglehetősen érzékeny a PMD-re (Polarizációs Módus Diszperzió). Az RZ kódolás a PMD szempontjából előnyösebb, de a vivő itt is kisugárzásra kerül. Léteznek más, sok szempontból előnyös modulációs módszerek is. Némelyikük a gyakorlati alkalmazás küszöbén áll. Terjedelmi okok miatt az egyes módszerek ismertetésére nem tudunk kitérni.

A nagysebességű átvitelt alapvetően befolyásolják az átviteli közeg, az alkalmazott fényforrások, az átviteli úton elhelyezett optikai passzív és aktív eszközök, az optikai vevő tulajdonságai. Az optikai szakasz maximális hosszát elsődlegesen a fényvezető és az útvonalba iktatott passzív elemek csillapítása limitálja. A csillapítás mellett a diszperziók okozta jeltorzulás, az optikai erősítők által termelt zaj, az áthallások okozta zavar, a szálaban jelentkező nemlineáris tulajdonságok miatt kialakuló jelalak torzulások, zajok, és a dzsitter együttesen tovább csökkentik az elfogadható hibaarányt mellett áthidalható szakasztávolságot.

A vonalszakaszon fellépő hibák ellen redundáns hibajavító kódolás alkalmazásával (Forward Error Correction, FEC) egy bizonyos mértékig lehet védekezni. A FEC bekapcsolásával 4...6 dB zajnyereség érhető el.

A továbbiakban áttekintjük azokat a tényezőket, amelyek a nagysebességű átvitelt fizikai szinten befo-



1. ábra Fényvezetősál tulajdonságai

lyásolják. Az 1. ábrán két csoportba osztva gyűjtöttük össze azokat a jelenségeket, amelyek valamilyen módon befolyásolják a fényimpulzus terjedését az optikai szálban.

2.1. Az átviteli közeg

A DWDM rendszer alapvető fontosságú eleme maga a fényvezetősál. Az ITU-T ajánlásaiban többféle egymódusú optikai szál szabványosított, amelyek alapvetően diszperziós tulajdonságaikban térnek el egymástól. A G.652 ajánlásában leírt egymódusú fényvezetősál kábelekből épült a távközlő hálózatok nagy része az elmúlt másfél évtizedben. Gyakran nevezik ezt a szálakat „sztenderd” egymódusú szálnak (SSMF). A SSMF 1310 nm-es hullámhosszra optimalizált, ami azt jelenti, hogy 0,3...0,5 dB/km csillapítású, a kromatikus diszperzió értéke pedig ebben a tartományban kellően alacsony, közel zérus.

Főleg nagytávolságú összeköttetésekben való alkalmazásra jelentek meg az eltolt diszperziójú szálak (G.653), melyek diszperziós tulajdonságai a kisebb csillapítású 1550 nm hullámhosszra optimalizáltak. Így a szálba juttatott nagyobb teljesítménnyel tovább lehetett növelni a szakasztávolságokat. Ez a szál típus azonban a nagysebességű DWDM átvitel szempontjából kifejezetten előnytelen. A kisebb módusmező átmérő miatt a nemlineáris jelenségek fokozottan jelentkeznek. Ezzel összefüggésben előnytelen az is, hogy az átviteli tartományban a kromatikus diszperzió nullává válik, a diszperziós együttható előjelet vált.

Később további, a szélessávú és nagysebességű DWDM átvitelhez jobban illeszkedő, kedvezőbb paraméterekkel rendelkező szál típusok jelentek és jelennek meg. Ezek közös jellemzője, hogy a diszperziós tulajdonságok az 1550 nm környezetére optimalizáltak, és relatíve nagy hatásos keresztmetszetük révén nagyobb teljesítményszinteket viselnek el a káros nemlineáris jelenségek előtérbe kerülése nélkül. Ezeknek a fényvezetőknek a tulajdonságait a G.655 ajánlás írja le. Az egyes szál típusokat gyártónként különféle fantázianevekkel különböztetik meg.

2.1.1. Lineáris tulajdonságok

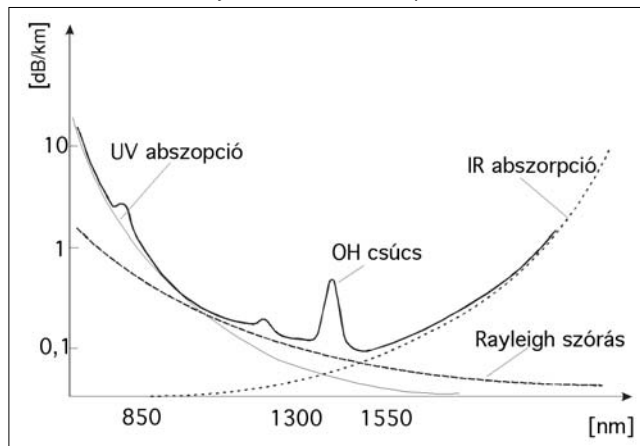
A fényvezetők legfontosabb átviteli jellemzői a hullámhossz függő csillapítás, a kromatikus és polarizációs módus diszperzió.

A szilícium alapú egymódusú szálak csillapítása három fő tényezőtől adódik: abszorpció, szóródási és hullámvezetési veszteségek (2. ábra).

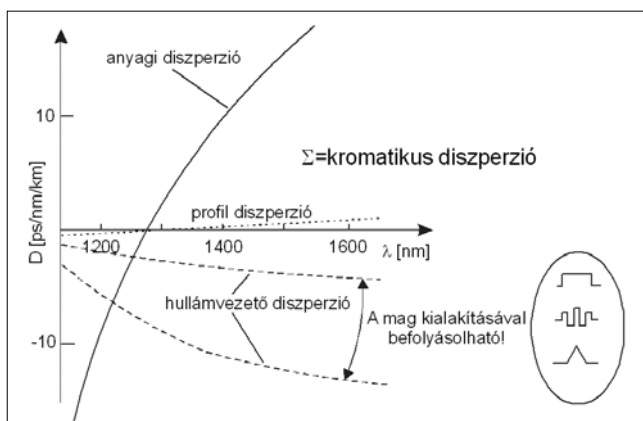
- Az abszorpció lehet intrinszcik jellegű, amit az UV tartományba eső elektronátmenetek és az IR tartományú fotonok okoznak; szennyezés keltette, amit az átmeneti fémek, H_2 és OH ionok rezgése okoznak; és végül az anyag homogenitás hibái okozta problémák.
- A szórás veszteségek java részét a Rayleigh-szórás okozza, mely a nem kristályos anyagok elválaszthatatlan anyagi jellemzője. Fényszóródás léphet fel még a makroszkopikus anyaghibákon, amilyenek a buborékok, repedések és egyéb inhomogenitások, illetve a mag-héj határfelület egyenetlenségein.
- Hullámvezetési veszteségeket okozhat a makrobanding (a hullámvezető görbületéből adódó veszteségek), valamint a mikrobanding (perturbáció okozta veszteségek).

A csillapítás mértéke alapvetően befolyásolja a jel-továbbítást, de optikai erősítők alkalmazásával a csillapítás probléma egyszerűen kiküszöbölhető.

2. ábra Fényvezetősál csillapításának összetevői

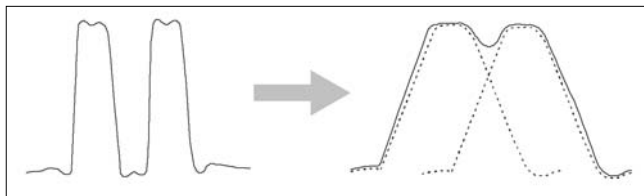


A fényimpulzus különböző hullámhosszúságú összetevői a szilíciumoxid törésmutatójának hullámhosszfüggése következtében eltérő sebességgel haladnak a fényvezetőszállban. A jelenséget *kromatikus diszperzió* (CD) nevezzük. A CD több hatás együtteseként keletkezik. Az egyes összetevők közül a hullámvezető diszperzió a fényvezető törésmutató profiljának kialakításával befolyásolható (3. ábra). Ez lehetőséget ad arra, hogy különböző diszperziós tulajdonsággal rendelkező fényvezetőket állítsanak elő.



3. ábra Kromatikus diszperzió

A kromatikus diszperzió miatt a szállba csatolt fényimpulzus egyes összetevői különböző időpillanatokban érkeznek meg a vétel helyére és az eredeti impulzus kiszélesedését okozzák (4. ábra).



4. ábra A kromatikus diszperzió hatása: impulzus kiszélesedés és átlapolódás

Ha a kiszélesedés mértéke olyan nagy, hogy az egymást követő impulzusok átlapolódnak, akkor az átvitelben bithibák lépnek fel. Minél nagyobb az átviteli sebesség, annál nagyobb mértékben befolyásolja az átvitel minőségét a kromatikus diszperzió, mert a bitidő csökkenése miatt egyre hamarabb következik be a

szomszédos impulzusok átlapolódása, és ugyanakkor a nagyobb modulációs frekvencia hatására az adólézer spektruma is jobban kiszélesedik. E két együttesen fellépő jelenségnek köszönhetően diszperzió-érzékenység közel négyzetesen növekszik a bitsebességgel. 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.

Az impulzus kiszélesedés mértéke függ az adó spektrális tulajdonságaitól. Egészen keskeny, néhány MHz spektrális tulajdonságú fényforrások alkalmazása jelent előnyt, bár más szempontból (például Brilluinszórás) éppen előnytelen. Az impulzus kiszélesedés mértékét (t_H), az alábbi képlettel számíthatjuk:

$$t_H = \delta\lambda * L * D,$$

ahol $\delta\lambda$ a fényforrás spektrumszélessége, L a szakasz hossz, és D a fényvezető kromatikus diszperziós együtthatója.

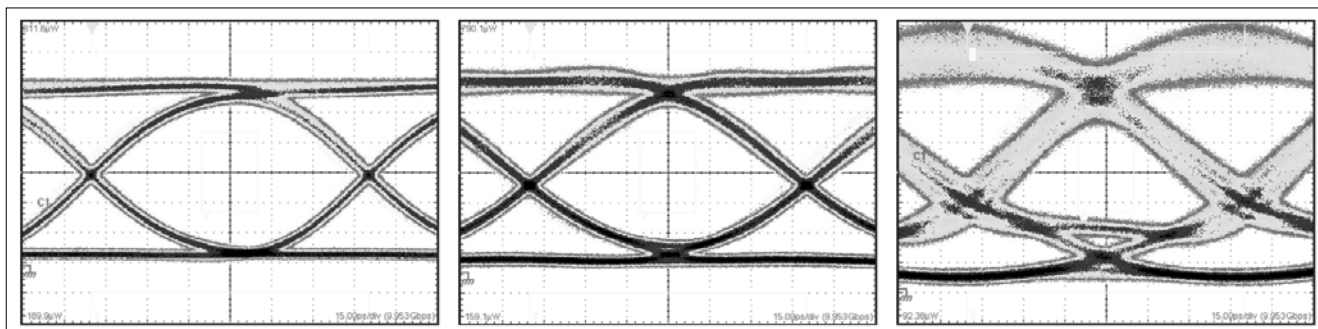
Az 5. ábrán egy G.652 fényvezető szálon terjedő STM-64 (10 Gbit/s) szintű jelalak látható 5, 50 és 100 km fényvezetőszáll közbeiktatása után. A vevő egy szabványos SDH referenciavevő. Jól megfigyelhető az impulzuskiszélesedés és az, hogy 100 km szállhossz mérésakor használt optikai erősítő miatt szemmel láthatóan megnövekedett a zaj.

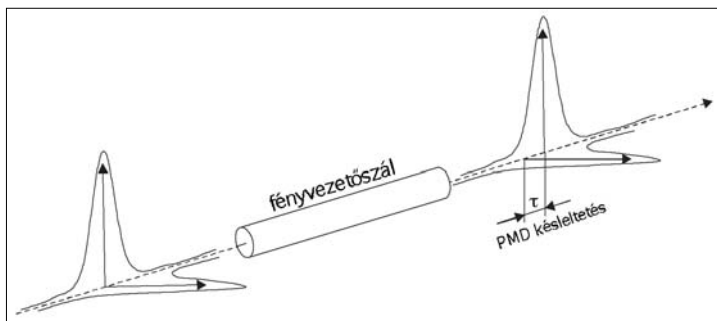
A fényvezetőszáll izotróp anyagának és körkeresztmetszetének ellenére enyhén kettőtörő tulajdonságú. A nem teljesen pontos köralak, a gyártás során keletkező felületi egyenetlenségek, és a telepítés során keletkező hossz- és keresztirányú erőhatások, a hosszirányú csavarodás és hajlítás okozzák a kettőtörő jellegét. A polarizációs módus diszperzió a fény HE_{11} alaplómódus két polarizációs komponensének eltérő fázisfutási idejéből fakad. A különböző polarizációs síkokhoz tartozó terjedési idők különbségét nevezzük *relatív csoportfutási időnek* (Differential Group Delay, DGD).

A polarizációs módus diszperzió a relatív csoportfutási időnek az effektív értéke. Ehhez az elsőrendű DGD-hez további magasabb fokú PMD hatások is társulnak: polarizáció függő kromatikus diszperzió, a fő polarizációs síkok elfordulása stb. A PMD káros hatása az átvitelre a kromatikus diszperzióhoz hasonlóan az átvitt impulzus kiszélesedésében és a kiszélesedés következtében fellépő impulzus átlapolódásban jelentkezik.

5. ábra

STM-64 jelalak torzulás a kromatikus diszperzió következtében 5, 50, és 100 km SSMF fényvezetőszáll után 1550 nm-en





6. ábra A PMD jelenség

A PMD értéke a kábelhossz négyzetgyökével arányos. Az egy rendszerre megengedhető polarizációs módus diszperzió értékét az átviteli rendszerre jellemző periódusidő 1/10 részében szokták megállapítani. Például egy 10 Gbit/s-os rendszerre 10 ps-os maximális értéket engedünk meg. Ha a kábelünk PMD együtthatója 0,5 ps/√km, akkor a leghosszabb megengedhető szakasz hossz (melyet a PMD hatása korlátoz) $L = (10/0,5)^2 = 400$ km.

A PMD hatását megfelelő technikákkal kompenzálni lehet. (Erre vonatkozó cikk jelen számban található.)

2.1.2. Nemlineáris jelenségek

A „hagyományos” optikai rendszerek kimeneti optikai teljesítménye csak ritka esetben lépi túl a +3...+5 dBm-es értéket. Az optikai erősítők alkalmazásával lehetővé vált nagyobb, akár +20 dBm-es (100 mW) kimeneti szintek alkalmazása is. Így az átviteli vonal mentén szakaszonként elhelyezett erősítőkkel nagy jelszint tartható, és a rendszer érzékenysége a vevőben keletkező zajjal szemben jelentősen csökken. A nagy teljesítményszint és a WDM rendszerben megnövekedett csatornaszám miatt azonban elhagyjuk azt a tartományt, ahol az optikai szál jó közelítéssel lineáris viselkedést mutat. A nemlineáris szál tulajdonságok abból fakadnak, hogy a magban fellépő óriási, 100 MW/m² nagyságrendű, teljesítménysűrűség miatt a fény az üveg-szállal kölcsönhatásba lép. Alapvetően kétfajta csoportba sorolhatjuk a fellépő nemlineáris jelenségeket.

Az első csoportba tartoznak a nagy térerősség okozta törésmutató változás miatt fellépő hatások:

- az önfázis-moduláció (Self Phase Modulation, SPM),
- a keresztfázis-moduláció (Cross Phase Modulation, XPM),
- a négy-hullám keverés (Four Wave Mixing, FWM).

A másik csoportba a szórás jelegű jelenségek tartoznak, úgymint

- a stimulált Brillouin-szórás (Stimulated Brillouin Scattering, SBS),
- a stimulált Raman-szórás (Stimulated Raman Scattering, SRS).

A törésmutató változás miatt fellépő hatások

A fénnyezetőszál törésmutatója, ha csak kis mértékben is, de függ a fény intenzitásától. A modulált fényjel

impulzusainak csúcsainál refrakciós indexváltozás jön létre (Kerr-effektus). Ennek mértéke:

$$n = n_0 + n_2 |E|^2,$$

ahol n a megváltozott törésmutató, n_0 a törésmutató eredeti értéke, n_2 a nemlineáris térerősségfüggő törésmutató együttható, E a térerősség. n_2 közelítő értéke $-2,2 \times 10^{-20}$ m²/W, gyakorlatilag független a szál típusától. A törésmutató-növekedés a gyakorlati élethez közelebb eső kifejezéssel:

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff}} P,$$

ahol P a szálba csatolt teljesítmény, A_{eff} a fénnyezető hatásos keresztmetszete.

A törésmutató változása fázismodulációt okoz, mely megváltoztatja a jel spektrumát. Az önfázis-moduláció, negatív kromatikus diszperzió esetén, a fényimpulzus kiszélesedést, pozitív diszperzió esetén összenyomódást okoz. Az önfázis-moduláció okozta spektrum kiszélesedés többcsatornás rendszerben interferenciát okozhat a szomszédos csatornákkal. A jelenség hatását csökkenti a nulla vagy alacsony pozitív értékű kromatikus diszperziós környezet. A nagy bitsebesség, a negatív diszperzió, a több egymásután kapcsolt szakasz tovább fokozza az SPM hatását. A jelenség hatása 10, 40 Gbit/s-os rendszerek esetén már 10 mW feletti teljesítmény szinteknél kimutatható. A fénnyezető szál szakaszok megfelelő diszperziós beállításával az SPM degradáló hatása többé-kevésbé jó kézben tartható 1000 km-nél nem hosszabb homogén optikai összeköttetések esetén.

A keresztfázis-modulációt az okozza, hogy törésmutató változást okoznak a WDM rendszer más hullámhosszán működő egyéb rendszerek jelei is, és emiatt nemkívánatos fáziscsatolások lépnek fel a vivőhullámok között. A keresztfázis-moduláció és az önfázis moduláció mindig együttesen van jelen. Az XPM hatása DWDM rendszereknél kis csatornatávolságok esetén természetesen fokozottan jelentkezik. Nagyobb optikai teljesítmények az adóspektrum kiszélesedését és a vett jelben időzítési zűrzavart okoznak. A spektrumkiszélesedés miatt hosszú vonalszakaszokon a kromatikus diszperzió jelenléte tovább rontja a helyzetet. Emiatt törekedni kell a szakaszok optimális kromatikus diszperziós beállításaira. A javasolt kompenzációs beállítások a következő empirikus képlettel számíthatók:

$$D_{PRE} = \frac{-D_{SMF}}{\alpha} \ln \left[\frac{2}{1 + e^{-\alpha L}} \right],$$

ahol D_{PRE} a javasolt kompenzációs mérték, α a szál kilométerenkénti csillapítása, D_{SMF} a diszperzió, L a szakasz hossza. A gyakorlati rendszerek esetén a kompenzációs mértéke -200 ps/nm értékre adódik, ami a szakasz túlkompenzálását jelenti. Általában el lehet mondani, hogy 100 GHz vagy annál nagyobb csatornatávolságok, és nem nagyobb, mint 5 mW szálba csatolt teljesítmény mellett az XPM hatása nem jelentős.

A WDM rendszerekben a legveszélyesebb nemlineáris jelenség a négy-hullámkeverés. A kritikus teljesítményt meghaladva a nem kívánt fáziscsatolások miatt keveredési termékek jelennek meg, amelyek hullámhosszai egyenletes csatornaosztás esetén üzemi hullámhosszokra esnek. A keletkező termékek ω_1 és ω_2 hullámhossz esetén: $2\omega_1 - \omega_2$ és $2\omega_2 - \omega_1$. A keletkező „szellem” hullámhosszak száma (n_λ) egy N csatornás rendszerben:

$$n_\lambda = N^2 \left(\frac{N-1}{2} \right),$$

ahol N a rendszerben alkalmazott hullámhosszak száma. Például egy 32 csatornás DWDM rendszer esetén több mint 15 ezer (!) keveredési termék jelenik meg. A négy-hullámkeverés azon a hullámhosszon és annak közvetlen közelében, ahol a kromatikus diszperzió értéke zérus, már 10 km szálhosszon is kialakul. Emiatt az FWM különösen az alacsony effektív keresztmetszetű, eltolt diszperziójú G.653 szálak esetén kritikus. Itt a nemkívánatos hatást csak gondosan megválasztott, nem egyenletes csatornaosztás alkalmazásával lehet csökkenteni. A keveredési termékek – számításba véve az optikai erősítők által termelt zajból is keletkező termékeket – az adott csatornában zajként jelentkeznek, a szemábra beszűkülését eredményezik, és végül soron rontják a rendszer hibaarányát.

A szórás jelegű jelenségek hatásai

A stimulált Brillouin-szórás (SBS) arra vezethető vissza, hogy a fény a szál anyagának sűrűségi hullámai-val makroszkópikus kölcsönhatásba lép (akusztikus foton). A Brillouin-szórás miatt a szálba 1550 nm-en be-

csatolt teljesítmény egy része 11 GHz-el eltolt frekvencián reflektálódik. Így különösen káros extrém alacsony csatornaosztás alkalmazása esetén. A visszaszórás nagysága független a rendszerben alkalmazott csatornák számától, de rendkívül erősen limitálja a szálba csatolható teljesítményt, különösen kis spektrumszélességű adók esetén. Azt a teljesítményszintet, amely legfeljebb 1 dB optikai jel/zaj viszony romlást okoz, a következő képlettel számíthatjuk:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B},$$

ahol P_{th} a küszöbtejesítmény, g a Brillouin-erősítéssel kapcsolatos állandó ($\sim 4 \times 10^{-9}$ cm/W), A_{eff} a fényvezetőszál hatáskeresztmetszete, a K állandó a szál polarizációs állapotainak szabadsági foka (G.652 szál esetén $K=2$), $\Delta\nu_B$ és $\Delta\nu_p$ reprezentálja a Brillouin-sáv szélességet és a gerjesztő fény spektrális szélességét.

Az L_{eff} hatásos szálhossz a következő képlettel számítható:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha},$$

ahol α a hosszegységenkénti szálcsillapítás és L a szálhossz. A Brillouin-sáv szélességnél kisebb spektrális szélességű források $\frac{\Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \ll 1$ esetén a kritikus teljesítmény a következőképpen számítható:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}}.$$

Az SBS jelenség a gyakorlatban már 80 mW (+19 dBm) körüli teljesítményszinteken jelentkezik.

1. táblázat Nemlineáris jelenségek összefoglalása

Zavaró hatás	Keletkezés oka	Kritikus csatornánkénti teljesítmény	Hatás	Kompenzáció
Csillapítás/zaj	Anyagi abszorpció és áramkört elemek	Nem függ a teljesítménytől	Csökken a teljesítmény, BER	Rövidebb szakasz, kisebb csillapítású optikai szál
CD	Hullámhosszfűggő csoport futási sebesség	Nem függ a teljesítménytől	Csökken a teljesítmény, BER, spektrum szélesség növekedés	Ellentétes előjelű diszperzió beiktatása
PMD	Törésmutató véletlenszerű változása	Nem függ a teljesítménytől	Csökken a teljesítmény, BER, jelalak torzulás	Optikai vagy elektromos PMD-kompenzálás
FWM	Jel interferencia	10 mW	Oldalsávok keletkezése, BER	Precíz CD beállítás, szabálytalan csatornaosztás
SPM/XPM	Intenzitásfüggő törésmutató	10 mW	Spektrális kiszélesedés, BER, csatorna áthallás,	Precíz CD beállítás
SRS	Fotonok és a szálmolekulák kölcsönhatása	1 mW	Teljesítménycsökkenés, OSNR, áthallás, BER	Átgondolt teljesítményszint-tervezés
SBS	Fotonok és a szál sűrűség-hullámainak kölcsönhatása	5 mW	Teljesítmény- és OSNR-csökkenés, jel instabilitás, áthallás, BER	Nagyobb spektrumszélességű forrás

Hatását a vivőhullámon alkalmazott néhány százalékos alacsonyfrekvenciás (30...100 kHz) amplitúdómodulációval lehet csökkenteni.

A stimulált Raman-szórás a fény és a szál SiO_2 molekulái közötti kölcsönhatásként keletkezik, a szomszédos atommagok egymáshoz képesti nagyfrekvenciás vibrációját, rezgéseit jelenti (optikai foton). A gerjesztett sugárzás a normál fényterjedéssel egyező irányú, és hullámhossza tipikusan 100 nm-el eltolt az alacsonyabb hullámhosszak felé. A gerjesztett sugárzás 50...60 nm spektrumszélességű.

Az 1. táblázatban összefoglalóan megadjuk az előbbieken tárgyalt optikai jellemzőket, fizikai jelenségeket, azok hatását a digitális átvitelre, és a hatások kiküszöbölésének vagy csökkentésének módját.

3. A Q-faktor és mérési módszerei

Digitális intenzitásmodulált optikai átviteli rendszerekben két lehetséges jelszint reprezentálja az információt. A valószínűségi rendszerekben a két jelszinthez különböző átlagos zajérték adódik hozzá. Ez azt jelenti, hogy a két jelszinthez különböző elektromos jel/zaj viszony értékek rendelhetők. Amikor az átvitel bithibáinak bekövetkezési valószínűségét szeretnénk meghatározni, kétfajta jel/zaj viszonyra kell számolnunk.

A két jel/zaj viszony érték egyetlen átviteli minőségre utaló minőségi jellemzőbe vonható össze, ez a Q-faktor. A Q-faktor elektromos jel/zaj viszonyként értelmezhető az optikai vevő döntőáramkörének bemeneti pontján. A Q-faktor és az optikai jel/zaj viszony egyértelműen csak abban az esetben rendelhető össze, ha csak az optikai erősítők ASE zajtermelését vesszük figyelembe. A valószínűségi – ahogy korábban láttuk – még számos hatás befolyásolja az optikai jel minőségét, így a Q-faktor és az optikai jel/zaj viszony csak bizonyos hibával számítható át egymásba.

A BER és a szemábra nyitottság kapcsolata meghatározásához az amplitúdó zaj statisztikus meghatározása szükséges. Ha nincs jelen szimbólumközi átlapolódás (Inter Symbol Interference, ISI), a zaj statisztikailag független a jel-tartalomtól, és a domináns amplitúdó zaj

Gauss-eloszlású, a Q-faktor az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$Q = \frac{(\mu_1 - \mu_0)}{(\sigma_1 + \sigma_0)},$$

ahol μ_1 és μ_0 reprezentálja az amplitúdó függvény alacsony és magas átlagszintjeit, a σ_1 és σ_0 reprezentálja a Gauss-eloszlású fehérzaj szórás értékeit (7. ábra).

Az előfordulási valószínűség görbéket megvizsgálva láthatjuk, hogy két lehetőség van hibás döntés előfordulására; „0” detektálása „1” helyett illetve fordítva. „1” detektálása „0” helyett. A bithibaarány arányos a döntési küszöbön túlnyúló ellenkező logikai szinthez tartozó görbe alatti területtel (lásd a 7. ábrán szürkével jelölt területet).

A döntési küszöb akkor van az optimális helyen (azaz legkevesebb a hibás döntések előfordulása), ha a jobb és a bal oldalán a másik logikai szinthez tartozó görbealatti területek összege minimális. Ez az érték csak akkor van a két haranggörbe metszéspontjában, ha azok teljesen egyformák. Valóságos rendszereknél mindig eltérő a két logikai szinthez tartozó haranggörbe.

Az optimális döntési szint a következő helyen van:

$$\mu = \frac{\sigma_0 \mu_1 + \sigma_1 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}.$$

A szemábrából látható, hogy a logikai szintek előfordulási valószínűsége a detektálás helyétől is függ. A szemábra szélességet 2π -nek tekintve az optimális mintavételezési fázis a $\varphi = \pi$ helyen van. A BER érték és a Q-faktor közötti összefüggés:

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2}\sigma_1} \right),$$

ahol az erfc az x-től a ∞ -ig integrált kiegészítő hiba-függvény, μ a döntési küszöbszint. Az ITU az erfc függvény közelítésére az alábbi képletet ajánlja:

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \times \left[2 \times e^{-\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \frac{a_0 + a_1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + a_2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[b_0 + b_1 \times \frac{Q}{\sqrt{2}} + b_2 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_3 \times \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^3 \right] \times \sqrt{\sigma}} \right]$$

ahol

$$a_0 = 1.69071595$$

$$a_1 = 1.45117156$$

$$a_2 = 0.50003230$$

$$b_0 = 1.90764542$$

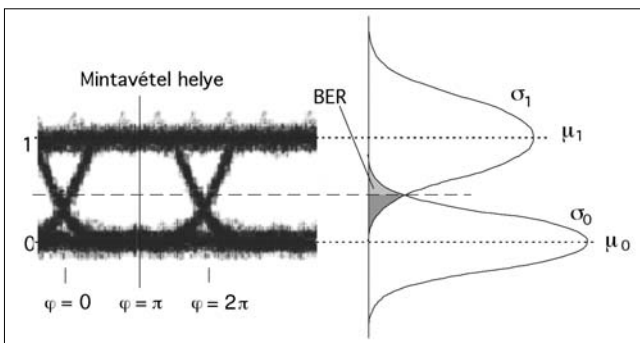
$$b_1 = 3.79485940$$

$$b_2 = 2.90845448$$

$$b_3 = 1.00000000$$

7. ábra

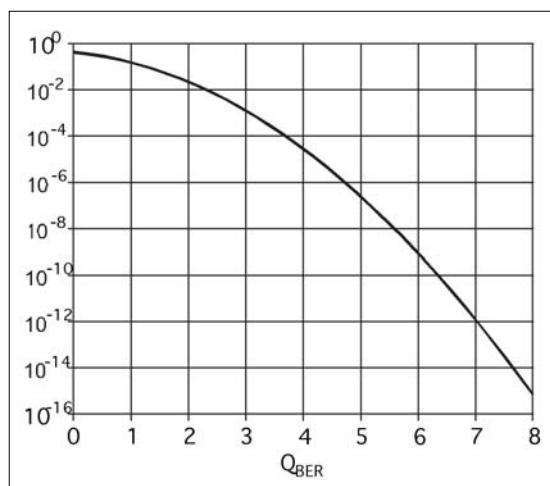
Zajeloszlás, logikai 1-ek és 0-ák átlagértéke és szórása



A közelítés $Q > 1,5$ értékeknél jó pontosságot ad, és egyszerűen programozható (lásd a 8. ábrát a következő oldalon).

A Q-faktor meghatározására többféle ismert módszer áll rendelkezésre. Az úgynevezett „szinkron kétküszöbös” módszer talán az egyik legelőnyösebb eljárás. A 9. ábra szerinti elrendezésben a jelet két részre osztva, két különböző döntő áramkörre juttatják.

Az egyik döntő áramkör döntési szintje az optimális értékre van beállítva és fix, a másik döntő áramkör küszöbszintje változtatható. A mindenkor bitsebességnek



8. ábra

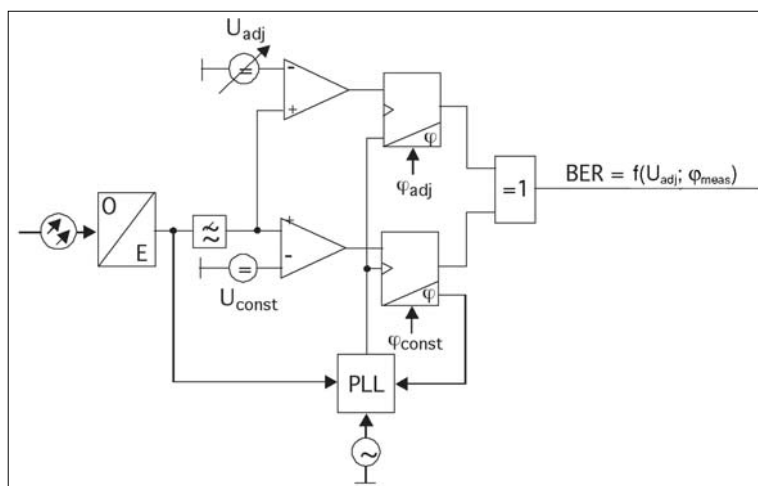
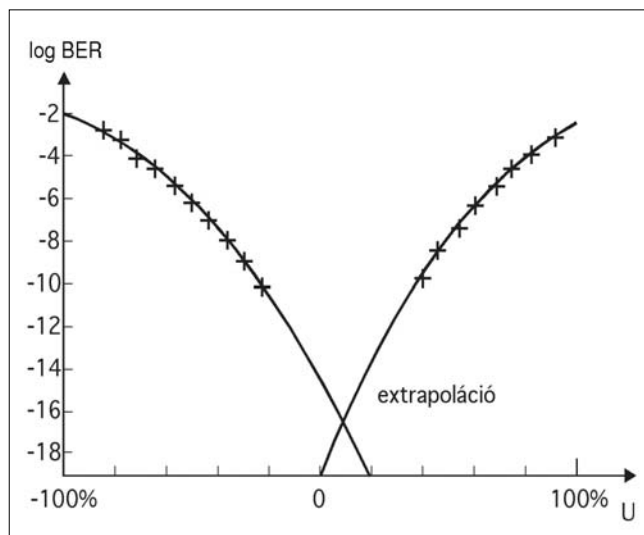
Q-faktor és BER közötti összefüggés

megfelelő órajelet, amellyel a döntőáramkörök optimális döntési pozíciója beállítható egy PLL áramkör szolgáltatója (9. ábra).

A két komparátor ág döntési eredményeit összehasonlítva (EXOR, kizáró vagy) a BER értékre lehet következtetni. Az eredményt a 10. ábrán látható diagramban ábrázolják. A függőleges tengelyen a hibaarány szerepel, a vízszintes tengelyen a döntési szintek vannak feltüntetve. A módszerrel 10^{-4} és 10^{-8} közötti hibaarányok mérhetők megfelelő pontossággal. A diagramból regressziós függvény alkalmazásával nagyon jól lehet extrapolálni a kisebb BER értékekre.

A módszerrel indirekt módon, a Q-faktor kiszámításával lehetővé válik az átviteli rendszer BER értékének közelítő meghatározása, függetlenül az átvitt protokolltól és bittartalomtól. Nagymértékű impulzus-átlapolódás (ISI), és nem Gaussi-zaj eloszlás esetén mérési hibával kell számolni, a regressziós egyenesek alkalmazásakor nagyobb gondossággal kell eljárni. Hasznos lehet digitális oszcilloszkópon a szemábrát megjelenítve ellenőrizni az esetleges jelközi átlapolódásokat, a zajeloszlást.

10. ábra Mérési eredmény és extrapoláció



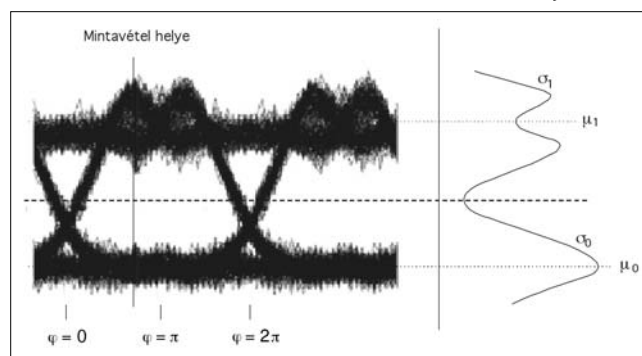
9. ábra Szinkron kétküszöbös módszer Q-faktor méréséhez

Például a nem Gauss-jellegű zaj esetén (11-12. ábra) regressziós egyenes illesztését csak 10^{-8} hibaarány alatti tartományra szabad elvégezni.

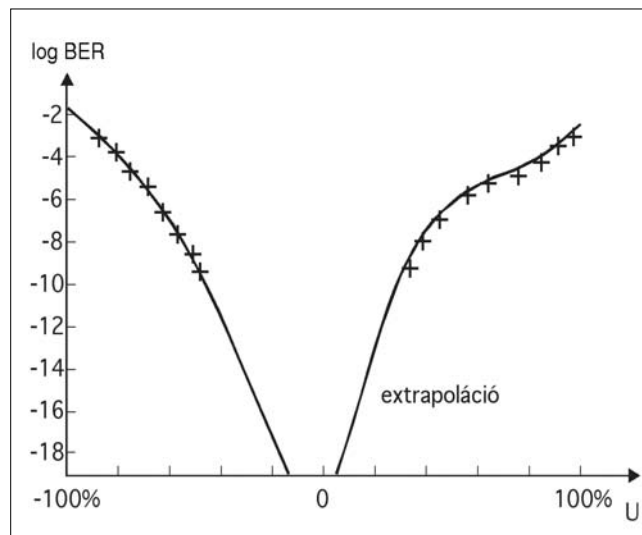
3.1. A Q-faktor mérés alkalmazási lehetőségei

A Q-faktor módszer természetesen a vevőben keletkező hibák jelzésére nem alkalmas. Kiválóan jelzi viszont az optikai adó különböző degradációit, nagyon

11. ábra Nem Gaussi zajeloszlás



12. ábra Torzult Q-görbék nem Gaussi-zajeloszlás esetén



jól ellenőrizhető segítségével a nagysebességű rendszereknél nagyon fontos kromatikus diszperzió kompenzálás helyes beállítása, az optikai erősítők esetleges zajnövekedése, nagyobb csatornaszámnál, illetve magasabb optikai szintnél jelentkező nemlineáris hatások. Nem NRZ vagy RZ kódolás és nem intenzitás moduláció esetén a Q-faktor mérése és értékelése további megfontolásokat igényel [6].

Átviteli rendszerek telepítése után alapvető szempont a megfelelő teljesítőképesség ellenőrzések elvégzése. A mérések egyik legfontosabbika a hibaarány vizsgálat. A követelmények szerint 10^{-12} ... 10^{-13} nagyságrendű hibaarányt várunk el a rendszerektől.

A hibaarány mérések elvégzése meglehetősen hosszadalmas. Például egy 10 Gbit/s-os rendszernél egy 10^{-13} hibaarány statisztikailag korrekt megméréséhez legalább 28 óra szükséges. Elképzelhető, hogy egy DWDM rendszerben több párhuzamos csatorna esetén egy üzembehelyezéskor milyen hosszú vizsgálati időtartamok szükségesek. A Q-faktor mérés ebben az esetben az optikai jel néhány perces vizsgálatával jó közelítéssel szolgáltatja a rendszer hibaarányát. Problémás esetben a Q-mérés segítségével, a nagyon gyors mérési lehetőségnek köszönhetően, egyszerűen szeparálhatók a hibásan működő hálózatrészek vagy komponensek.

A Q-faktor mérések elvégzése nem helyettesíti teljesen a rendszer teljesítőképesség tekintetében a hibaaránymérő műszerekkel végzett BER méréseket. Segít azonban abban, hogy a hosszúidejű vizsgálatokra csak akkor kerüljön sor, amikor a Q-faktor vizsgálatok szerint a rendszer hibátlan. Ezzel sok idő és bosszúság takarítható meg.

Nem utolsósorban a rendkívül költséges 10...40 Gbit/s-os hibaaránymérők számát csökkenteni lehet a néhány mérsékelt árú Q-faktor mérésre alkalmas műszer beszerzésével.

A 13. és 14. ábrán egy magyarországi 420 km hosszúságú DWDM vonalszakasz mérési eredménye látható. A 13. ábra tanulsága szerint a BER értéke 2×10^{-5} értékű. A vonalszakasz több pontján mérve Q-faktort azonosítható volt, hogy a vonalszakasz elején lévő lézertadó nem működik megfelelően, melynek cseréje után a Q-faktor és BER jelentősen javult (14. ábra – lásd a következő oldalon).

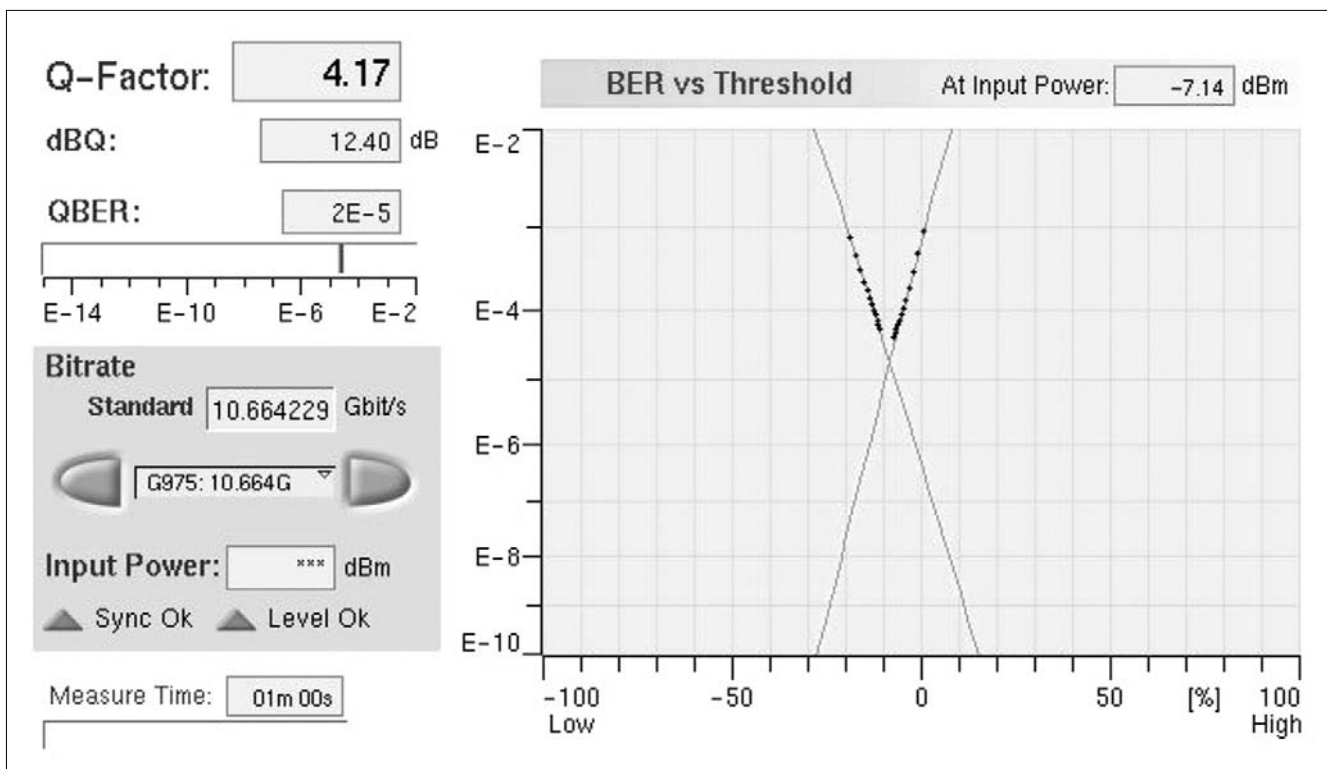
A Q-faktor mérés másik érdekes alkalmazási lehetősége az optikai rendszerek diszperzió kompenzálási és szintbeállítási kérdéseinek optimalizálása. A Q-faktor mérés lehetőséget teremt a kompenzálási, szintbeállítási paraméterek változtatása utáni gyors ellenőrzésekre, lehetővé téve az optikai jel szempontjából ideálisnak tekinthető beállítások elvégzését.

Q-faktor mérési technika nagy előnye, hogy a működő rendszer mérőpontjaira csatlakoztatva üzem közbeni monitorozás is megvalósítható. Ez a lehetőség hatékonyabbá teheti a hibakeresési, fenntartási tevékenységet. Az üzem közbeni vizsgálatok, monitorozás, nagyon hasznos lehet egy-egy fenntartási tevékenység nyomon követésére vagy egy SLA panasz jogosságának vizsgálatára.

4. Összefoglalás

A nagysebességű több hullámhosszas optikai rendszerek minőségét a hálózat fizikai rétege alapvetően

13. ábra
Hibás STM-64 vonalszakasz Q-faktor mérési eredménye



befolyásolja. A fizikai rétegben lényegében analóg jel-továbbítás történik. A nagysebességű DWDM hálózat tervezése, méretezése során több olyan paramétert kell figyelembe venni, amelyek eddig kevésbé voltak fontosak. Jellemzően a fényvezetők nemlineáris tulajdonságai, az optikai erősítők zaja, a rendszer pontos színtézése, a diszperzió kompenzálás ezek a paraméterek.

A rendszerek teljesítőképessége szempontjából a fizikai szint tökéletes, összehangolt működése rendkívül fontos. A 10...40 Gbit/s-os rendszerek tervezési-üzemeltetési szempontból új kihívásokat jelentenek.

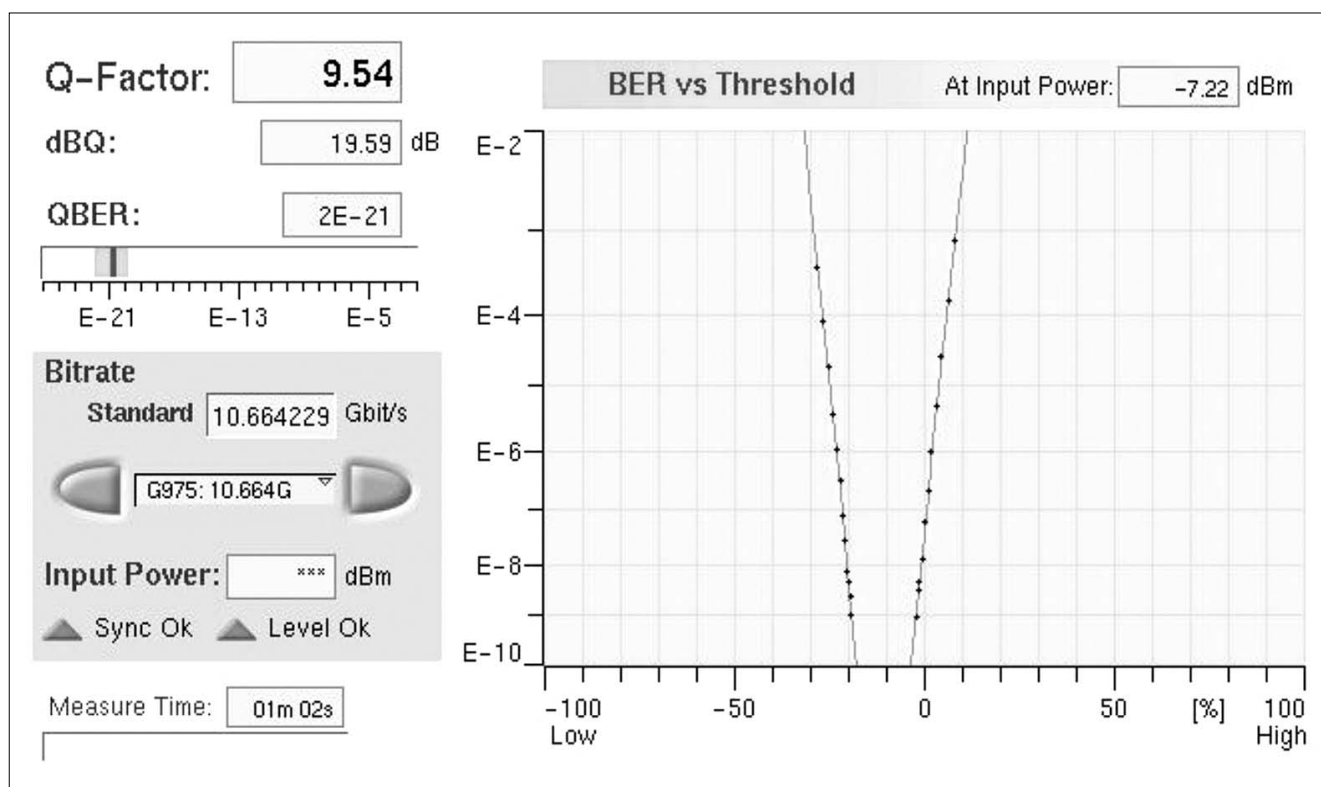
A Q-faktor mérési módszer jól szolgálja a fizikai szint üzemeltetési, fenntartási munkáit. A vizsgálatokkal nyert tapasztalatok visszacsatolása a tervezési folyamatba előnyösen befolyásolhatja, segítheti a tervezési munka pontosságát. A rendszerek tervezésének, optimalizálásának nem utolsó sorban gazdasági kihatásai is vannak: az átvitel minősége kézben tartható, nem lesz a hálózat feleslegesen túlméretezett, minimalizálni lehet például az optikai erősítők számát, beruházás megtakarítás érhető el.

Irodalom

- [1] Ines Brunn,
Dense Division Multiplexing, Pocket Guide,
Acterna Eningen GmbH.
- [2] Vitus Zeller,
Q-factors basics, Pocket Guide,
Acterna Eningen GmbH.
- [3] Jan-Pierre Laude,
DWDM fundamentals, components and applications;
Artech House Inc., 2002.
- [4] Hanik, N.,
Netze mit optischem Frequenzmultiplex,
Der Fernmelder Ingenieur, 1997.06.
- [5] Jeszenői P.,
DWDM rendszerek alkalmazhatósága
meglévő optikai hálózaton;
Előadások gyűjteménye,
13. Távközlési és informatikai hálózatok kiállítás és
szeminárium.
- [6] G. Bosco, P. Poggiolini,
On the Accuracy of the Q-parameter to Assess BER in
the Numerical Simulation of Optical DPSK Systems;
ECOC 2003 Proceedings.
- [7] Maxim IC,
Optical Receiver Performance Evaluation;
Application Note HFAN-03.0.2 (Rev. 0, 03/03).
- [8] Marcuse D., Chraplyvy A.R., Tkach R.W.,
Dependence of cross-phase modulation
on channel number in fiber WDM systems,
IEEE Journal of Lightwave Technology,
Volume 12, Nr. 5, p.885, May 1994.
- [9] ITU-T Rec. O.201:
Q-factor test equipment to estimate the transmission
performance of optical channels.

14. ábra

Q-faktor mérési eredmény a 13. ábra vonalszakaszáról hibajavítás után



Polarizációs Módus Diszperzió és kompenzáciási lehetőségei WDM hálózatokban

ZSIGMOND SZILÁRD

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
zsigmond@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: Polarizációs Módus Diszperzió, PMD kompenzáció

Az optikai adatátvitel utóbbi évek történő bitsebességei növekedése miatt újabb fizikai hatások kerültek előtérbe. Ezen fizikai hatások közül az egyik legjelentősebb a Polarizációs Módus Diszperzió (PMD). Míg 2,5 Gbit/s bitsebesség mellett a PMD jelelőhatások gyakorolt hatásai elhanyagolhatóak, addig a 10, 40 Gbit/s-nál vagy ennél nagyobb bitsebességeknél, a PMD a fő korlátozó tényezője az optikai adatátvitelnek. E probléma áthidalására a különböző PMD kompenzáló rendszerek lettek kifejlesztve, amelyek alkalmazása elengedhetetlen az említett bitsebességű hálózatok esetében. További megoldási lehetőség, más az NRZ (non return-to-zero) formától eltérő, a PMD hatásaira kevésbé érzékeny modulációs formák alkalmazása.

1. Bevezetés

A közelmúltban megjelent új generációs szolgáltatások sávszélesség igénye igen komoly problémák elé állította a távközlési szolgáltatókat. A megnövekedett bitsebesség kielégítésének egy lehetséges megoldása az egyes WDM csatornák bitsebességének a növelése 2,5-ről 10, majd 40 Gbit/s-ra. A megnövekedett bitsebesség következtében azonban a fény terjedését az optikai szálba olyan újabb fizikai hatások korlátozzák, mint például a polarizációfüggő jelenségek, amelyek az alacsonyabb bitsebességeken, 2,5 Gbit/s-nál elhanyagolhatóak voltak.

A polarizációs hatások a fény elektromágneses hullám mivoltából fakadó jelenségek. Definíció szerint a fény polarizációs vektora az elektromos térerősség vektor. A polarizációs vektor iránya kihatással van a fény terjedésére. Ezen hatások közül a legjelentősebb a Polarizációs Módus Diszperzió (PMD), illetve a Polarizáció Függő Csillapítás (PDL).

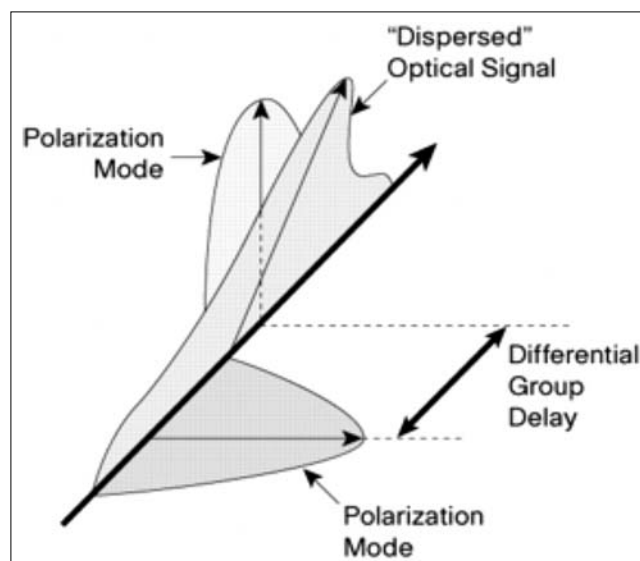
A PMD optikai szálakban történő kialakulása két okra vezethető vissza: az optikai szál gyártási hibáira, illetve környezeti hatásokra. Egy ideális optikai szálban, a szál magjának keresztmetszete tökéletesen kör alakú, ez viszont a gyártási pontatlanságok miatt nem kivitelezhető. Régebbi szálaknál a PMD koefficiens értéke 0,5 ps/√km is elérte. Az újabb szálaknál a gyártási technológia fejlődésének, a pontosabb geometriának köszönhetően a PMD koefficiens értéke kisebb, mint 0,1 ps/√km. A másik ok, a környezeti hatások. Ilyen hatások a hőmérsékletfüggés, vagy a kábel szerelése közben a szálba keletkező mechanikai feszültségek.

A PMD létrejöttének oka az, hogy a fény optikai szálban való terjedési sebessége függ a fény polarizációs irányától (1. ábra). Ideális esetben, ha tökéletes kör keresztmetszetű szálát feltételezünk és a környezeti hatásoktól eltekintünk, a polarizációs vektor két ortogonális felbontása azonos sebességgel halad. Az adó által kibocsátott optikai jel, polarizációs irányától füg-

getlenül, mindig felbontható két ortogonális irányra, melyek ezek után egymástól függetlenül, azonos sebességgel haladnak. Tehát ebben az ideális esetben polarizációs diszperzió nem lép fel. Valóságos optikai szálakban az előzőekben említett okok miatt a két ortogonális irány sebessége különbözni fog, ezáltal a szálba csatolt optikai jel szétválik két polarizációs irányra. A hibák véletlenszerűen előfordulása miatt a jel szétválása a „bolyongás, (random walking)” néven ismert sztochasztikus folyamattal írható le [1].

Ennek következtében létezik egy átlagos polarizációfüggő impulzusszétválási idő, amely az optikai szál hosszának négyzetgyökével arányos. Levonhatjuk a következtetést, hogy a PMD nem más, mint a fényvezető szálban terjedő fényhullámok módusai közötti időeltérés. A két módus között időeltolódás egy hullámhosszra vonatkoztatott az időeltolódás nagyságát fejezi ki a DGD (Differential Group Delay). A PMD a DGD átlaga az összes hullámhosszra vonatkoztatva. Értéke

1. ábra A PMD hatása az optikai szálakban terjedő jelekre



nagymértékben függ az alkalmazott bitsebességektől, modulációs formától, az optikai szál hosszától illetve az alkalmazott optikai szál PMD koefficiensétől.

A PMD akkor válik kritikussá, ha a fényvezető szál-on terjedő két polarizációs módus közötti időeltérés, $\Delta\tau_{\text{PMD}}$, nagyobb, mint az átvitt jel bitidejének egytizede. Egy L hosszúságú, D_{PMD} fajlagos diszperziójú optikai szakaszon a PMD $\Delta\tau_{\text{PMD}} = D_{\text{PMD}} \sqrt{L}$ időértékkel tolja el egymáshoz képest a terjedési módusokat. A standard optikai szálaknál $D_{\text{PMD}} = 0.4 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ az átlagos érték. 10 Gbit/s sebességű átvitel esetén, a bitidő egy tizede 10 ps, ebből a fenti megkötés alkalmazásával a maximálisan áthidalható távolságra 625 km adódik.

Bitsebesség [G/s]	PMD koefficiens [ps/km ^{1/2}]			
	1	0.5	0.25	0.1
2.5	2690	10606	40111	18144
10	168	661	2500	11309
40	10	40	149	676
80	2	8	32	144
160	0	1	3	11

1. táblázat

Áthidalható maximális távolság km-ben a bitsebesség és a PMD koefficiens függvényében

Az 1. táblázatban az áthidalható maximális távolságot tüntettük fel a bitsebesség és a PMD koefficiens függvényében. Jól látható, hogy bitsebesség növelésével nagymértékben változik az áthidalható maximális távolság. A példában szereplő optikai szál esetén, 40 Gbit/s sebességnél azonban már csak $625/16 = 39 \text{ km}$ ez a távolság, ezért ekkor már a PMD kompenzálására van szükség.

2. PMD modellezése

A PMD egy sztochasztikus valószínűségi folyamat, ennek köszönhető, hogy PMD hatásai is egy véletlen ingadozást mutatnak. Annak érdekében, hogy megfelelő kompenzálási technikákat tudjunk választani, meg kell értenünk a PMD jellemzőit.

2.1. Főtengely (PSP) modell

A PSP (Principal States of Polarization) modell azon alapszik, hogy az egymódusú optikai szálaknak léteznek egymásra merőleges főpolarizációs irányai. Ezek az irányok a következő tulajdonságokkal rendelkeznek. Ha egy jel polarizációs iránya egybeesik az optikai szál egyik főtengely irányával, akkor a jel szál-on való áthaladása során a jel alakja nem változik. A főtengelyek további tulajdonsága az, hogy a szál végén a jel polarizációs iránya meg fog egyezni a szál kimeneti főpolarizációs irányával. Abban az esetben, ha a bemenő jel polarizációs iránya nem esik egybe egyik főpolarizációs irányval sem, akkor a jel szétválk két egymásra merőleges polarizációs irányú jelre. A terjedési sebesség polarizációfüggése miatt a két polarizációs irány eltérő idő alatt fog áthaladni az optikai szál-on. A PSP modellt al-

kalmazva a PMD az (1) képletben bevezetett vektorral jellemezhető, ahol a PMD vektor egy háromdimenziós vektor, nagysága $\Delta\tau$, ami megegyezik a polarizációs irányok közötti időeltolódással, a DGD-vel, iránya pedig $\vec{p}$, amely egy egységvektor a PSP vektorok által kifeszített Stokes-térben:

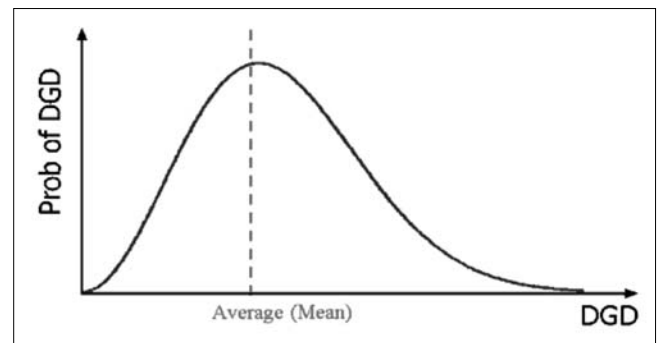
$$\vec{\tau} = \Delta\tau * \vec{p} \quad (1)$$

Ezek alapján bármilyen polarizációs irányú jel kifejezhető a két PSP lineáris kombinációjaként.

2.2. PMD statisztikája

A PSP modellből kiindulva lehetőség nyílik a PMD statisztikus viselkedésére következtetni. A DGD valószínűségi sűrűségfüggvénye időtartományban Maxwell eloszlást követi (2. ábra).

2. ábra DGD valószínűségi sűrűségfüggvénye



2.3. PMD frekvenciafüggése

Fontos kérdés a PMD frekvenciafüggése. A PMD vektort ($\vec{\tau}(\omega)$) Taylor-sorba fejthetjük hullámhossz szerint – (2) képlet –, ahol $\vec{\tau}_0$ az elsőrendű PMD-t jelenti, míg az egyes deriváltak a magasabb rendű PMD-et jelentik:

$$\vec{\tau}(\omega) = \vec{\tau}_0 + \vec{\tau}'_0 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \vec{\tau}''_0 (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2)$$

A másodrendű PMD (3) képlet szerint alakul az (1) felhasználásával:

$$\vec{\tau}'_0(\omega) = \frac{d\vec{\tau}(\omega)}{d\omega} = \frac{d\Delta\tau}{d\omega} \vec{p} + \Delta\tau \frac{d\vec{p}}{d\omega} = \Delta\tau_\omega \vec{p} + \Delta\vec{\tau}_\omega \quad (3)$$

A (4) képletnek fizikai értelme az, hogy a másodrendű PMD két tag összegeként fogható fel. Az első tag a polarizációfüggő kromatikus diszperzió (PCD), a második tag a PSP-k elfordulását a reprezentálja a frekvencia függvényében. A $\Delta\tau_\omega$ a DGD frekvenciafüggését jelenti, míg a $|\vec{p}_\omega|$, a PMD vektor szögelfordulását jelenti. Mértékegységek a PCD esetében ps/nm, illetve ps a PSP-k frekvenciafüggése esetében.

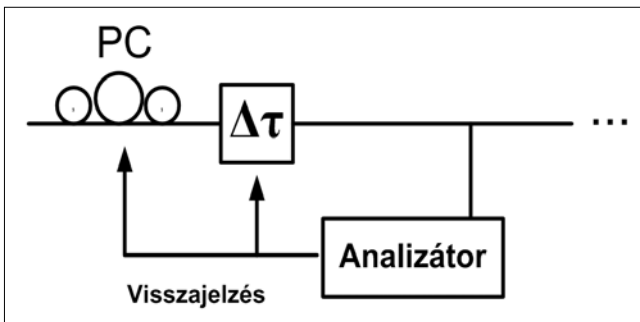
3. PMD hatásának csökkentési lehetőségei

A növekvő bitsebességeknek következtében a PMD egyre inkább az optikai adatátvitel legfontosabb korlátozó tényezőjévé válik. Annak ellenére, hogy egyre jobb

minőségű optikai szálak kerülnek piacra, egyre kisebb PMD koefficiens értékekkel, a 10 Gbit/s sebesség felett a PMD hatását közömbösíteni kell. Erre több módszert is kidolgoztak.

Egyik lehetséges megoldás az NRZ (non return-to-zero) modulációs formától eltérő más modulációs formák alkalmazása. Az utóbbi években intenzív kutatási eredményeinek köszönhetően, különböző modulációs formákat vizsgáltak. A diszperziós hatásokkal szemben az RZ (return-to-zero) kódolás sokkal ellenállóbb, mint az NRZ modulációk. Az RZ modulációs formák mellett más modulációs formákat is meg kell említeni, mint például a csörpölt RZ (CRZ), klasszikus szolitonok, vagy a diszperzió-szabályzott szolitonok (DMS), amelyek a PMD hatásaival szemben ellenállóbbak. A megfelelő modulációs forma megválasztása mellett, igen jelentős eredményeket lehet elérni hibajavító kódolások alkalmazásával is.

Az előbb említett eljárások mellett különböző PMD kompenzáló rendszereket is kidolgoztak. Ezek vagy az optikai tartományban, vagy az optikai vevőben, elektronikus eszközökkel fejtik ki jelalak korrigáló szerepüket. Továbbiakban a PMD kompenzációs technikák ismertetésével foglalkozunk.



3. ábra Az optikai PMD kompenzáló rendszer blokkismélete

3.1. Optikai PMD kompenzáló rendszerek

Az optikai tartományban működő diszperzió kompenzáló rendszerek az optikai szálban terjedő fényhullám útjába olyan eszközöket iktatnak be, amelyekkel befolyásolni lehet a fényhullám módusainak terjedését. Ezek mind dinamikus működésűek, követik a PMD időbeni változásait, ugyanis az aktuális PMD nagymértékben fluktuálhat a hőmérséklet, illetve más fizikai paraméterek. Tipikus felépítésük a 3. ábrán látható.

Az optikai jel egy polarizációirány szabályzó (PC) után egy változtatható késleltetésű szálon halad át. A jel folyamatos ellenőrzése mellett egy folyamatos visszacsatolás valósítható meg a PMD értéke és a kompenzáló, polarizációirány szabályzó, vagy a változtatható késleltetésű szál ($\Delta\tau$) között.

3.1.1. Optikai PMD kompenzáló rendszerek csoportosítása visszacsatolás alapján

A szabályzó jel generálása PMD mérések alapján történik. Több mérési módszer is ismeretes, az egyik legrégebbi technika a vett jel teljesítményének mérése a várt optikai jel spektrumában. A szabályzójel arányos a PSP-k irányába szétszórott jel teljesítményének arányával. A kompenzáció azon alapszik, hogy a PMD jel-teljesítménybeli csökkenést okoz. Ha az analízátor oldalán maximalizáljuk a vett optikai jel teljesítményét, akkor minimalizáljuk a PMD hatását [2]. A probléma ezzel a PMD kompenzáló technikával, hogy az alkalmazott eszközök, fotodetektor, sávszűrő bitsebesség függő.

Egy másik PMD monitorozási módszer az optikai jel polarizációs szögének mérése. A PMD az optikai jel polarizációs szögének csökkenését váltja ki, tehát ha maximalizáljuk a polarizációs szöget, minimalizálhatjuk a PMD-t [3].

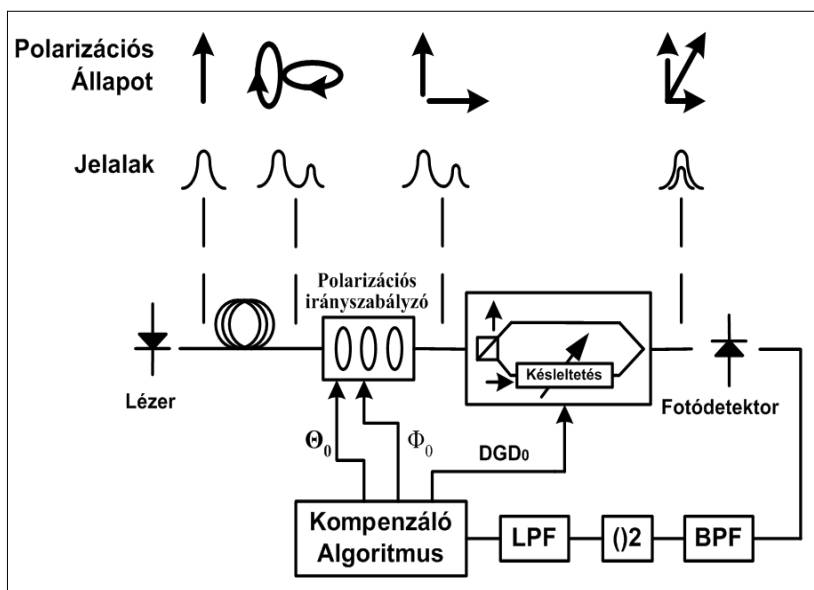
A jelközi átlapolódás mértékének vizsgálatával is lehet szabályzó jelet generálni. Az analízátor oldalán vizsgálva a vett jel szemábrájának zártsága arányos a PMD-vel, ezért a szemábrából nyert jel alkalmas a kompenzáció szabályzására [4].

3.1.2. Optikai PMD kompenzáló rendszerek csoportosítása a kompenzációs rendje alapján

További fontos kérdés a PMD kompenzációs rendje. A kompenzációs módszerek közül megkülönböztetünk félrendű, elsőrendű és másodrendű PMD kompenzáló rendszereket.

A félrendű kompenzáló rendszerek egy polarizációirány szabályzóból és egy fix késleltető elemből állnak. A beavatkozás a polarizációirány szabályzón keresztül történik úgy, hogy az összeköttetésben a DGD-t minimalizálja. Miután a késleltető elem nem változtatható, a rendszer csak egy fix DGD értéket képes kompenzálni, ezért az irodalomban úgy hivatkoznak rá, mint félrendű diszperzió kompenzáló elem.

4. ábra Optikai elsőrendű PMD kompenzáló modul



Az elsőrendű PMD kompenzáló rendszerek bonyolultabb felépítésűek. Fix helyett változtatható késleltető elemet alkalmazunk, ennek következtében változó DGD értékeket képes kompenzálni ez az eljárás. Az előző oldali, 4. ábrán bemutatott elsőrendű PMD kompenzáló rendszer egy polarizációirány szabályzóból és egy változtatható késleltetésű szálból áll. A beavatkozás a polarizációirány szabályzón és a késleltető szálon keresztül történik. Az optikai jel a szálon áthaladva a PMD miatt jelalak torzulást szenved. A polarizációirány szabályzó feladata, hogy a szálból érkező jel véletlenszerű polarizációs irányát beállítsa a kompenzáló szál PSP irányába. Késleltető szál a megfelelő DGD kompenzálást biztosítja.

A vett optikai jel spektrumának egy adott frekvenciatartományba eső teljesítményével arányos jelet a BPF sávszűrő és egy négyzetes detektor után az LPF aluláteresztő szűrőn kapjuk meg. A kompenzáló algoritmus feladata, hogy létrehozza a Θ_0 és Φ_0 és DGD₀ jeleket. A Θ_0 és Φ_0 a polarizációirány szabályzására használt jelek. Gömbi koordináta rendszert tekintve ezzel a két szöggel adhatjuk meg egy vektor irányát. A DGD₀ jellel a késleltetést szabályozzuk.

3.1.3. Előkompenzáló rendszerek

Az előzőekben ismertetett vevőoldali optikai kompenzálás mellett egy másik lehetséges módszer az előkompenzálási módszer, azaz a beavatkozás az optikai szál előtt, az adóoldalon történik, az analízis pedig az optikai szál végén, a vevőoldalon (5. ábra). A megoldás azon alapzik, hogy az adójel polarizációs irányát elforgatják az átvivő optikai szál PSP irányába, ezáltal a PMD hatását kiküszöbölik. Ezt az eljárást PSP módszernek nevezik [5].

3.1.4. Másodrendű PMD kompenzáló rendszerek

Az eddig ismertetett PMD kompenzálási technikák nem foglalkoztak a PMD frekvenciafüggésével. Ennek következtében a több hullámhosszon működő WDM hálózatok PMD kompenzálása csak közelítőleg valósítható meg. A másodrendű PMD kompenzáló rendszerek, a (2) képletben bemutatott PMD sorfejtés alapján, nemcsak az elsőrendű PMD-t, hanem a másodrendű PMD-t is kompenzálni tudják. Egy lehetséges megol-

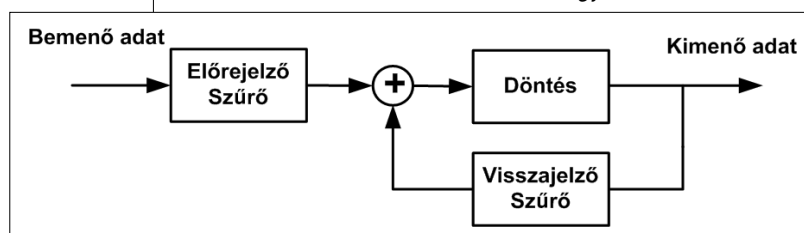
dás, hogy két polarizációirány szabályzót és két nagy kettőtörőjű optikai szálát alkalmaznak egymás után csatolva [6]. A szálak úgy vannak kialakítva, hogy a PSP irányok lineárisan változzanak a frekvencia függvényében, ezáltal egy széles frekvencia tartományban képesek a PMD-t kompenzálni.

A másodrendű PMD kompenzáló rendszerek alkalmazása jelenleg még vitatott, mert sok esetben a másodrendű PMD kompenzálása nem javítja, hanem ronthatja a jelminőséget. Ez annak tudható be, hogy ha a magasabb rendű PMD-ket elhanyagolhatónak tekintik és csak tisztán a másodrendű PMD hatását kompenzálják, akkor ez önmagában rosszabb eredményhez vezethet, mintha az összes magasabb rendű PMD-t hatásait elhanyagolhatónak tekintenénk [7].

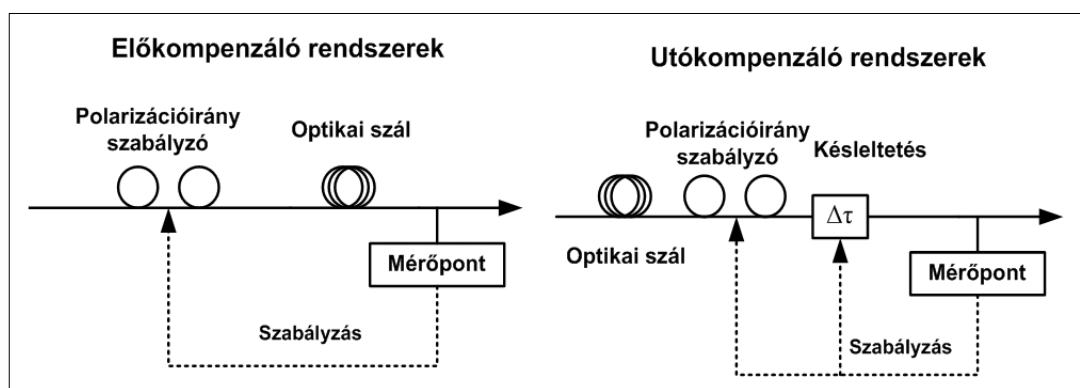
3.2. Elektronikus PMD kompenzáló rendszerek

Az elektronikus PMD kompenzálás lényege, hogy az optikai vevőkben elektronikus szűrők alkalmazásával csökkentik a jelközi átlapolódást (inter-symbol interference, ISI). Természetesen ezek az eljárások függetlenek a digitális jel torzulásainak okaitól, azaz mindegy, hogy a milyen hatás miatt történt, lehet kromatikus diszperzió, PMD vagy bármilyen más hatás következménye is. Kialakításuk szerint lehet előre- vagy visszacsatolt elrendezésű (6. ábra).

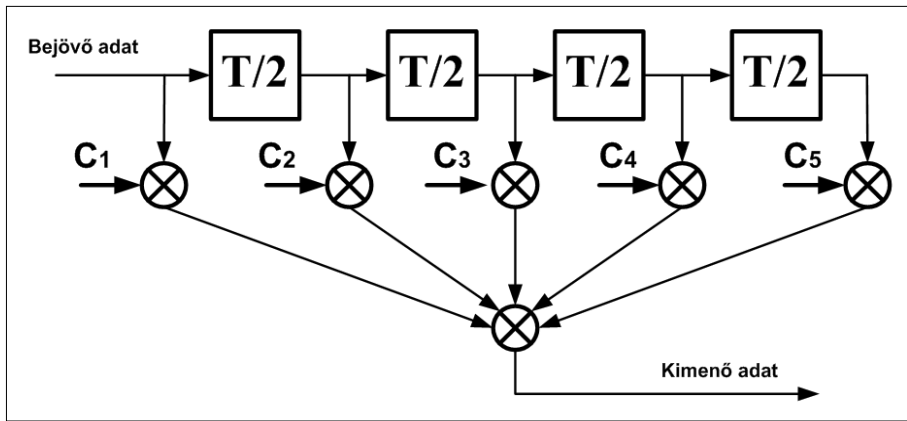
6. ábra
Elektronikus PMD kiegyenlítő tömbvázlata



Az ISI csökkentése érdekében alkalmazott digitális szűrők között megkülönböztetünk lineáris, illetve nemlineáris szűrőket. A direkt-detekciós optikai vevőkben a lineáris előrecsatolt szűrőket alkalmaznak. A szűrők adaptív beállításúak, a digitális szűrő súlytényezőinek meghatározására a több, más adatátviteli rendszerekben már jó bevált algoritmus is létezik. A lineáris szűrőként leggyakrabban transzverzális szűrőket alkalmaznak.



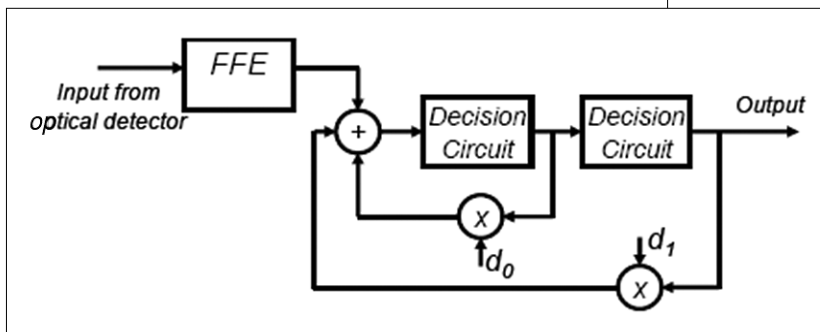
5. ábra
Az elő-, és utókompenzáló rendszer blokkvázlata



7. ábra
TF szűrő blokkvázlata

A TF szűrők működése azon alapszik, hogy a jelről egy másolatot készít, majd a lemásolt jelet egy meghatározott ΔT időtartománnyal késlelteti és a kimeneti porton összegzi a jeleket (7. ábra). Az egyes leágazásokhoz tartozó jeleket súlyozza annak érdekében, hogy minimalizálja a vevő oldalon az ISI-t.

A nemlineáris szűrők közül a legismertebbek a döntés-visszacsatolt korrektorok (Decision Feedback Equalizer, DFE) (8. ábra). A nemlineáris szűrők nagy előnye, hogy a jelminőséget képesek javítani még akkor is, ha a detektált jel minősége nagyon rossz, szemben a lineáris szűrőkkel, amelyek csak „nyitott” szemábra esetében alkalmazhatók. A DFE szűrők hátránya viszont az, hogy gyors jelfeldolgozást igényelnek.



8. ábra
Egy döntés-visszacsatolt korrektor blokkvázlata

A vett jel korrigálásának, az ISI csökkentésének egy másik lehetősége a „legvalószínűbb jelsorozat kereső” (Maximum Likelihood Sequence Estimation, MLSE) eljárások. Az MLSE eljárás azon alapszik, hogy egy összehasonlító elemzést végez a vett jel egy időszellete és az ideális, torzulásoktól mentes jel azonos szelete között (9. ábra). Ez az időszelvény több bitidőnyi hosszú is lehet. A döntés azon alapszik, hogy a vett jelsorozat melyik ideális jelsorozattal mutatja a legnagyobb korrelációt. A legvalószínűbb jelsorozat megtalálását lépésenként, legtöbbször a Viterbi algoritmus felhasználásával határozhatjuk meg. Az algoritmus bonyolultsága exponenciálisan növekszik a vizsgált bitek számával.

Az elektromos kiegyenlítő rendszerek igen hatékonyan bizonyultak a PMD kompenzálásában. A legnagyobb probléma e rendszerek alkalmazásával az, hogy a bitsebesség növelésével, 10 Gbit/s, nehéz megfelelően gyors elektromos késleltetők, szűrők készítése, amelyek kielégítik az optikai réteg által támasztott sebességszükségleteket.

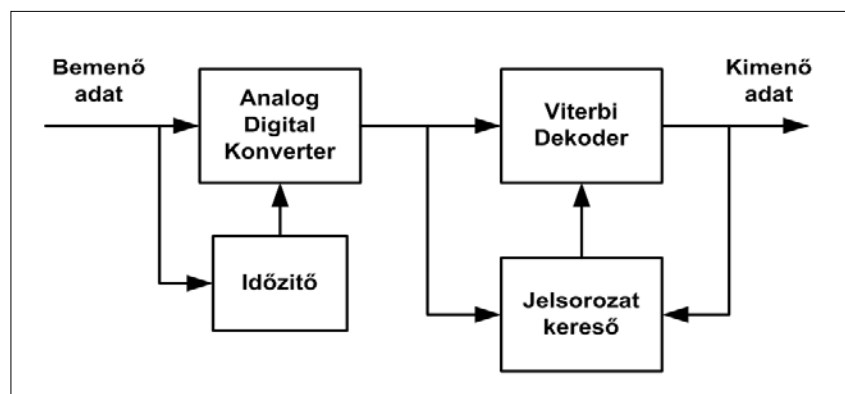
4. Összefoglalás

A cikk áttekintést kíván nyújtani az optikai adatátvitel során fellépő polarizációs módus diszperzióról. Összefoglalja a PMD létrejöttének okait, illetve ismerteti a modellezési lehetőségeit. Továbbiakban összefoglalja a PMD kompenzációs lehetőségeket, mind az optikai-, mind az elektromos rétegben. Részletesen kitér az egyes kompenzációs lehetőségek megvalósíthatóságára, azok tulajdonságaira.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a CELITC PROMISE projekt és a Magyar Köztársaság Oktatási Minisztériumának GVOP-3.1.1.-2004-05-0050/3.0 kutatási programja támogatta.

9. ábra
MLSE algoritmus működésének blokkvázlata



Irodalom

- [1] Waddy, D.S., Liang Chen, Xiaoyi Bao:
„A dynamical polarization mode dispersion emulator”
Photonics Technology Letters, IEEE Vol.15, Issue 4,
pp.534–536, 2003.
- [2] Takahashi, T., T. Imai, M. Aiki:
„Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarization mode dispersion in in-line amplifier systems,” Electronics Letters, 30(4),
pp.348–349, 1994.
- [3] Kikuchi, N.:
„Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation”,
Journal of Lightwave Technology, 19(4),
pp.480–486, 2001.
- [4] Buchali, F., S. Lanne, J.-P. Thiéry,
W. Baumert, H. Bülow:
„Fast eye monitor for 10 Gbit/s and its application for optical PMD compensation”, Proc. OFC’2001,
Los Angeles, CA, paper TuP5, 2001.
- [5] Ono, T., S. Yamazaki, H. Shimizu, K. Emura:
„Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems,”
Journal of Lightwave Technology, 12(5),
pp.891–898, 1994.
- [6] Patscher, J., R. Eckhardt:
„Component for second-order compensation of polarization mode dispersion,”
Electronics Letters, 33(13),
pp.1157–1159, 1997.
- [7] Cornick K., Boroditsky M., Frigo N.J., Brodsky M.:
Dods S.D., Magill P. „Experimental comparison of system penalties due to 1st order and multi-order polarization mode dispersion, Optical Fiber Communications – National Fiber Optic Engineers Conference” (OFC/NFOEC) March 2005, paper OFF6, Anaheim, USA.

Felhívás cikkek írására a Híradástechnika „Újgenerációs hálózatok” célszámába

A Híradástechnika **2006. novemberi** célszámában az Újgenerációs hálózatok (Next Generation Networks, NGN) témakörével kívánunk foglalkozni, amelyhez várunk áttekintő, tutorial jellegű cikkeket. Néhány javasolt tématerület:

- az NGN koncepciója, célkitűzései,
- hálózati architektúrák, referencia modellek, IMS,
- NGN mag- és hozzáférési hálózatok,
- NGN hálózati eszközök, berendezések (softswitchek, média gatewayek, stb.),
- alkalmazási platformok, nyílt szolgáltatási interfészek,
- NGN szolgáltatások,
- NGN hangkommunikáció (SIP, H.323),
- NGN számozás, címzés,
- hálózatmenedzsment,
- NG-OSS,
- biztonság,
- fix/mobil konvergencia,
- migrációs stratégiák,
- szabványosítási helyzetkép,
- szabályozási kérdések.

A beküldött cikkeket világos, érthető stílusban, a tématerülettel nem specialista szinten foglalkozó híradástechnikai szakemberek számára is jól érthető stílusban, magyar nyelven kell megírni.

A cikk hossza kb. 25.000 karakter, az ábrák száma legfeljebb tíz lehet.

A Híradástechnikában megjelenő cikkek formai követelményeiről e számunk 40. oldalán olvashatnak részletes információt.

Határidők:

Cikkek címe és rövid, max.10 soros összefoglalója:

2006. május 15.

Visszajelzés a cikkjavaslat elfogadásáról:

2006. június 15.

A végleges kézirat beküldése:

2006. szeptember 30.

A cikkjavaslatokat a főszerkesztő címére kérjük elküldeni.

Szabó Csaba Attila
főszerkesztő
szabo@hit.bme.hu

Optikai sávú összeköttetések alkalmazása az űrtávközlésben

FARKASVÖLGYI ANDREA

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
farkasvolgyi@mht.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: exo-atmoszférikus terjedés, IOL, ISL, SPOT-4, ARTEMIS, OICETS, SILEX, OPALE, PASTEL, kereső-követő üzemmód

Az ESA (European Space Agency) közel két évtizedes kutatómunkája után, 2001. november 30-án létrejött az első sikeres exo-atmoszférikus optikai sávú adatátvitel a GEO pályás ARTEMIS műhold és a LEO pályán lévő SPOT-4 távérzékelő műhold között; a SILEX (Semiconductor Intersatellite Link Experiment) terminálok segítségével, 800 nm-es sávban, 2 Mbit/s forward és 50 Mbit/s return irányú kapacitással. Az átvitel minőségét 10^6 - 10^9 bithibaarány jellemzi. A cikk áttekinti az optikai IOL (Inter Orbital Link) fejlődési állomásait, az elért eredményeket és vázolja a jövő lépéseit.

1. Bevezető

Az űrkutatás és műholdtechnika területén a nagy sáv-szélességű átvitelt biztosító optikai sávok alkalmazását hosszú ideig – 2001 végéig – kerülték. Sugárzott átvitel során, mind földi, mind műhold-kommunikáció esetén, az alkalmazott frekvenciasávok a mikrohullámú sávra, illetve középfrekvenciás sávokra korlátozódtak. A rendszerek fejlődésének és sáv szélesség igényük radikális növekedésének eredményeként a 90-es évek végén kezdték alkalmazni a mikrohullámú sáv magasabb frekvencia tartományait, a Ku, Ka és V sávokat, azaz a 20, 30 és 60 GHz-es frekvenciákat. Ezzel egyidőben próbaméréseket végeztek ISL (Inter Satellite Link) rendszerrel a 800 nm-es hullámhosszú optikai tartományban is.

Számos ok játszott szerepet abban, hogy sugárzott átvitel során nem alkalmazták az optikai átvitelt. Az egyik legkomolyabb indok az optikai sávú nyaláb keskenysége volt. Ismert tény, hogy az alacsony frekvenciás (hosszú hullámhosszú) tartományokban alkalmazott antennák apertúra felülete a hullámhosszhoz képest optimális, vagyis az antenna által kisugárzott jel nyalábformája a szükséges mértékben „nyílik”. Ez köszönhető a megfelelő lesugárzott EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) értéknek – a definíció szerint:

$$EIRP = G_{adó} \cdot P_{adó},$$

melynek következtében alkalmazható a hullámhossznak megfelelő antenna méret. Az antenna felépítésétől függően az antennanyaláb nyalábmetszete (footprint) változtatható. Építhetünk olyan antennát, mely (például GEO műholdról) a földfelszín 42%-t sugározza be (globál nyaláb), illetve olyat is, mely ugyaninnen az Alföldet fedi le. Ha optikai sávban szeretnénk kommunikálni, tudni kell, hogy az optikai nyaláb a kis adóteljesítmény és nagy szakasztávolság miatt nem nyílnak. Másképp megfogalmazva: túl nagy optikai lencsét kell alkalmazni (20-25 cm) a nagyon kicsi hullámhosszhoz képest (tipikusan: 800 nm). Ennek eredményeképpen a nyaláb nyílása minimális, néhány mikroradián. Nagy távolsá-

gokban ennél sokkal nagyobb relatív mozgása van az adó és vevő antennáknak, vagyis a vevő kimozdulása miatt megszakadhat az összeköttetés. Gondoljuk meg, hogy egy GEO pályás műhold egytized fokon belül mozog (ez egy nyolcvan kilométer élhosszúságú kockának felel meg), mely sokszorosa a lézernyaláb által befogott területnek. Az adó és vevő holdak relatív mozgásból származó összeköttetés-kiesés, a lokátoroknál alkalmazott kereső-követő üzemmóddal, kompenzálható.

Az IOL rendszer kiépítése előtt műholdtechnika területén egyedül tengeralattjáró-műhold összeköttetéseknél alkalmaztak optikai sávú adatátvitelt. A tengeralattjárók tipikus kommunikációs sávja nagyon alacsony frekvenciájú átvitelre korlátozódik. Csupán a 100 Hz-nél alacsonyabb frekvenciájú elektromágneses jel alkalmas arra, hogy mélyebb vízrétegekbe is eljusson (a frekvencia növelésével a behatolási mélység exponenciálisan csökken). Problémát jelent, hogy így csak alacsony adatsebesség realizálható, valamint, hogy rövid üzenetek átvitele lehetséges, nincs folytonos adatkapcsolat. Megoldást jelent egy GEO pályás műhold-tengeralattjáró kommunikációs link alkalmazása, mely a látható fény kék-zöld tartományában, az úgynevezett blue-green optikai sávban üzemel. Ebben a kommunikációs sávban, a Jerlov-minimum környékén (~450 nm), a tengervíz csillapítása minimális.

A kommunikáció létrehozása során két probléma is felmerül. Egyrészt a Jerlov-minimumnál sem elhanyagolható a tengervíz csillapítása, másrészt a mélybe merülő tengeralattjáró igen keskeny célpontot jelent. A 450-500 nm-es kommunikáció lényege, hogy a fénysugár képes behatolni a tengervízbe. Ebből következik, hogy a Nap jelentős blue-green sugárzási komponense komoly problémát okoz, hiszen az szintén behatol az alsóbb vízrétegekbe, így a tengeralattjáróra telepített optikai vevőt a napsugárzás zajként terheli. Megoldás az, hogy kihasználjuk a különbséget a nagyon keskeny sáv szélességű lézersugár és a nagyon széles spektrális eloszlású napfény között. Egy megfelelően keskeny áteresztő-sávval rendelkező optikai szűrő ké-

pes venni a legtöbb blue-green lézer által kibocsátott fotont, miközben elnyomja a napból érkező fotonokat. Itt jelentkezik az a probléma, hogy a biztos kommunikáció realizálásához nagy látótérrel rendelkező szűrők alkalmazására van szükség, mert a felhőkön és a tengervízen való áthaladás, a lézernyaláb szóródást és elhajlást eredményez.

Egy általánosan használt optikai szűrő nem tudja teljesíteni mindkét kritériumot. Kifejezetten tengeralattjáró kommunikációra alkalmas az ARF (Atomic Resonance Filter), mely mindkét feltételnek eleget tesz. E szűrőnél a tipikus spektrális szélesség ($\Delta\lambda$) és centrális hullámhossz (λ_0) aránya:

$$\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 10^{-6}.$$

Ha $\lambda_0 \approx 500 \text{ nm}$, akkor az áteresztő sáv szélessége 0.0005 nm, ami valóban keskeny sáv [18].

A műholdtechnika nagyarányú fejlődése ellenére sokáig nem mutatkozott igény az egymással kommunikáló, intelligens műholdrendszerek létrehozására. Azokban a ritka esetekben, amikor műholdak közötti közvetlen sugárzott kommunikációt alkalmaztak, az összeköttetés kizárólag mikrohullámú sávra (L, S és V) korlátozódott. Kerülték a magasabb vagy optikai sávok alkalmazását annak ellenére, hogy gyakorlatilag korlátlan sáv szélesség biztosítható e kommunikációs sávokban.

2. Sugárzott hullámú műholdas összeköttetések

A sugárzott hullámú összeköttetések esetén két jól elkülöníthető átviteli formát különböztetünk meg, legtöbb esetben mindkettőt szabadtéri összeköttetésnek tekintik. Az egyik a valódi szabadtéri összeköttetés, melynek során az adó illetve a vevő egység között nincs semmilyen közeg, tereptárgy vagy objektum. A másik a légkörről keresztül realizált sugárzott összeköttetés.

2.1. Földfelszíni sugárzott összeköttetés

A földfelszíni sugárzott összeköttetés során zavaró közeg alatt leggyakrabban a légkört értjük, az atmoszféra és az ionoszféra hatását. Ez lehet bármi, amin áthalad a jel, tengeralattjáró esetén például a sós víz, másfelől a víz-levegő határán a sűrű vízpárafelhő. A légkör vagy közeg, mely a haladó hullám útjába kerül, frekvenciától függően különböző mértékben csillapítja, szórja a kisugárzott jelet, ezen kívül a frekvencia függvényében nem kívánt elhajlásokat okoz. A jel útjába eső tereptárgyokról a jel egy része visszaverődik, többutas terjedést okoz. A földfelszín görbülete okozta nagy távolságú kitakarás miatt, már a magasabb adótornyok is horizont mögé kerülnek 50 km távolságban [1].

2.2. Szabadtéri összeköttetés

Valódi szabadtéri összeköttetés az úgynevezett exo-atmoszférus átvitel. Ezt az összeköttetést műhol-

dak közötti kommunikációra ISL (Inter Satellite Link), vagy műhold pályák közötti adatcserére alkalmazzák IOL (Inter Orbital Link). Az IOL általában LEO (Low Earth Orbit) – GEO (Geosynchronous Earth Orbit) kapcsolatot jelent, míg az ISL GEO–GEO pálya közötti információcserét. Az exo-atmoszférus átvitel során legtöbb esetben, az ITU által javasolt sávok közül, a 800 nm-es optikai sávot alkalmazzák. A sáv hatalmas előnye a nagy realizálható kimenő adóteljesítmény.

2.2.1. Műholdpályák közötti összeköttetések (IOL)

IOL kiépítése során több probléma is felmerül.

Amennyiben nem azonos-pályás a két műhold, akkor az alacsonyabb pályán lévő hold időről időre eltűnik a horizont, pontosabban a Föld mögött, így földárnyékba kerül. A kitakarás következtében megszakad az összeköttetés. Ez abban az esetben okoz problémát, ha a kapcsolat ismételt kiépítésének pillanatában nem a megszakadás helyén kell keresni az ellenpontot (a másik holdat), hanem mint jelen esetben, a Föld átellenes oldalán. Ha egy LEO pályás hold az Északi-sark felett tűnik el, akkor a Déli-sark felett kell várni az ismételt felbukkanást. A kapcsolat ismételt felépülésének legkritikusabb pontja a két hold pozícióra állása.

A magasabb pályás holdhoz képest (GEO) az alacsonyabb hold (LEO) a magasság különbség arányában nagy sebességgel mozog. Ezért a kommunikáció során a két műholdnak végig követnie kell egymást. A műhold követése során két üzemmód kíséri egymást: először a kereső üzemmód, melynél a lézernyaláb közel 750 mikroradián nyílásszögű kereső fénnyel fogja be az érkező LEO pályás holdat. A második ütemben a GEO hold átáll követő üzemre, melynek során egy keskeny optikai nyalábbal követi a LEO műhold mozgását, biztosítva ezzel a nagysebességű adatcsere biztonságát a két hold között.

A SILEX rendszer az optikai exo-atmoszférus átvitel prototípusa, a hatalmas távolság leküzdéséhez (átlag 37 ezer kilométer) elengedhetetlen a nagy precizitású anyagok alkalmazása. Mint ilyen, megépítése során felhasználták az optikai kommunikáció technológiai fejlesztéseit: nagy pontosságú félvezető lézerek, nagyérzékenységű szélessávú szenzorok, ultra stabil szerkezeti anyagok, pontos irány meghatározó rendszerek, nagy precizitású optikák, pontos hőmérséklet-szabályozás [2,10].

2.2.2. Műholdak közötti összeköttetések (ISL)

GEO pályás műholdak közötti, ISL rendszerű optikai link létrehozása, az IOL kommunikációnál egyszerűbb feladat. A kommunikáció kiépítése során a két holdnak meg kell találnia egymást. A link fenntartása nem automatikus. Szükséges az úgynevezett folyamatos követő-üzemmód alkalmazása. A GEO pályán adódó komoly távolságok miatt, a két GEO pályás hold egymáshoz képest, azonos tangenciális sebességük ellenére is mozog. Ez a mozgás minimális, de nagyságrendekkel nagyobb, mint amit egy optikai link kompenzálni tud.

Ha egy három GEO pályás műholdból álló rendszert szeretnénk optikai linkkel összekötni (klasszikus Clarke rendszer, egymással 120°-os szöget bezáró holdak [14]), akkor körülbelül 72-73 ezer kilométeres szakasz-távolságot kell áthidalni. Figyelembe véve a szakaszcsillapításból származó jelvesztéseket igen jelentős antenna nyereségekkel és adóteljesítményekkel kell ellátni a rendszert. A rendszer felbecsülhetetlen előnye a hatalmas realizálható adatsebesség.

3. Optikai sávú kommunikációs egység (SILEX rendszer)

Az IOL és az ISL rendszerek lelke a SILEX optikai sávú kommunikációt lehetővé tevő egység.

3.1. SILEX rendszer működési elve

Az IOL rendszer szempontjából az ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) egy földszinkron pályán keringő optikai átjátszóállomás, melyen keresztül az alacsonypályás felderítő műholdak jelét (például: SPOT-4, EnviSat, OICETS) az európai ESA központba, Toulouse-ba (Franciaország) illetve Redu-be (Belgium) lehet sugározni. Az ARTEMIS holdon lévő átjátszó maga a SILEX rendszer OPALE (Optical Payload for Intersatellite Link Experiment) eleme. A GEO pályás átjátszó pont, valamint az optikai link kiépítését az alacsonypályás holdak láthatósági problémái indokolták.

Egy bizonyos földi pontról a LEO pályán keringő holdak ritkán és nagyon rövid ideig láthatók, az alacsony pályamagasság miatt néhány percig tartózkodnak horizont felett. Minél alacsonyabb körpályán kering a műhold, annál rövidebb a láthatósági időzés. A Föld felszínét pásztázó felderítő holdak, mint SPOT-4, ENVISAT, OICETS tipikusan 900 km alatt keringenek. Funkciójukból adódóan nagy sávszélességű, hosszú időn át fenn tartható kommunikációs csatornára van szükségük.

Ha e holdakról a nagy mennyiségű adatinformációt közvetlenül kell a földi központba lesugározni, akkor vagy hosszú ideig tart az adatok továbbítása (akár napokig) vagy több, a Föld különböző területein elhelyezett vevőállomásra van szükség (például Dél-Amerika, Ausztrália stb.)

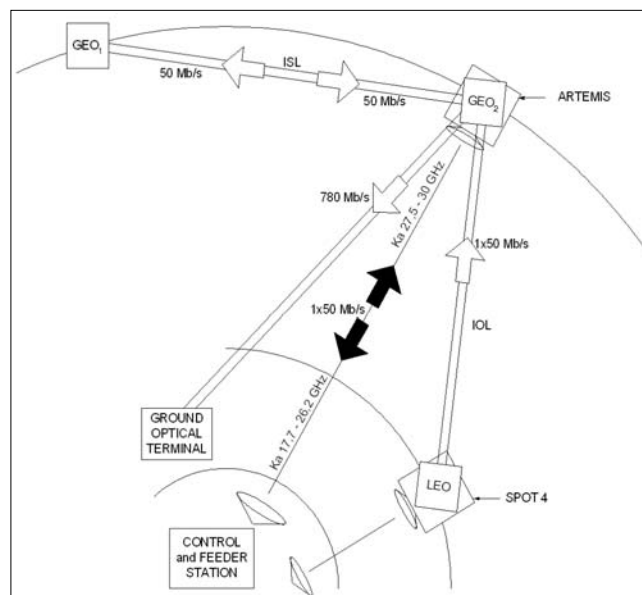
Problémára megoldást jelentett, hogy a vevőállomás egy segédantennáját, pontosabban egy átjátszó pontot feltelepítettek GEO pályára, ez az egység található az ARTEMIS műholdon. Az átjátszó-pont beüze-

melésének köszönhetően az alacsonypályás holdak láthatósági ideje nagyságrenddel megnőtt, természetesen, most a GEO pálya felől nézve számítjuk a holdak láthatósági időzését. Az adó és vevő egységek közötti szabad, légkörmentes tér, a nagy távolság ellenére lehetőséget adódott az optikai sáv alkalmazására. Nincs zavaró légkör, mely elhajlást, pluszcillapítást vagy szóródást idézne elő a kisugárzott jelben. Az optikai sávú kommunikációnak köszönhetően az átviteli adatsebesség 10 Gbit/s nagyságrendig növelhető. A kommunikációs adatsebességnek csak a vételi ponton lévő egység kapacitása szab korlátot.

Az ARTEMIS hold beüzemelése előtt a SPOT-4 naponta öt alkalommal tudott néhány percig adatot sugározni a földi központ felé, mikrohullámú sávon. Az átjátszó beüzemelése után a SPOT-4 láthatósági ideje naponta 6 alkalomra emelkedett, a kommunikációs időzések hossza így 30 perc. A két műhold közötti, nagy adatsebességű, 50 Mbit/s-os optikai link biztosítja a megfelelő adatforgalmat. Az ARTEMIS a SPOT-4-ről sugárzott adatfolyamot az európai földi központ felé Ka sávon, 10 Mbit/s-os adatsebességgel sugározza vissza.

Az ISL és az IOL rendszerek egyszerű vázlatát láthatjuk az 1. ábrán, a SILEX rendszert alkotó holdak néhány lényeges adatát pedig az 1. táblázat mutatja [2,9,13].

Az IOL rendszerrel alkalmazott berendezés két különböző egységből áll. A két részegység rendre egy GEO pályás (ARTEMIS), illetve egy LEO pályás (SPOT-4, OICETS) műholdon üzemel [3].



1. ábra
ISL és az IOL rendszerek
alkalmazási
lehetőségei [13]

1. táblázat
A SILEX rendszert
alkotó holdak
néhány jellemző adata

Jellemző	ARTEMIS	SPOT-4	OICETS
Pálya inklinációs szöge	0° /GEO	98° /LEO	97.8° /LEO
Alkalmazott optikai sávok	800 nm	860 nm 830 nm	514.5 nm 532 nm 800 nm
Alkalmazott mikrohullámú sávok	Ka-band (GEO-Earth) S-band (GEO-LEO- Spacecraft)	X-band (LEO-Earth)	S/K-bands (LEO-Earth)

3.2. PASTEL

A SILEX egység először űrbejuttatott eleme a SPOT-4 (Satellite Earth Observation System) LEO pályás felderítő-műhold fedélzetén található, ez a PASTEL berendezés (Passager SPOT de Télécommunication Laser).

Feladatát tekintve a SPOT-4 műhold Európa felszínborításának feltérképezésében játszik szerepet. A SPOT-4 által készített nagymennyiségű, nagyfelbontású felvétel alapján, akár 10 m-es pontosságú mezőgazdasági és földrajzi térképek készülnek [3,4].

3.3. ARTEMIS-OPALE

Az SILEX rendszer másik eleme, az ESA tulajdonában lévő ARTEMIS többfunkciós műholdon található, OPALE egység. Az ARTEMIS 2001-es fellövése után, egy 18 hónapos pályameelési manőverrel állították GEO pályás pozíciójára és üzemelték be a kommunikáló berendezést [4,5]. Az ARTEMIS telekommunikációs műholdon működő berendezések:

- EMS (European Mobile System)
- EGNOS (European Geostacionary Navigation Overlay System)
- SILEX (Semiconductor Intersatellite Link EXperiment) berendezés, OPALE eleme [6,7].

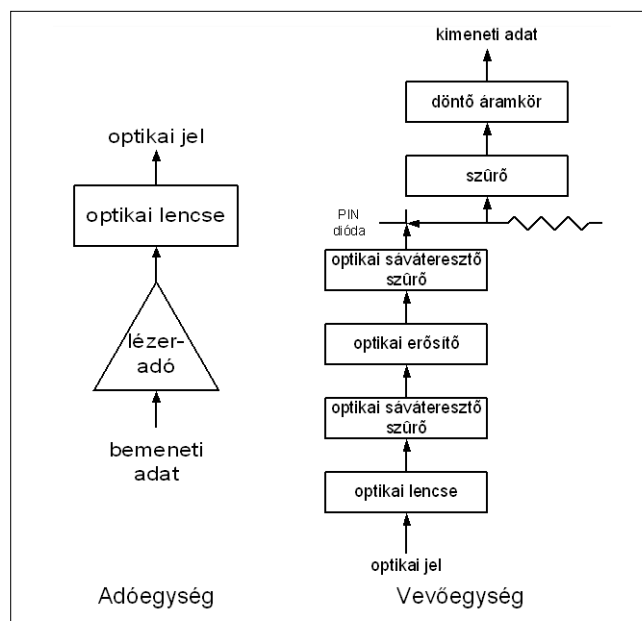
3.4. Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS)

Az ISL rendszer legutoljára, 2005. december 9-én, üzembe állított egysége az OICET, más néven KIRARI, mely egy japán teszt műhold. Feladata a fedélzetén lévő optikai berendezések tesztelése. Többek között az ARTEMIS műhoddal épít ki nagy sáv szélességű optikai kapcsolatot. A rendszer legnagyobb eredménye a kétirányú optikai linket létrehozása GEO és LEO pályák között [8].

3.5. SILEX berendezések felépítése

A SILEX teleszkóp és optikai pad egy félgömb tartományú mozgást lehetővé tevő stabil alapzatra van felépítve. Az optikai sugár-nyaláb a speciális alapzatnak köszönhetően fél-teret képes leírni. Az optikai pad magában foglalja a kereső és követő szenzorokat (Acquisition and Tracking Mode), kommunikációs szenzorokat, lézerciódás adókat, hely-helyzet-stabilizáló mechanizmust (Fine Pointing Mechanism, FPM), PAM (Point Ahead Mechanism), valamint optikai reléket és szűrőket. Az adó és vevő egység egyszerű blokk-sémáját a 2. ábrán láthatjuk.

A követő és tartó szenzorok működésének alapja a CCD (Charge-Coupled Device) és QD (Quadrant Detector) detektorok, a kommunikációs vevődetektorok Si-APD (Silicon Avalanche PhotoDiode) diódák, a kommunikációs lézer diódák GaAlAs típusúak. A 2. táblázat összefoglalja az optikai adó és vevő fokozatok néhány jellemző adatát.



2. ábra
SILEX rendszerben alkalmazott optikai adó és vevő egyszerű blokk-sémája [17]

A PASTEL-en lévő 830 nm-es lézerciódás kimenőteljesítménye folytonos üzemen 60 mW (max. 160 mW), mely teljesítményértékkel a maximális 42.000 km-es üzemi távolságra is létrehozható a kommunikáció. Az OPALE szilícium detektorain a vételi teljesítményszint 1.5 nW. Ekkora vételi érzékenység oly módon valósítható meg, hogy a kommunikációs nyaláb szélessége alig haladja meg a 8 mikroradiánt. A roppant keskeny nyalábnak köszönhetően a nagyméretű 25 cm átmérőjű optikai adó, illetve vevő lencsék „antennanyeresége” jóval meghaladja a 100 dB-t. A teleszkóp és a tükrök anyaga Zerodur, mely nagyprecízitású, nulla hő-tágulási üveg-kerámia, csillagászati tükrökhöz és lencsékhez alkalmazzák. Az optikai rendszer diffrakciója limitált, a hullámfront-hiba nem érheti el a $\lambda/15$ -t, ezért szükséges a nagyprecízitású anyagok alkalmazása [2,5,7].

3.6. Kereső-követő üzemmód

Legnagyobb problémát a kereső és követő lokációs üzemmód jelenti. A SILEX kommunikációs nyalábjának nyílása csupán 8 mikroradián (0.00046 fok), mely nagyságrendekkel kisebb egy tipikus nyílthurkú műholdas összeköttetés nyalábszögénél. A keskeny nyalábnyílással biztosítható a vételi ponton a megfelelő vételi teljesítmény. Minél kisebb a nyaláb térszöge (Ψ_{ant}), annál nagyobb az antenna nyeresége (G).

Az antennanyaláb nyílásából meghatározott nyereségét az (1) képlet alapján, feltételezve a 8 mikroradián nyalábszélességet, a (2) mutatja:

$$G = \left(\frac{4\pi}{\Psi_{ant}} \right) \quad (1)$$

$$G \Big|_{dB} = 10 \lg \frac{4\pi}{\Psi_{ant}} = 10 \lg \frac{4\pi}{(8 \cdot 10^{-6})^2} \approx 113 \text{ dB} \quad (2)$$

	OICETS ⇒ ARTEMIS	ARTEMIS ⇒ OICET	SPOT-4 ⇒ ARTEMIS	ARTEMIS ⇒ SPOT-4
Kommunikációs sávok	847 nm (kommunikáció)	819 nm (kommunikáció) 801 nm (befogó jel)	860 nm (kommunikáció)	810 nm (befogó jel)
Polarizáció	LHCP (Left Hand Circular Polarization)	LHCP	RHCP (Right Hand Circular Polarization)	
Adatsebesség	50 Mbit/s	2 Mbit/s	50 Mbit/s	
Moduláció típusa	QPSK	BPSK, QPSK	DPSK	
Jelforma (moduláció)	NRZ (Non Return to Zero)	PPM (Pulse Position Modulation) (IM/DD)	OOK (On/Off Keying) (IM/DD)	
BER	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	Az ARTEMIS SPOT-4 irány nem aktív.
Eb/No	16 dB	12 dB	18 dB	
Kimenő adóteljesítmény	200 mW +23 dBm		60 mW (+17.8 dBm) Max.: 160 mW +22.04 dBm	
Vételi teljesítmény	4.8 nW (-53 dBm)		1.5 nW (-58.2 dBm)	
Lézerdióda típusa	GaAlAs		GaAlAs	
Követő-tartó detektor	CCD, QD		CCD	
Adat detektor	Si-APD		Si-APD	
Vételi érzékenység	-95 dBm		~ -90 dBm	
Hullámfront hiba maximális értéke	$\lambda / 16.2$		$\lambda / 15$	
Optikai (lencse) antenna átmérője	26 cm		25 cm	

2. táblázat
SILEX rendszer:
Az optikai link kommunikációs paraméterei
[5,7,15]

A két műhold közötti adatkommunikáció kiépülésének alapja a kereső-követő üzemmód alkalmazása. A SILEX rendszer elvi működését a 3. ábra mutatja. Első lépése a kereső üzemmód, ennek során a két műhold felveszi egymással a kapcsolatot.

A kapcsolatfelvétel első fázisában a két hold egymás feltételezett irányába fordul. Ezután az ARTEMIS-en lévő SILEX terminál (OPALE) egy, az üzemi nyaláb-szélességhez képest széles, 750 mikroradiános optikai nyalábbal pásztáz a SPOT-4 feltételezett irányába. Ez az úgynevezett jelzőfény a 3. ábrán I. útvonallal jelöltük. Jelzőfény generáló egység csak az ARTEMIS-en van, mindig ő kezdeményezi a kapcsolatfelvételt. Mikor a PASTEL egység detektálja az OPALÉ jelzőfényét, gyors rákorrigálás után válaszként egy keskeny kommunikációs sugarat küld az OPALÉ felé. Az ábrán ez a II.-vel jelzett útvonal, a kereső-követő mechanizmus.

Hasonlóan az előzőekhez, az OPALÉ detektálja a PASTEL visszasugárzott jelét, szintén egy keskeny kommunikációs jelet küld a PASTEL felé. Ezután a két műhold zárthurkú követő rendszerben marad a LEO műhold eltűnéséig. A sikeres kereső folyamat befejeztével realizálódhat a nagy-sávszélességű adatátvitel, a III/a és b útvonal. A LEO hold felbukkanása után a két műholdnak csupán 90 ms ideje van arra, hogy a zártláncú követőmódot kiépítse. A véges fénysebesség, illetve a két műhold közel merőleges mozgása miatt, a termináloknak olymódon kell meghatározni az adósugár eltérését, hogy bele kell kalkulálni a vett jel irányát.

A két terminál, a pályamodellek alapján, önállóan kalkulálja a kommunikációs sugár kilövési irányát. A hibának kevesebbnek kell lennie, mint 2 mikroradián.

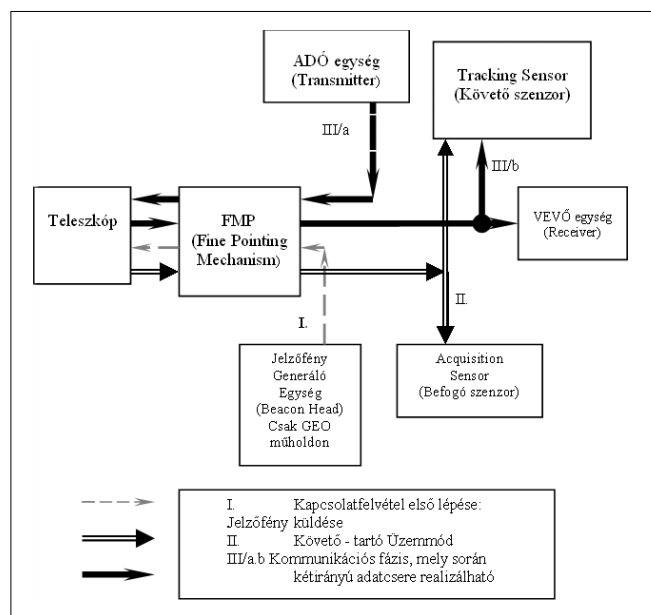
A rendszernek két hibaesetet kell kontrollálnia:

– Kompenzálni kell a műhold pozíciótartó mechanizmusának mozgásából adódó dinamikus rezgést, melynek hatására a keskeny kommunikációs nyaláb leterhet a vételi pontról és összeköttetés-kiesést okozhat.

– Ki kell küszöbölni azt a zavaró esetet, mikor a lézerdióda nyalábjába és a követő optikai szenzor sugara egy vonalba esik és zavarják egymást.

A nagy pontosságú optikai nyaláb létrehozásánál szükséges az ultra-stabil szerkezeti elemek, illetve a pontos hőmérsékleti kontrol alkalmazása.

3. ábra
A SILEX egység kapcsolatkiépítő és kommunikációs rendszerének logikai működési elve [16]



Szükséges, hogy a műhold a Nap által megvilágított, illetve árnyékban lévő felén kialakuló nagy hőmérséklet különbség miatt a műhold szerkezetileg ne változzon. Ez az átmeneti szerkezeti deformálódás minden műholdnál megfigyelhető, de ha nem nagytávolságú optikai linkkel kommunikálnak, akkor nem minden esetben okoz problémát.

Az optikai pad anyagát tekintve szénszállal megerősített műanyag, melynek köszönhetően a hőtágulási együtthatója közel nulla. A műhold szerkezetében így a hőhatás nem okoz deformitást, tartani lehet az előírt pontosságot. A szénszállal megerősített műanyag hatalmas előnye, természetesen a fent említett előnyök mellett, hogy a különböző fémszerkezetekkel ellentétben igen könnyű, mely az űrtechnológiában nagy lehetőség, hiszen az egyszerre egy rakétával emelhető hasznos teher tömege legfeljebb 8 tonna [4,5,7,9].

4. Összefoglalás

Az űrtechnológiában hatalmas előnnyel jár az optikai kommunikációs sávok alkalmazása. Tekintsük át a sáv előnyeit az RF sávokhoz képest.

- Elsősorban beszélni kell az optikai sávú kommunikáció esetén az interferencia-viszonyairól. Az optikai sáv sajnos igen alacsony kihasználtsága, valamint az alkalmazott keskeny nyalábszélesség miatt, gyakorlatilag a rendszerben nem kell számolni interferencia problémával. Tehát semmilyen, az RF sávban alkalmazott interferencia csökkentésére tett megkorlátást az optikai sávban nem kell alkalmazni.

- Másodszor figyelembe kell venni a realizálható hatalmas adatsebességet (>10 Gbit/s), mely a sokszorosát elérheti az alkalmazott RF kommunikációs sáv szélességnek.

Az interplanetáris hálózatok (távoli bolygók és Nap körül keringő obszervációs műholdak) jelének Földre juttatása a nagy adatmennyiség és az óriási távolság miatt hosszadalmas és bizonytalan. A jelenleg működő RF vevőantennák átmérője minimum 35 m, melyből következik a roppant keskeny nyaláb és alacsony adatsebesség. Az optikai sáv nagy adatsebessége és 10^{-6} – 10^{-9} közötti bithibaarány miatt az adatátvitel gyors és biztonságos. Kis adatvesztéssel vihetők át az adatok. Az interplanetáris rendszereken belül az optikai sáv alkalmazására több példa is van.

Elsőként a 2003. szeptemberében fellőtt, Hold körül keringő SMART-1 (Small Mission for Advanced Research in Technology) obszervációs műholdon alkalmazták a kétirányú optikai adatkapcsolatot. A szonda a 847 nm-es hullámhosszú lézernyalábbal a Tenerifén lévő ESA OGS-el (Optical Ground Station) kommunikál. Szintén optikai link segítségével fog a Földdel kommunikálni a 2004-ben fellőtt és 2011-ben beüzemelésre kerülő, majdan a Merkúr körül keringő MESSENGER (MErcury Surface Space ENvironment GEOchemistry and Ranging) űrszonda. Az interplanetáris hálózatok kommunikációját feltétlenül optikai linken realizált adatkapcsolattal lehet optimálisan megoldani [11,12].

- Harmadrészt az optikai berendezések egyik legpozitívabb tulajdonsága a műholdtechnika szempontjából adódik. A nagy precizitás eléréséhez a stabil, magas minőségű anyagok alkalmazása elkerülhetetlen. Leggyakrabban szénszállal megerősített műanyagokat használnak. A műanyag alkatrészek hatalmas előnye, hogy tömegük töredéke a fém alkatrészek tömegének. Vagyis egy emeléssel sokkal több eszközt lehet az űrbe juttatni, mely költségkímélő és környezetbarát megoldás is egyben.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni dr. Gödör Évának, a Szélessávú Hírközlés Tanszék adjunktusának, a dolgozat megírásához nyújtott számtalan segítségéért és szakmai támogatásáért, valamint köszönetemet fejezem ki konzulenseimnek, Dr. Zombory Lászlónak és dr. Gschwindt Andrásnak.

Irodalom

- [1] dr. Gödör Éva: Jegyzetek a „Műholdas és Mobil Távközlés” tárgyhoz, Szélessávú Hírközlés Tanszék, 2005.
- [2] T. Tolker-Nielsen: Wireless' Meets Photonics, Photonics Spectra, May 2001, pp.160–162.
- [3] T. Tolker-Nielsen, J-C. Guillen: SILEX – The First European Optical Communication Terminal in Orbit, ESA Bulletin, No.96, November 1998, pp.42–44.
- [4] <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/satellit/spotsys/spot4/ang/pastel.htm>
- [5] http://directory.eoportal.org/pres_SPOT4.html
- [6] ARTEMIS, ESA BR-220, February 2004
- [7] http://directory.eoportal.org/pres_ARTEMISAdvancedRelayandTechnologyMissionSatellite.html
- [8] http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/oicets/
- [9] http://directory.eoportal.org/pres_OPALOrbitingPicosatAutomaticLauncher.html
- [10] H.P. Lutz: Optical Communication in Space, ESA Bulletin, No.91, August 1997, pp.25–31.
- [11] ESA Achievements, BR-250, ISBN 92-9092-493-4, pp.254–259, pp.210–215.
- [12] <http://www.nasa.gov/messenger>
- [13] http://www.wtec.org/loyola/satcom/c5_s4.htm
- [14] Arthur C. Clarke: Extra-Terrestrial Relays, Wireless World, October 1945, pp.305–308. <http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/clarke/ww1.asp>
- [15] http://directory.eoportal.org/pres_OICETSOpticalInterorbitCommunicationsEngineeringTestSatellite.html
- [16] http://www.wtec.org/loyola/satcom/fh5_9.gif
- [17] <http://www.ee.bgu.ac.il/~shlomi/publication/10.pdf>
- [18] http://assets.cambridge.org/052162/3189/excerpt/0521623189_excerpt.pdf

Címkefeldolgozás és csomópont-megvalósítás optikai csomagkapcsolt hálózatokban

KOVÁCS GÁBOR, BÁNKY TAMÁS, BERCELI TIBOR

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
{kovacsg, banky, berceli}@hvt.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: segédvivős rendszerek (SCM), hullámhosszosztás (WDM), optikai szűrés, hullámhossz átalakítás

A tisztán optikai csomagkapcsolt megoldások a mai optikai távközlés kutatásainak egyik központi területéhez tartoznak. Cikkünk egy olyan csomagkapcsoló központot mutat be, mely segédvivős nyalábolással oldja meg a csomagtovábbításhoz szükséges információk továbbítását, ezen címke információ elektronikus feldolgozásával, míg az alapsávi nagysebességű csomag jelkezelését mindvégig az optikai tartományban végzi. A segédvivőn található címke és az alapsávi jel szétválasztása optikai szűrők felhasználásával történik.

1. Bevezetés

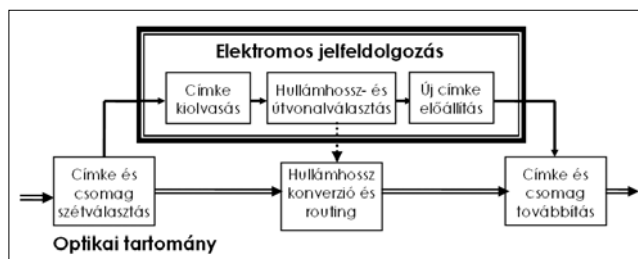
A tisztán optikai csomagkapcsolt megoldások a mai optikai távközlés egyik legintenzívebben kutatott tématerületei. A kutatások célja olyan hálózati technológia kialakítása, mely lehetővé teszi a hálózati adatforgalom optikai tartományban történő transzparens továbbítását. A transzparencia ezekben a hálózatokban kétféleképpen is értelmezhető.

Ha hálózati protokoll szempontjából értelmezzük a transzparenciát, akkor azt jelenti, hogy a rendszer alkalmas bármely, tetszőleges hálózati protokollú jel módosítása nélküli átvitelére. Ez megoldható egy köztes protokoll réteg beiktatásával, mely, például az MPLS-hez hasonlóan, címkével látja el a csomagokat, a hálózaton belüli útvonalválasztás pedig a címkék alapján történik.

Fizikai réteg szempontjából értelmezett transzparencián azt értjük, hogy opto-elektronikus átalakításra csak a hálózat szélén található csomópontokban kerül sor, a köztes csomópontokban az átvitel mindvégig az optikai tartományban marad. Ennek megoldása speciális eszközöket igényel, és bár a szakirodalomban lehet találni a csomagtovábbítást és adatfeldolgozást is az optikai tartományban végző kísérletekről szóló beszámolót [1], várhatóan még hosszabb ideig szükség lesz elektronikus jelfeldolgozó berendezésekre ezen eszközökben.

Egy lehetséges köztes megoldás azonban az, ha szétválasztjuk az információs adatfolyamot a csomagtovábbításhoz szükséges jelzésátviteltől, és míg az információs csomagokat tisztán optikai úton továbbítjuk,

az ehhez szükséges routing információk feldolgozását elektronikus tartományban végezzük [2,3]. Ennek blokk-sémáját az 1. ábra mutatja.



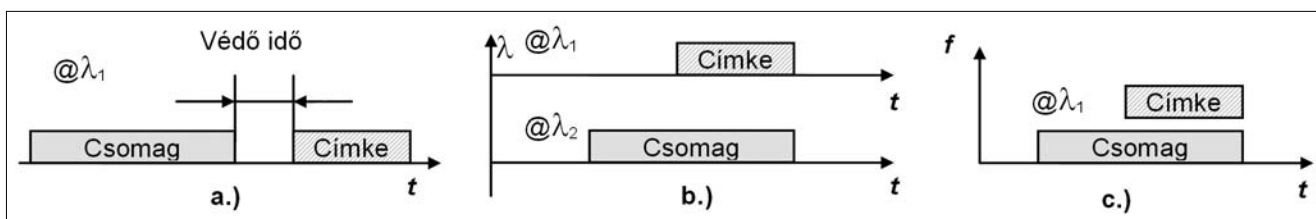
1. ábra A csomagfeldolgozás fő funkciói

Jelen cikkünkben egy ilyen csomagkapcsoló központ kialakításának szempontjait vizsgáljuk meg, majd az IST-LABELS (IST-2001-37435) projekt keretében megvalósított berendezés részleteit mutatjuk be.

2. A címkeinformáció továbbításának kérdései

Fontos kérdés a címkék továbbításának, és az információs adatcsomagokkal való nyalábolásának módja. A továbbiakban a továbbítandó információt csomagnak (mely magába foglalhat például egy IP csomagot, annak fejrészével együtt), míg a rendszeren belüli csomagtovábbításhoz szükséges információt címkének fogjuk nevezni. A címke és a csomag főbb nyalábolási technikáit a 2. ábra mutatja.

2. ábra Címke nyalábolási technikák: a) TDM, b) WDM, c) SCM



Időosztásos multiplexálás esetén (Time Division Multiplexing – TDM) a címke időben megelőzi a csomagot, és optikai kapcsoló alkalmazásával tudjuk szétválasztani őket [4,5]. Míg a címkét elektronikusan feldolgozzuk, addig a csomagot egy optikai késleltető vonalon késleltetjük, majd újra időben multiplexáljuk azokat.

Egy másik megoldás a hullámhosszosztásos multiplexálás (Wavelength Division Multiplexing, WDM), mely gyakorlatilag egy teljesen független optikai csatorna felhasználását jelenti a címke továbbítására. Egy működő WDM rendszerben nem igényel külön kiegészítő hardver elemeket, spektrális szempontból azonban nem hatékony.

További lehetőség a segédvivős nyalábolás alkalmazása (Subcarrier Multiplexing, SCM), mely során az optikai vivőt egy frekvencia-multiplexált elektromos jellel moduláljuk. A módszer lényege, hogy az alapsávban továbbítja a nagysebességű információs adatcsomagokat (például IP csomag+fejréssz), míg a címke információ egy segédvivőre multiplexálva időben párhuzamosan halad. Ez mind idő, mind spektrum szempontjából hatékony megoldás, melynek ára a bonyolult adó és vevő struktúra (adóoldalon segédvivőre keverés, majd optikai modulálás, vételi oldalon nagysebességű vevő, és lekeverés). A vevőoldali struktúra azonban jelentősen egyszerűsíthető optikai előszűrés alkalmazásával, melyet a következő bekezdésben részletesen bemutatunk. Mint látni fogjuk, ezzel a módszerrel a vevőben egyszerű, alacsony sáv szélességű fotodióda is alkalmazható, és lekeverésre sincs szükség. A csomópontot tehát ilyen jelek kezelésére alakítottuk ki.

3. A megvalósított csomagkapcsoló központ

Ebben a részben, az előzőekben bemutatott megfontolások alapján kialakított csomagkapcsoló központ főbb funkcionális elemeit mutatjuk be.

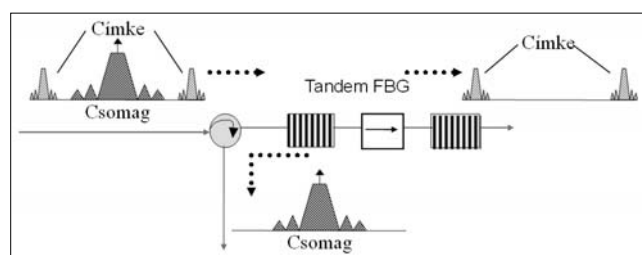
Mint látni fogjuk, első lépésben megtörténik a csomag és a címke szétválasztása. Ezt követően a címkét detektáljuk, és több lépésben feldolgozva előállítjuk az új címkét. Végül a címkét a segédvivőre keverjük, és az új hullámhosszú optikai vivőre moduláljuk. Eközben a csomag egy optikai késleltető vonalon halad végig, és a címkével azonos időpontban jelenik meg a kimeneten.

3.1. Optikai előszűrés

Mikrohullámú jelek optikai tartományban történő szűrése vonzó alternatívája lehet az elektromos jelfeldolgozásnak, amennyiben a kívánt sáv szélesség néhány GHz fölé esik. Ezt a fajta megoldást alkalmaztuk csomópontunkban is a címke és a csomag szétválasztására.

Egy egyszerű optikai szűrőstruktúra látható a 3. ábrán. Egy optikai szűrő (Fiber Bragg Grating, FBG) zárósávja reflektálja az alapsávi jelet az optikai vivővel együtt, melyet egy optikai cirkulátor juttat az egyik kimenetre. Ezalatt a segédvivőket a szűrő átereszt, és ezek

egy másik kimeneten jelennek meg. Mivel a visszavert jelet is fel akarjuk használni a további lépésekben (hiszen az alapsávi információt tartalmazza), ezért a szűrőnek szigorú előírásoknak kell megfelelnie az alapsávi jelre vonatkozólag (például sáv szélesség, csoportfutási idő stb.) Szintén fontos előírás, hogy az áteresztő sávhoz képest jelentős elnyomással kell rendelkeznie az optikai vivőre nézve, a hibamentes címke detektálás elérése érdekében. A szűréssel kapcsolatos további részletek olvashatók [6] és [7]-ben.



3. ábra Az optikai szűrés blokkvázlata

3.2. Elektronikus jelfeldolgozás

Az elektronikus jelfeldolgozás megvalósítására programozható hardver áramkört alkalmaztunk (Field Programmable Gate Array, FPGA). Ez egyfelől biztosította az átviteli sebességhez szükséges nagysebességű jelfeldolgozást, másrészt a rugalmas kialakítást, mely a fejlesztés során elengedhetetlen volt. Ugyanakkor a 155 Mbit/s működési sebesség biztosításához külön órajel panelt kellett építeni.

Az átvitelre egy 155 Mbit/s sebességű NRZ jelet használtunk, az ebből összeállított csomag szerkezetét mutatja a 4. ábra.

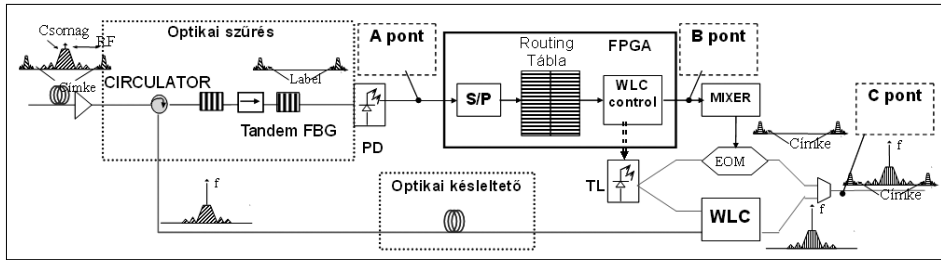
N bit training sorozat	16 bit azonosító	32 bit címke információ
------------------------	------------------	-------------------------

4. ábra A címke keretszerkezete

Az órajelek csomagonkénti szinkronizálásához minden csomag elején egy 0101 alternáló sorozatot használtunk. Ezt követően a kereten belüli pozíció azonosítására egy 16 bites pozícióazonosító szó következett (speciális állapot-érzékeny algoritmussal, amely kiszűri a címkén belüli szóegyezéseket), végül pedig a 32 bites címke információ. A vevőben ezt a 32 bitet egy soros-párhuzamos átalakítással tettük alkalmassá a párhuzamos adatfeldolgozásra.

Mint később látni fogjuk, manapság szinte kizárólag fix értékű optikai késleltetők állnak rendelkezésre, ezért az elektronikus jelfeldolgozás megvalósításában is fix késleltetésű módszereket alkalmaztunk.

Ennek érdekében a routing-táblában való keresésre is speciális, fix késleltetési idővel rendelkező algoritmust használtunk. Legoptimálisabb a direkt címezhető táblák alkalmazása lett volna, melyek esetén a keresési idő mindig egy órajel ciklusú, ám ennek nagy címke méret esetén megvalósíthatatlanul nagy a memória igénye (2^n – ahol n a címke mérete). Ugyanakkor 2^m méretű táblák ($m \ll n$) és hasító függvények alkalmazása esetén elérhető olyan keresés, melynek várható



5. ábra A csomópont blokkvázlata

értéke továbbra is egy órajel ciklus, és a címke n bitjéből kiválasztott m bitje alapján azonosítja a kimenő érték pozícióját (ám ekkor már szükség van a kis valószínűséggel bekövetkező ütközések kezelésére).

A projekt kisméretű demonstrációs környezetében a $n = 32$ bites címkékhez $m = 9$ bites hasító függvényt használtunk, ami 512×64 bit méretű memória használatát tette szükségessé, és egy órajel ciklusú keresést tett lehetővé. További részletek a hasító függvényekről [8]-ban találhatók.

A következő lépés a hullámhossz átalakító modul vezérlése volt, ami az új címke értéke alapján történt. A hullámhossz konverzió két lépésben, kapuzó üzemmódban működő félvezető optikai erősítők (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) felhasználásával történt (további részletek: [9, 10]), melyhez az új hullámhosszat egy hangolható lézer biztosította.

3.3. Kimenőjel előállítás

A hullámhossz konverter vezérlését követően az FPGA jelkimenetén megjelenik az új címke, melyből egy mikrohullámú keverő előállítja a 18 GHz-es segédvívőre modulált címkét. Ez tartalmazta a 155 Mbit/s sebességű, ASK-modulált NRZ jelet, Mach-Zehnder modulátor meghajtására alkalmas teljesítményszinten ($\sim +25$ dBm).

Mint azt korábban említettük, a kimeneten szükség van az alapsávi csomag és a segédvívón található címke szinkronizálására. Ez azt jelenti, hogy a címkefeldolgozással megegyező értékű késleltető vonalat kell beiktatni az alapsávi csomag útjába.

Számos hátrányos tulajdonsága ellenére a legegyszerűbb optikai szálát alkalmazni, mely fix értékű késleltetést jelent a rendszer szempontjából. Bár például optikai kapcsolók és eltérő hosszúságú szálak alkalmazá-

sával változtatható idejű késleltető modult is lehet építeni, ezek korlátozott felbontóképessége, és az optikai kapcsolók kapcsolási sebessége miatt nem praktikusak. Ugyanakkor kutatások zajlanak valós változtatható késleltetésű eszközök kifejlesztésére [11], de ezek értéke jelenleg néhány ns nagyságrendjébe esik, ami gyakorlati alkalmazáshoz még nem megfelelő. Végül tehát egy 240 m hosszú optikai szál szolgált az optikai késleltetés megvalósítására.

4. Kísérleti eredmények

A megépített optikai csomagkapcsoló központ blokkmáját mutatja az 5. ábra. Ez tartalmazza mind a szükséges optikai, mind az elektronikus blokkokat.

A jel áthaladása a csomóponton az alábbiak szerint alakul. A bemenetre érkező segédvívós jel tartalmazza a 10 Gbit/s sebességű alapsávi csomagot és a 18 GHz-es segédvívőre modulált 155 Mbit/s sebességű címkét. Ez az SCM jel a cirkulátoron áthaladva az optikai előszűrőbe érkezik, és a korábban leírt módon szétválasztásra kerül. Az alapsávi jel a cirkulátor harmadik kimenetén keresztül az optikai késleltetővonalra továbbítódik, míg a címkét egy fotodetektorral detektáljuk.

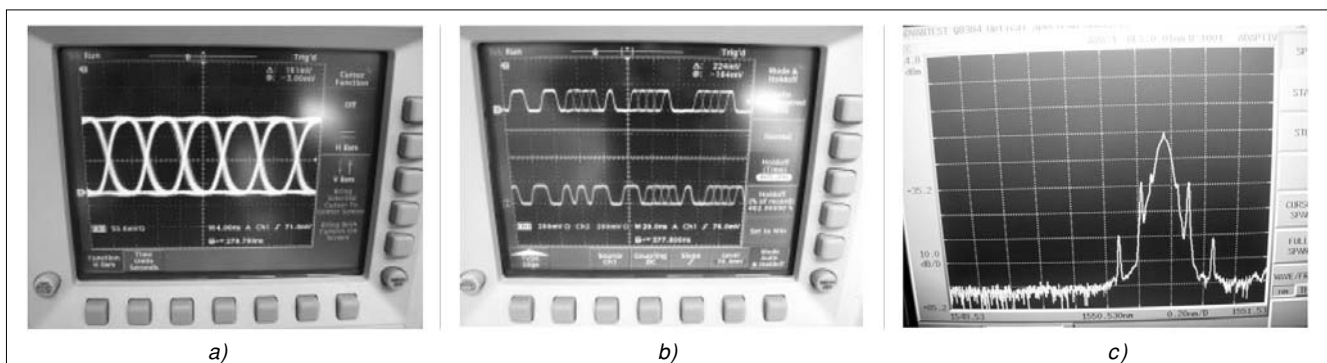
A 6. ábra a vett címke szemábráját, és az FPGA bemenetén és kimenetén megjelenő hullámformát mutatja.

A csomópont áramköreinek kialakítása során több koncepcionális kérdés merült fel. Ilyen volt a segédvívós címke detektálásának kérdése. Ezzel kapcsolatban elmondható, hogy ugyan két oldalsáv jelenik meg a detektoron, de ez az azonos modulációs tartalom miatt ez nem jelent problémát, és a diszperzióból származó követelményeket nem a segédvívő frekvenciája, hanem az alapsávi jel sávszélessége határozza meg [12].

A további kérdések többnyire az FPGA-n belüli jelfeldolgozó eljárások kialakításával (például milyen órajel kinyerési vagy routing-tábla keresési megoldást alkalmazunk), illetve az egyes eszközök közötti interfészek megfelelő kialakításával kapcsolatosak. A fotodió-

6. ábra Mért eredmények

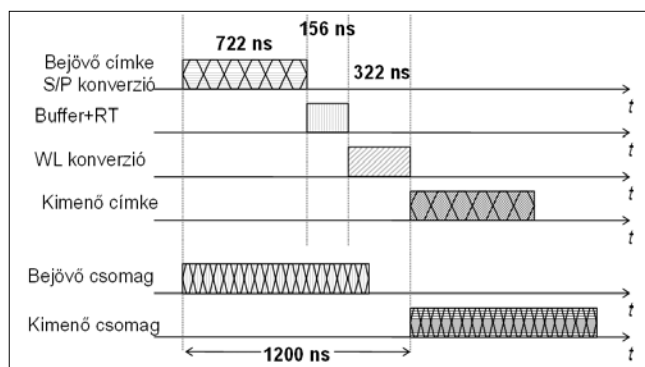
- a) a vett címke szemábrája (A pont); b) a vett (alsó A pont) és az előállított (felső B pont) címke hullámformája; c) a kimenő SCM jel optikai spektruma (C pont)



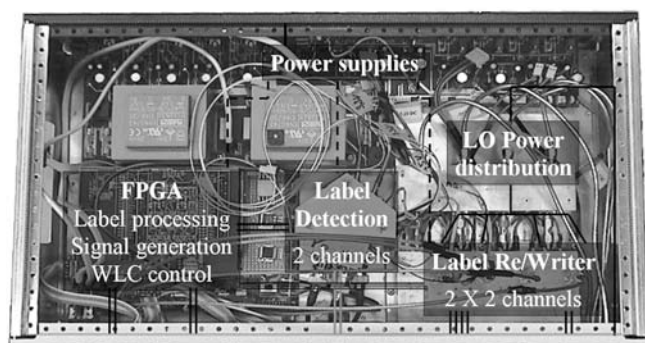
da és az FPGA között az alacsony jelszint miatt, a közsmódusú zavarelnyomás érdekében differenciális jelátvitelt valósítottunk meg, míg az FPGA kimenete és a keverő között a jelszintek és az illesztő impedanciák beállítása igényelt további munkát. Az FPGA és a hangolható lézer között 9 jelvezeték párhuzamos kábelben történik a kommunikáció.

Az alapsávi csomag késleltetéséhez ismernünk kellett az elektronikus eszközök által bevitt összes késleltetés értékét. Ez az érték a már említett jelfeldolgozási fázisokból tevődik össze (7. ábra). Láthatóan a címke soros-párhuzamos átalakítása ($112 \text{ bit} \times 6,45 \text{ ns/bit} = 722 \text{ ns}$) és a lézerhangolás (322 ns) teszi ki a késleltetés legnagyobb részét. Ugyanakkor ezek az értékek a konfiguráció továbbfejlesztésével jelentősen csökkenthetők. Például a címke elején található training sorozat csökkentésével, illetve a bitsebesség növelésével mind a soros-párhuzamos átalakítás, mind a jelfeldolgozási sebesség gyorsítható. Szintén várható, hogy a közeljövőben tovább csökken a lézerek hangolási ideje, ami javíthatná a csomópont teljesítményét. Egy lehetséges megoldásként 64 bites címkemérettel, 622 Mbit/s jelsebességgel és 50 ns-os lézerhangolási idővel számolva a csomópont teljes késleltetés 300 ns alá csökkenthető.

A fejlesztés végső fázisában a csomópontok elektronikus eszközeit közös dobozba integráltuk (8. ábra).



7. ábra Összesített csomóponti késleltetés



8. ábra

Cikkünkben az optikai csomagkapcsolás egy úttörő eredményét, egy optikai csomagkapcsoló központot mutattunk be. Elemeztük a címketovábbítás főbb lehetséges módszereit, majd egy kiválasztott megoldást megvalósító berendezést mutattunk be. Az optikai elemeken felül elsősorban az elektronikus eszközök kiala-

kításának főbb szempontjaira koncentráltunk. Bemutattunk mérési eredményeket a címke adás és vétel területén, megadva a jövő kutatás-fejlesztési irányvonalait hasonló rendszerek tekintetében.

Irodalom

- [1] Naoya Wada: „Ultrafast photonic packet routing technology”, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, Vol.49, No.1, March 2002.
- [2] Kovács Attila, Deme Ildikó: Segédvivős címzésű, csomagkapcsolt optikai router, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2., pp. 25–27.
- [3] Kovács Attila, Deme Ildikó: Hullámhossz-osztásos, csomagkapcsolt optikai hálózat, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2., pp.37–41.
- [4] M. Yano, F. Yamagishi, T. Tsuda: „Optical MEMS for Photonic Switching-Compact and Stable Optical Cross-connect Switches for Simple, Fast, and Flexible Wavelength Applications in Recent Photonic Networks”, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.11, No.2, March/April 2005, pp.383–394.
- [5] X. Ma, G. S. Kuo: „Optical switching technology comparison: optical MEMS vs other technologies”, IEEE Optical Communications, November 2003, pp.S16–S23.
- [6] M. Popov, P.-Y. Fonjallaz, D. Berlemont, O. Gunnarsson: „Direct microwave optical filtering: concept, configurations, and tenability”, International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP'2003), Budapest, September 10-12, 2003.
- [7] M. Popov, A. Martinez, J. Capmany, D. Pastor, P.Y. Fonjallaz, B. Ortega: „Fiber-Bragg-Grating Based Device for Payload and Label Separation in Highly Packed Subcarrier-Multiplexed Optical Label Swapping”, Photonics Technology Letters, Vol.17, No.11., 2005.
- [8] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein: „Introduction to Algorithms”, MIT Press/McGraw Hill, Cambridge/Boston 2001.
- [9] J. Capmany, S. Sales, D. Pastor, A. Martínez, B. Ortega: „Wavelength Conversion of SCM Signals Using Semiconductor Optical Amplifiers: Theory, Experiments and Applications”, Journal of Lightwave Technology, Vol.21, No.4., April 2003.
- [10] Kovács Gábor: Hullámhossz konverzió megvalósítása félvezetős optikai erősítők felhasználásával, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2., pp.15–18.
- [11] R. S. Tucker, P. C. Ku, C.J. Chang-Hasnain: „Slow-Light Optical Buffers: Capabilities and Fundamental Limitations”, Journal of Lightwave Technology, Vol.23, No.12., December 2005.
- [12] Gábor Kovács, Tibor Berceli: „Analysis of Fiber Dispersion Effect on Suppressed Carrier Systems”, Nefertiti Summerschool, Panticosa, Spain, 27-29 September, 2004.

Félvezető eszközök és áramkörök optikai vezérlése

BÓDI TAMÁS, SZEKERES PÉTER

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
{botomi, szekeres-peter@freemail.hu}

Kulcsszavak: optikai-mikrohullámú keverés, oszcillátor optikai stabilizálása, fotoérzékeny eszköz, fotovoltaiikus hatás, FET modell

A fotonika és a mikrohullámú elektronika a fizika és a mérnöki tudomány leggyorsabban fejlődő ágainak egyike. A mikrohullámú elektronikai eszközök működési jellemzőinek optikai úton történő vezérlése számos lehetőséget nyújt optikai és mikrohullámú kommunikációs alkalmazások terén. Cikkünkben bemutatjuk, hogyan lehet optikai úton vezérelni az erre alkalmas félvezető eszközöket, az optikai vezérléssel milyen paraméterek változtathatóak meg és ismertetünk néhány lehetséges alkalmazást, valamint, hogy milyen félvezető eszközök alkalmasak optikai úton vezérelhető áramkörök létrehozására. Röviden bemutatjuk ennek fizikai okait is, majd a vizsgálataink céljára kiválasztott GaAs FET tranzisztor helyettesítő kapcsolásának felírásához szükséges mérési eljárást, és a mérések eredményét ismertetjük.

1. Az optikai vezérlésről

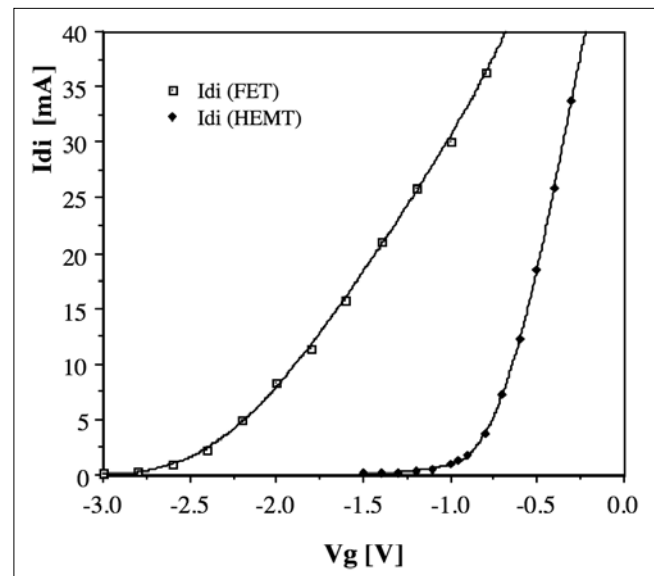
Az optikai vezérlés számos új lehetőséget teremt a mikrohullámú kommunikáció teljesítményének javítására. Optikai úton vezérelhetjük a mikrohullámú tranzisztorok erősítését, szabályozhatjuk az IMPATT oszcillátorokat. Alkalmazhatjuk fázisvezérelt antennasorok vezérlésére [17], az antennanyaláb irányítására [18], vevőmodulban koherens fázisú jel biztosítására a fáziszárt oszcillátor számára, olyan előnyös tulajdonságai miatt, mint a nagy sáv szélesség, rövid reakcióidő, interferencia nélkül mikrohullámú eszközökbe való integrálhatóság, kis veszteség és nem utolsósorban a kis fizikai kiterjedés. Ez az oka annak, hogy egyre nagyobb jelentősége van az optikailag vezérelhető félvezető eszközök, áramkörök és az előállításukhoz szükséges anyagok kutatásának. Az ez irányú érdeklődést növeli az új, nagy sebességű, elektrooptikai eszközök (lézerdiodák, modulátorok, kapcsolók...) elérhetősége és a még tökéletesebb mikrohullámú rendszerek kifejlesztése.

A mikrohullámú eszközök és áramkörök optikai vezérlése megvalósítható jó néhány fotoérzékeny eszköz segítségével. Ilyen célra legtöbbször GaAs alapú eszközöket alkalmaznak, amelyek lehetnek FET-ek, HEMT-ek, PIN diódák, IMPATT diódák [14-16]. Megvilágítás hatására a GaAs alapú eszközök mikrohullámú tulajdonságai megváltoznak. Így lehetőség van teljesítményerősítők linearizálására, torzításuk csökkentésére, de erősítés- és fázisszabályozás is megvalósítható. Oszcillátort is hangolhatunk optikai úton, és fényérzékeny mikrohullámú keverőket is táplálhatunk fényvivő segítségével [10,11].

Tranzisztorok optikai vezérlése

MESFET és HEMT eszközök elektromos tulajdonságai megváltoznak a fényhullámok abszorpciója következtében. Az eszköz aktív csatornája abszorbeálja a fényhullámokat, aminek következtében töltéshordozók

generálódnak. Ez a hatás függ az abszorpciós tényezőtől, a rekombináció átlagos időtartamától, a kisebbségi töltéshordozók diffúziójától, a kiürített tartomány szélességétől, és sok más tényezőtől. A fény elnyelődése megnöveli az eszköz drain-source áramát. A drain-source áram és a gate-source feszültség közötti tipikus összefüggést láthatjuk megvilágítás mellett az 1. ábrán FET és HEMT eszközök esetén. A két eszköz közötti különbség jól látható.



1. ábra
A drain-source áram és a gate-source feszültség közötti tipikus összefüggés megvilágítás mellett FET és HEMT eszközök esetén.

A két eszköz nemlineáris viselkedését írja le a következő egyenlet:

$$I_d = I_{dt} \cdot \left(1 - \frac{V_{g1}}{V_{p1}}\right)^2 \cdot \tanh\left(\frac{k \cdot V_d}{V_{g1} - V_{p1}}\right),$$

ahol V_{g1} a gate feszültség,
 V_{p1} a bekapcsolási (pinch-off) feszültség,
 I_d a drain-source áram,
 I_{dt} , V_d a drain-source feszültség.

$$V_{g1} = V_g + V_{le}$$

$$V_{p1} = V_p - V_{li}$$

A V_g a gate feszültség megvilágítás nélküli értéke, V_{le} és V_{li} jelenti a megvilágítás hatására megjelenő feszültségváltozásokat.

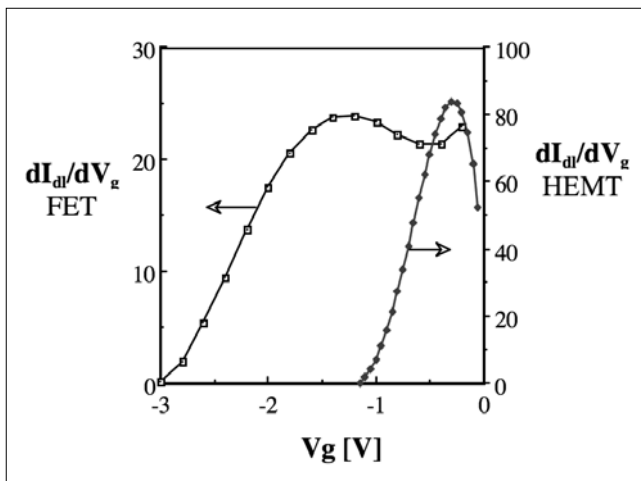
A nagyfrekvenciás drain feszültség (V_d) sorbafejthető a nagyfrekvenciás gate feszültség (V_g) szerint:

$$V_d = b_0 V_g + b_1 V_g^2 + b_2 V_g^3 + \dots$$

A feszültségerősítésre (A) az alábbi egyenlet teljesül:

$$A = A_0 \cdot (1 + c_1 V_g + c_2 V_g^2 + \dots),$$

ahol A_0 a lineáris feszültségerősítés, c_1 és c_2 a másod- és harmadrendű teljesítménytörzítési tényező. Így az erősítés arányos a transzkonduktanciával, amit a drain-source áram deriváltja határoz meg. Ez a derivált látható V_g függvényében a 2. ábrán.



2. ábra

A drain-source áram deriváltja, ez meghatározza a transzkonduktanciát, mellyel az erősítés arányos.

Mindkét esetben van a bemeneti feszültségnek olyan tartománya, amelyben a transzkonduktancia, és így az erősítés is szinte konstans értékű. A lineáris erősítési tartomány sokkal szélesebb FET esetén, mint HEMT esetén. Az optikai erősítés-szabályozásra elvégzett kísérletek [1] alapján 13 GHz-en HEMT esetében a megvilágítás hatására 0,5-2 dB-lal nő az erősítés **S21** amplitúdója (de a fázis nem változik). Így az eszköz alkalmas optikai jel detektálására, és az erősítés miatt a külső kvantum hatások 500%-os.

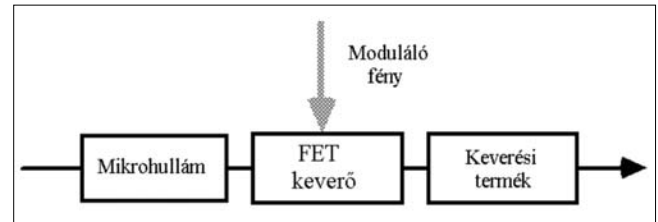
Mikrohullámú keverők optikai vezérlése

Mikrohullámú keverők optikai vezérlése esetén a lézer fényét moduláljuk a helyi oszcillátor jelével és ezt az optikai jelet vezetjük a keverőre. Ennek az elrendezésnek az a nagy előnye, hogy a helyi oszcillátor jele veszteségek nélkül nagy távolságra vihető el. A működési

elv alapján a megvilágítás megváltoztatja a MESFET transzkonduktanciáját. A transzkonduktanciát Fourier-sorba fejtve a helyi oszcillátor frekvenciája (ω_0) szerint:

$$g_m = g_{m0} + g_{m1} \cdot \cos \omega_0 t + g_{m2} \cdot \cos 2\omega_0 t + \dots$$

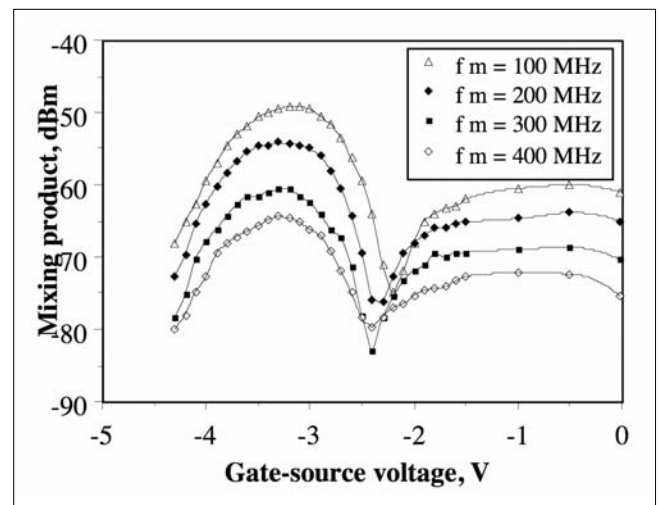
A konverziós nyereség a transzkonduktancia első Fourier-komponensétől (g_{m1}) és a középfrekvenciás terheléstől (R_{IF}) függ. Egy ilyen keverő blokkdiagramját látjuk a 3. ábrán [1].



3. ábra

Fényjellel vezérelt MESFET keverő blokkdiagramja

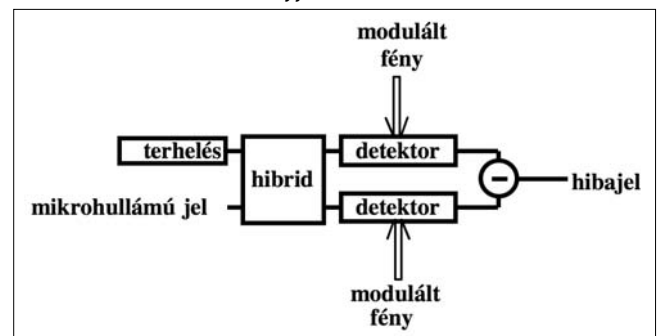
A mikrohullámú jelet a gate-re és a source-ra vezetjük, és a helyi oszcillátor jele a FET-re van vezetve a mikrohullámú jellel modulált optikai vivővel. A keverési termék a drain és a source között van. A 4. ábrán látható a keverési termék. Szintje a gate-source bázis feszültség függvénye, ahogyan az látható is, a bázis feszültség ott optimális, ahol a függvénynek maximuma van.



4. ábra

A keverési termék a FET gate-source feszültségének függvényében. A görbék paramétere az eltolási frekvencia.

5. ábra Fényjellel vezérelt direkt fázisdetektor

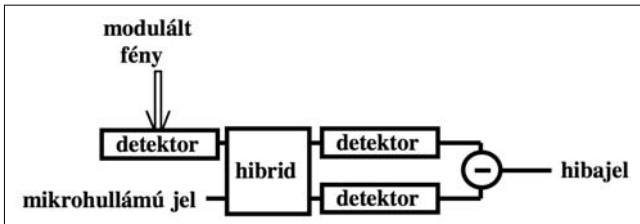


Optikai-mikrohullámú fázisdetektor

A fázisdetektorok két alaptípusát mutatjuk be a következőkben [6].

A direkt fázisdetektor blokkdiagramja az 5. ábrán látható. Ebben az esetben a mikrohullámú jelet két részre osztják egy hibriddel és a detektorokra vezetik, amelyek a modulált optikai jellel vannak megvilágítva. A detektált jelek különbsége képezi a hibajelet. Ennek az elrendezésnek az előnye, hogy ugyanazt az eszközt használjuk fel optikai és mikrohullámú detektálásra.

A 6. ábrán az indirekt optikai módon vezérelt fázisdetektor blokkdiagramját láthatjuk.

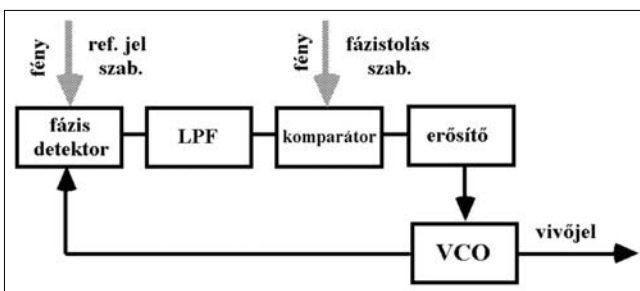


6. ábra Fényjellel vezérelt indirekt fázisdetektor

Ez esetben az optikai detekciót két külön eszköz végzi el és a mikrohullámú jelet az optikai detektorból kapjuk, így az optikai rész egyszerűbb, de a mikrohullámú rész összetettebbé válik. Az alkalmazott félvezető eszköz típusát a rendszerrel szemben támasztott követelmények határozzák meg. Jellemző követelmények az optikai csatolás hatásfoka, a frekvenciaválasz, az érzékenység, a zaj, és a linearitás.

Fáziszárt Mikrohullámú Monolit Integrált Áramkör (MMIC) oszcillátor optikai stabilizálása

A fáziszárt oszcillátorok optikai stabilizálása jól alkalmazható nagyobb távolságban történő mikrohullámú jelgeneráció esetén [6]. Egy optikailag stabilizált MMIC fáziszárt oszcillátort láthatunk a 7. ábrán.

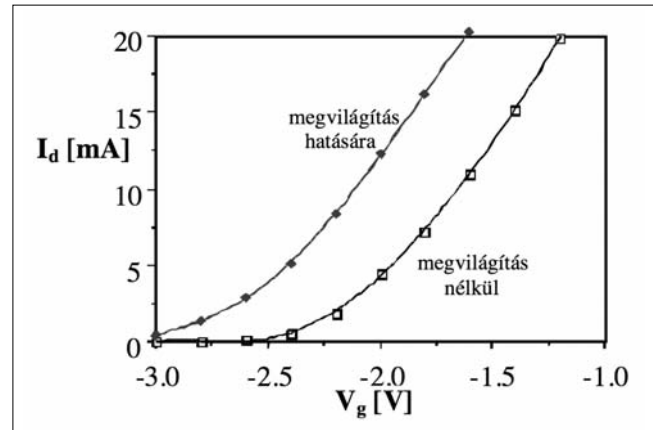


7. ábra Optikai úton stabilizált MMIC fáziszárt oszcillátor

Az optikai vivő intenzitását a referencia mikrohullámú jellel moduláljuk és a fázisdetektor megvilágítandó alkatrészeire ezt az optikai jelet vezetjük, amely a referenciajelet szolgáltatja a fázisdetekcióhoz. A fáziszárt hurok (PLL) szolgál az oszcillátor frekvenciájának stabilizálására. Az aluláteresztő szűrő (LPF) levágja az optikai átvitelből (lézerből) eredő, magasabb frekvenciájú relatív intenzitásajt (RIN). Az ábrán látható, hogy a fázistolás is szabályozható optikai úton egy komparátor áramkör segítségével.

Megvilágított FET modellje

Megvilágítás hatására a FET tranzisztor helyettesítő áramkörében az egyes komponensek értékei módosulnak. A kapcsolat a megvilágító fény intenzitása és a komponens értékek megváltozása között egyedi. Először vizsgáljuk meg az I_d - V_g DC karakterisztikát. Az I_d - V_g DC karakterisztika a 8. ábrán látható megvilágítás nélkül és megvilágítás hatására.

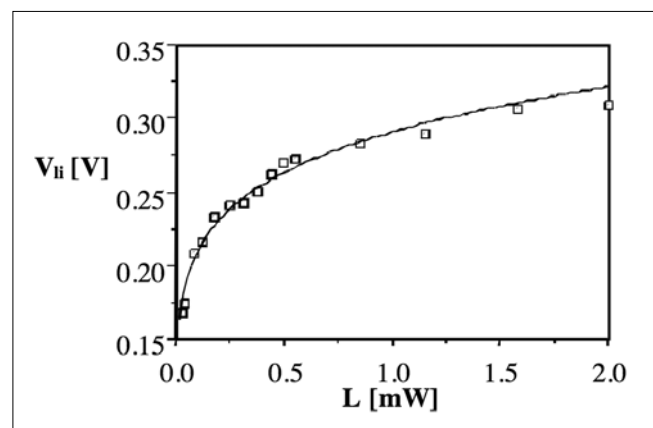


8. ábra Megvilágítás hatása a FET I_d - V_g DC karakterisztikájára

A feszültségekülönbség, amely a megvilágítás hatására adódik, az úgynevezett fény indukált feszültség V_{li} kifejezi a fotovoltikus hatást (a fotovoltikus hatást részletesen a 2. fejezetben tárgyaljuk). A görbe alakja nem változik a megvilágítás hatására. A drain-source áram (I_d) kifejezhető az eredeti munkaponttal az alábbi módon:

$$I_d = I_{d0} + a_1 V_{g1} + a_2 V_{g1}^2 + a_3 V_{g1}^3 + \dots,$$

ahol a_1 , a_2 , a_3 együtthatók a bázis feszültség és a gate-source feszültség függvényei, és $V_{g1} = V_g + V_{li}$. V_{li} függését a beeső fény intenzitásának (L) függvényében láthatjuk a 9. ábrán.



9. ábra Fotovoltikus feszültség függése a beeső fény intenzitásától

A két mennyiség közötti összefüggés a következő egyszerű képlettel adható meg:

$$V_{li} = c_{li} \cdot L^p,$$

ahol c_{ji} együttható, p tapasztalati úton meghatározott érték.

Hasonló feltételek mellett a fény-indukált feszültség HEMT esetén 0,57 V, MESFET esetén 0,24 V körüli ($P_{opt} = 1,7$ mW, $\lambda = 830$ nm) [4]. A drain-source áram növekménye diszkrét V_g értékekre 5 mA AlGaAs/GaAs HEMT esetén és 9 mA körül várható GaAs MESFET esetén. A fény-indukált feszültség független a gate-source és a gate-drain távolságtól, de függ az anyagi jellemzőktől. A MESFET esetén tehát nagyobb a drain áram növekménye, mert jobb a beeső fény és az aktív réteg közötti optikai csatolás hatásfoka.

A kapacitások

A kapacitás munkaponti értéke megváltozik a megvilágítás hatására, amit egy additív taggal jellemeznek:

$$C_i = C + C_{li},$$

ahol C_i a kapacitás értéke megvilágítás hatására, C a kapacitás értéke megvilágítás nélkül, C_{li} pedig a változást jellemző additív tag, amely a megvilágító fény intenzitásának függvénye, általában független a gate-source feszültségtől:

$$C_{li} = C_{lir} \cdot V_{li} / V_{lir},$$

ahol C_{lir} a kapacitásváltozás a V_{lir} referenciaértéken. [2] szerinti tipikus értékek: $C_{lir}^{(gs)} = 0,05$ pF, $C_{lir}^{(ds)} = 0,15$ pF.

Az ellenállások

A munkaponti ellenállásérték (R) szintén megváltozik egy additív taggal:

$$R_i = R + R_{li},$$

ahol R_i az ellenállás értéke megvilágítás hatására, R az ellenállás értéke megvilágítás nélkül, R_{li} pedig a változást jellemző additív tag, amely a gate-source feszültségtől és így a fény intenzitásától függ. Ezt a függést adja meg az alábbi egyenlet:

$$R_{li} = R_{lir} \cdot F_{li}(V_{gs}) \cdot V_{li} / V_{lir},$$

R_{lir} az ellenállás változás értéke a referencia V_{lir} feszültségen, $F_{li}(V_{gs})$ a gate-source feszültség függvénye. Az ellenállás-változás minden komponensre más és más. [2] szerinti tipikus értékek: $R_{lir}^{(gs)} = 5\Omega$, $R_{lir}^{(ds)} = 15\Omega$.

2. Fizikai alapok – a fényenergia átalakítása

A fényelnyelés az elnyelő közeg abszorpciós tényezőjének függvénye, és általában nem független a beeső fény hullámhosszától. Az egyes anyagokra jellemző hullámhossznál megnő, ettől a hullámhossztól kezdve az anyag elnyelővé válik. A beérkező fotonok nagy része a kölcsönhatás eredményeképpen szabad elektronokat kelt, amelyek fotoemisszióval a környező térbe kiléphetnek, vagy a félvezető közegben maradvának elektromos vezetőképességét növelik, illetve abban fotofeszültséget gerjesztenek.

$$\lambda_0 [\mu m] = \frac{1,24}{E_{gap} [eV]} \text{ kifejezés alapján olyan félvezető}$$

anyagok nyelnek el jó hatásokkal fotonokat az infravörös tartományban, amelyeknél az elektronok vegyérték- és vezetési sávját elválasztó, tiltott sáv szélessége $E_{gap} = 0,8 \dots 1,55$ eV közé esik [3]. Ilyen anyagok például a gallium-arsenid, indium-foszfid.

A vezetési sávba jutott elektronok és a vegyérték-sávban visszamaradt lyukak közvetlenül részt vehetnek az áramvezetésben. Ha egy ilyen anyagból készített félvezető tömböt két fémelektroddal látunk el, amelyeket feszültségforrással kötünk össze, megvilágítás hatására az átfolyó áram megnövekszik, majd annak megszűnésekor, egy idő múlva az eredeti sötétáram értékére esik vissza. A gerjesztett töltéshordozók élettartama meghatározza a cella megszólalási idejét, vagyis azt, hogy a cella meg tudja különböztetni két egymás után következő jelet. Minél rövidebb a töltéshordozók élettartama, annál rövidebb a válaszidő.

Ha a fény a félvezető anyagban kialakított p-n átmenetre esik, töltéshordozók gerjesztődnek, a p-n átmenetben jelenlévő töltés kettősréteg elektromos tere azonban szétválasztja a hordozó párokat, a lyukakat a p-, az elektronokat az n-oldal felé sodorja. Ezek a töltéshordozók hozzáadódnak a nyugalmi záróáramot létrehozó, termikusan generált töltéshordozók áramához. A p-n átmenetnek ezt a tulajdonságát *fotovoltaikus hatásnak* nevezzük. A fény által generált fotoáram a p-n átmenet sarkain megjelenő fotofeszültség hatásaként is felfogható. A fotofeszültség értékére kapjuk:

$$V_f = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{i_f}{i_0} + 1\right),$$

ahol i_f a fotoáram, i_0 a sötétáram. Záróirányban a fotoáram párhuzamosan fut a sötétárammal és független a feszültségtől. Ilyen üzemmódban tehát a fotoáram a beeső fényintenzitással arányos; az ilyen elven működő eszköz neve: fotodióda.

Felmerült a gondolat, hogy előnyös lenne egyetlen eszközben egyesíteni a fényérzékelés és a jelerősítés funkcióját. Ilyen eszköz a fototranzisztor. Egyetlen hárányos tulajdonsága: az elérhető megszólalási idő hosszúnak bizonyul, így csak közepes frekvenciákig használható.

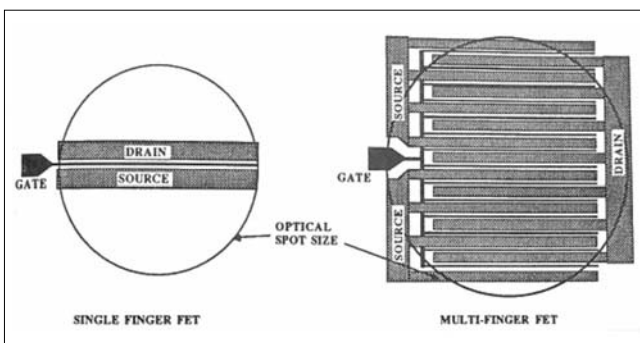
A félvezető lézerciódák közvetlenül modulálhatóak mikrohullámú frekvencián, így megteremtik az erre alkalmas mikrohullámú eszközök közvetlen optikai vezérlésének lehetőségét. Ez pedig lehetővé teszi erősítőkből az erősítés szabályozását, fázistolókban a fázistolás mértékének beállítását, frekvencia hangolást és stabilizálást oszcillátorokban, valamint a keverést. Másik vonzó tulajdonsága, hogy nagymértékben lecsökkenti a jelosztó hálózatok méretét és komplexitását.

Megvilágítás hatására tehát megnő a félvezető anyag vezetőképessége a source és a drain között. A megvilágítással generált gate áram potenciálcsökkenést okoz a gate ellenálláson, ami pedig megváltoztatja a drain áramot a FET transzkonduktivitásán keresztül és megváltoztatja az ekvivalens kapcsolat néhány

elemének értékét. Az AlGaAs HEMT-tel elérhető sebesség nagyobb a [4] szerint, mint a hagyományos, nagysebességű GaAs MESFET-tel elérhető, ami köszönhető a két-dimenziós, nagy elektronmobilitású csatornának, amely heterostruktúrán jön létre.

A megvilágítás kritikus pontja a fény becsatolása a tranzisztorba [5]. A fénynek csak kis része jut a GaAs tranzisztor aktív tartományára (gate-jére), ezért a csatolás mértékét úgy lehet javítani, ha megnöveljük valamilyen módon az aktív tartomány felületét, vagyis a tranzisztor gate felületét. Multi-finger FET-et használva az aktív GaAs terület megnöveli a fényt abszorbeáló felületet.

A 10. ábrán egy hagyományos, single finger és egy multi-finger FET gate-jének összehasonlítását láthatjuk.



10. ábra Single finger FET – Multi-finger FET

3. Mérések tranzisztoron

A mérések és a szimulációk során felhasznált műszerek, eszközök és programok

- HP Network Analyzer 8722D
- HP Power Supply E3631A (2 db)
- HP Digital Multimeter 34401A
- HP VEE mérésvezérlő program
- APLAC 7.50 Student Version szimulációs program
- ATF 10136 FET
- RLT8505MG lézerdióda

Az általunk kiválasztott tranzisztor a 0,5-12 GHz-es frekvenciatartományon kiszajú ATF 10136 GaAs FET, melynek gyártó által megadott paramétereit foglalja össze az 1. táblázat.

1. táblázat

Jellemző	Jel	Abszolút Maximum	Mértékegység
Drain-Source fesz.	V_{DS}	+5	V
Gate-Source fesz.	V_{GS}	-4	V
Gate-Drain fesz.	V_{GD}	-7	V
Drain áram	I_{DS}	I_{DSS}	mA

2. táblázat

Maximális értékek ($T_c=25^\circ\text{C}$)			
Jellemző	Jel	Érték	Mértékegység
Kimeneti opt. telj.	P_o	5	mW
LD nyitófesz.	$V_{R(LD)}$	2	V
PD nyitófesz.	$V_{R(PD)}$	30	V

Optikai-elektromos tulajdonságok ($P_o=5\text{ mW}$, $T_c=25^\circ\text{C}$)					
Jellemző	Jel	Min.	Tip.	Max.	Mértékegység
Küszöbáram	I_{th}	5	10	15	mA
Működési áram	I_{op}	15	20	25	mA
Működési fesz.	V_{op}	1,8	1,9	2,0	V
Működési hullámhossz	λ_p	845	850	855	nm
Nyaláb divergencia	$\theta_{ }$	8	10	11	°
Nyaláb divergencia	$\theta_{\perp}$	25	30	40	°

3. táblázat

A megvilágításhoz egy RLT8505MG jelű GaAs ketős heterostruktúrás lézerdiódát használtunk, melynek meghajtásához előfeszítő áramkört terveztünk. A lézerdióda paramétereit a 2 és 3. táblázatban láthatóak.

Az általunk választott lézerdióda a 850 nm-es hullámhossztartományban működik. A GaAs eszközök (a megvilágítandó FET is ilyen) a magasabb hullámhossztartományokban is érzékenyek. Mi azért választottunk mégis 850 nm-es lézerdiódát, mert ebben a hullámhossztartományban a fotonok biztosan rendelkeznek annyi energiával, amennyi ahhoz szükséges, hogy az elektronok a félvezető anyag tiltott sávját át tudják lépni.

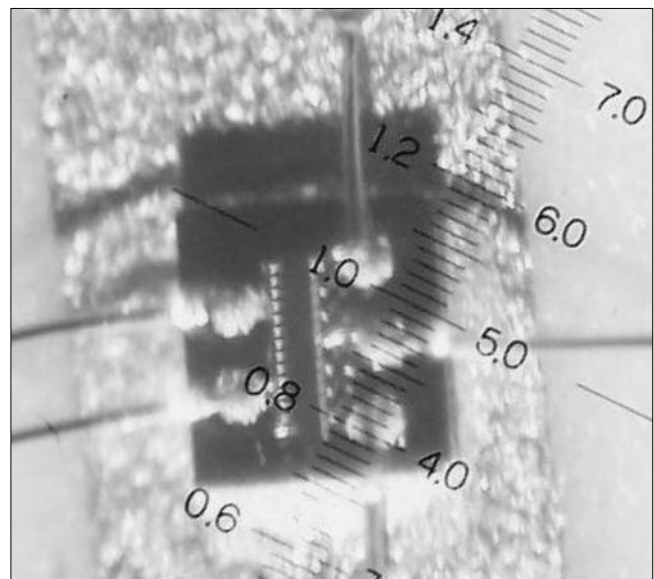
Mérési összeállítás

A lézerdióda nyalábjának fókuszálását megvilágító berendezés segítségével végeztük, mely megfelelő lencserendszerrel és háromirányú finom-beállítási mechanikával és állványzattal rendelkezik.

A kiválasztott FET-et 50Ω-os tápvonalakkal ellátott mérőáramkörre forrasztottuk földelt source-os kapcsolatban. Ezután a mérőáramkört úgynevezett *test fixture*-re helyeztük, amely SMA csatlakozókkal rendelkezik. Az SMA csatlakozók a tranzisztor gate-jéhez és drain-jéhez kapcsolódnak az 50Ω-os tápvonalakon keresztül. Mivel a tranzisztor nem optikai alkalmazásra készült, ezért a mag megvilágításához a rajta lévő fedősapkát el kellett távolítanunk. Az így „kinyitott” tranzisztor magja a 11. ábrán látható.

11. ábra

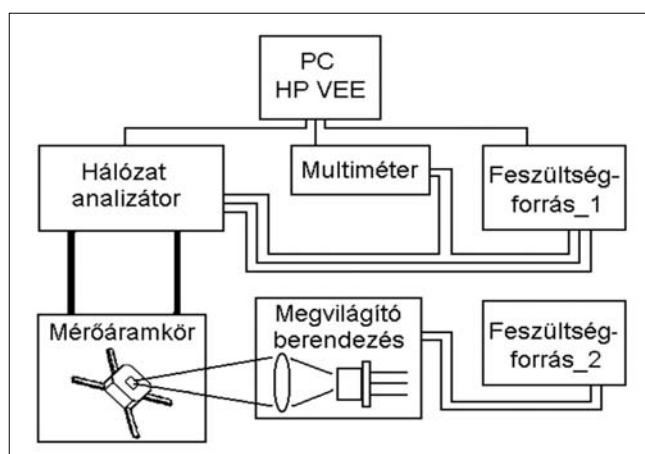
A „kinyitott” tranzisztor magja.
(A skálán egy osztás 0,02 mm-t jelent.)



A test fixture-t a megfelelő pozícióban fixen rögzítettük a megvilágító berendezés talapzatára, úgy hogy a „kinyitott” tranzisztor magja (a 11. ábrán is látható multi-finger gate) a megvilágítás fókuszában legyen.

Ezt követően csatlakoztattuk a hálózat analízátor mérőkarjait a test fixture SMA csatlakozóihoz. Az előfeszítéseket (V_{GS} , V_{DS}) a tápegységgel állítottuk elő és a hálózat analízátorba épített előfeszítő áramkör segítségével kapcsoltuk a tranzisztorra. DC karakterisztika felvétele során az előfeszítéseket változtattuk és az I_D áramot multiméterrel mértük. A HP hálózat analízátort az 50 MHz-től 3,05 GHz-ig terjedő frekvenciatartományban kalibráltuk. A lézer előfeszítéséhez egy másik HP tápegységet használtunk, amelyen a gyártói specifikációnak megfelelően 20 mA-es áramkorlátot állítottunk be a meghajtó áramra.

A mérések gyors és pontos elvégzését a HP VEE mérésvezérlő program tette lehetővé. A mérési elrendezés a 12. ábrán látható.



12. ábra A mérési összeállítás

A pontos fókuszálást a fókusztávolság állítási lehetőséget biztosító lencserendszer és a megvilágító egység három dimenziós finombeállító mechanikája teszi lehetővé. A beállítás során a fókuszpont pontos helyzetét a rendelkezésre álló infravörös detektorkártyán követtük nyomon.

DC karakterisztika mérése

A megvilágítatlan, illetve a megvilágított tranzisztor esetén kapott mérési eredmények a 13 és 14. ábrákon láthatóak.

A kapott eredmény megfelel a várakozásainknak, azaz változatlan drain-source feszültség melletti megvilágítás hatására az adott gate-source feszültségértékekhez tartozó drain-source áram megnő, az $U_{GS}-I_{DS}$ görbe jellegre valóban nem változik a megvilágítás hatására, csak a negatívabb gate feszültségek irányába tolódik el.

Két különböző U_{DS} feszültséghez tartozó $U_{GS}-I_{DS}$ karakterisztika megváltozását láthatjuk az ábrákon. Ez figyelhető meg a 15. ábrán is.

Szórési paraméterek mérése

Adott V_{DS} , V_{GS} értékpárok mellett valamennyi **S** paraméter amplitúdóját, illetve fázisát megmértük a HP hálózat analízátor segítségével. A kapott eredményeket az APLAC programmal elemeztük.

Várakozásainknak megfelelően megvilágítás hatására az **S21** és az **S22** paraméterek amplitúdói változnak meg a legnagyobb mértékben. A fázisváltozás jelentéktelen. Az **S21** amplitúdója akár 4-6 dB is csökkent, míg az **S22** amplitúdója közel 10 dB-t is változhat.

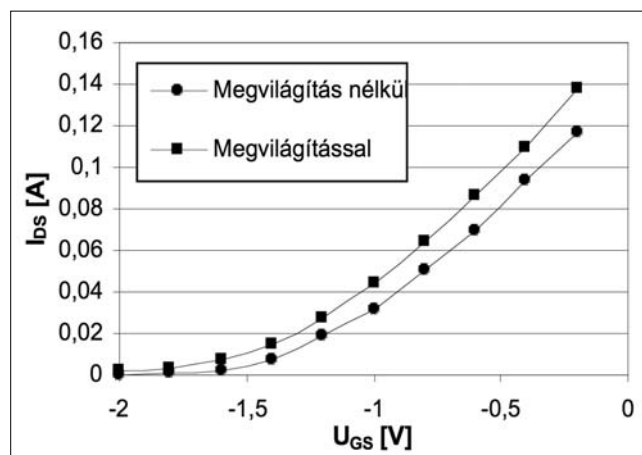
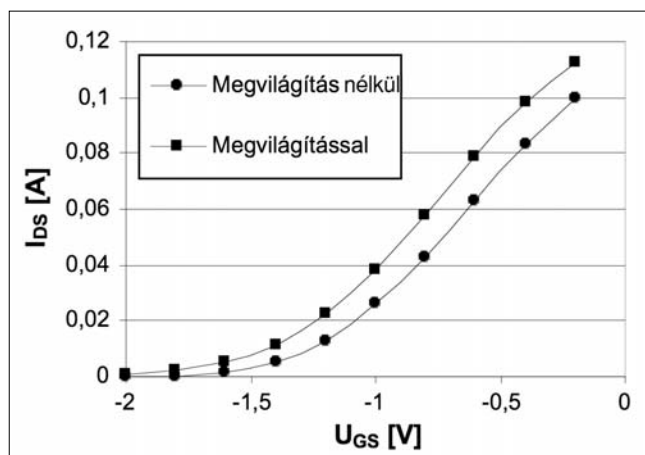
Ez látható a 16. és 17. ábrákon, melyek $U_{DS} = 1,4$ V, illetve $U_{GS} = -0,5$ V előfeszítés mellett mutatják a szórési paraméterek változását.

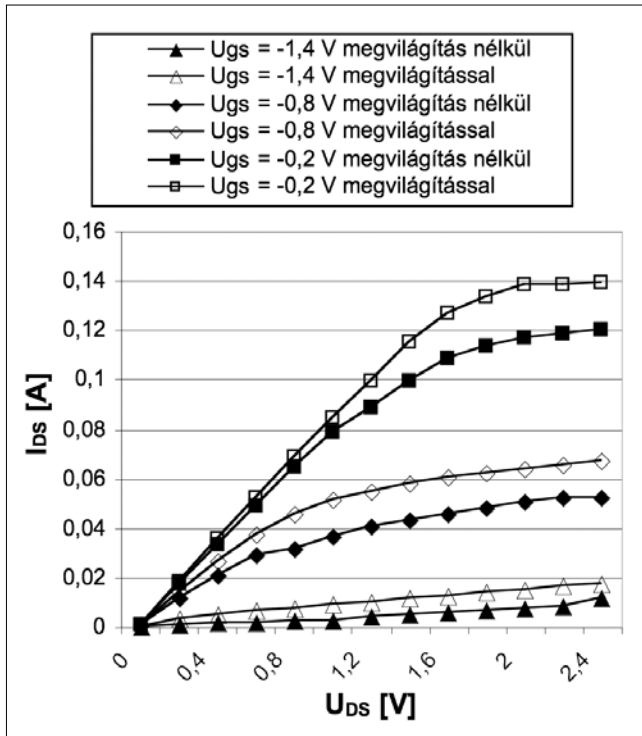
A megvilágítás hatása a pinch off, vagyis a bekapcsolási feszültség közelében jelentősebb. Ez azért lehet előnyös, mert manapság a félvezető eszközök fejlesztése az alacsonyabb fogyasztású, kisebb tápfeszültségű eszközök kutatása felé tendál.

A vizsgált FET-hez megfelelő modellt választva, a modell helyettesítő kapcsolását az APLAC programnak megadva, és az elemértékeket a mért **S** paraméterek alapján optimalizálva megkapjuk a vizsgált FET helyettesítő képét, amely a választott modelltől függően lehet lineáris, nemlineáris stb.

Például az általunk választott helyettesítő kapcsolás a 18. ábrán látható.

13-14. ábra $U_{GS}-I_{DS}$ karakterisztika változása a megvilágítás hatására $U_{DS}=1,4$ V és $U_{DS}=2$ V mellett

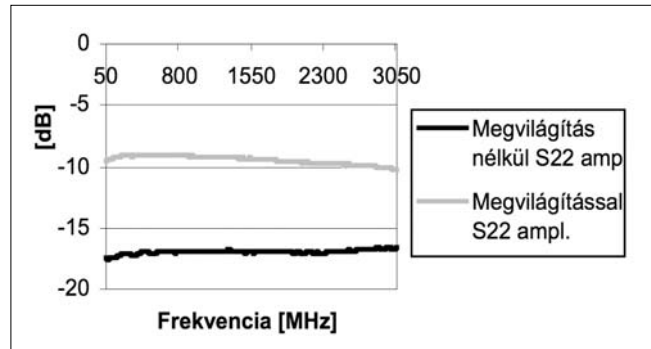
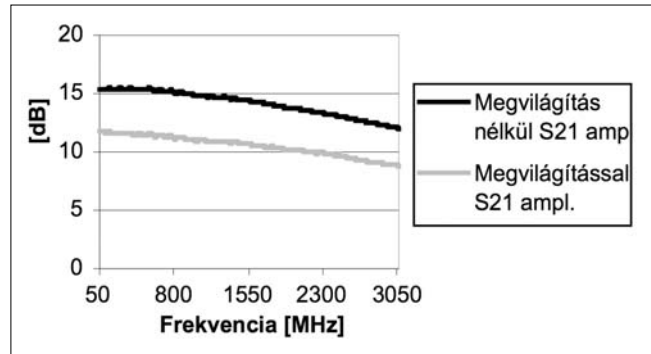
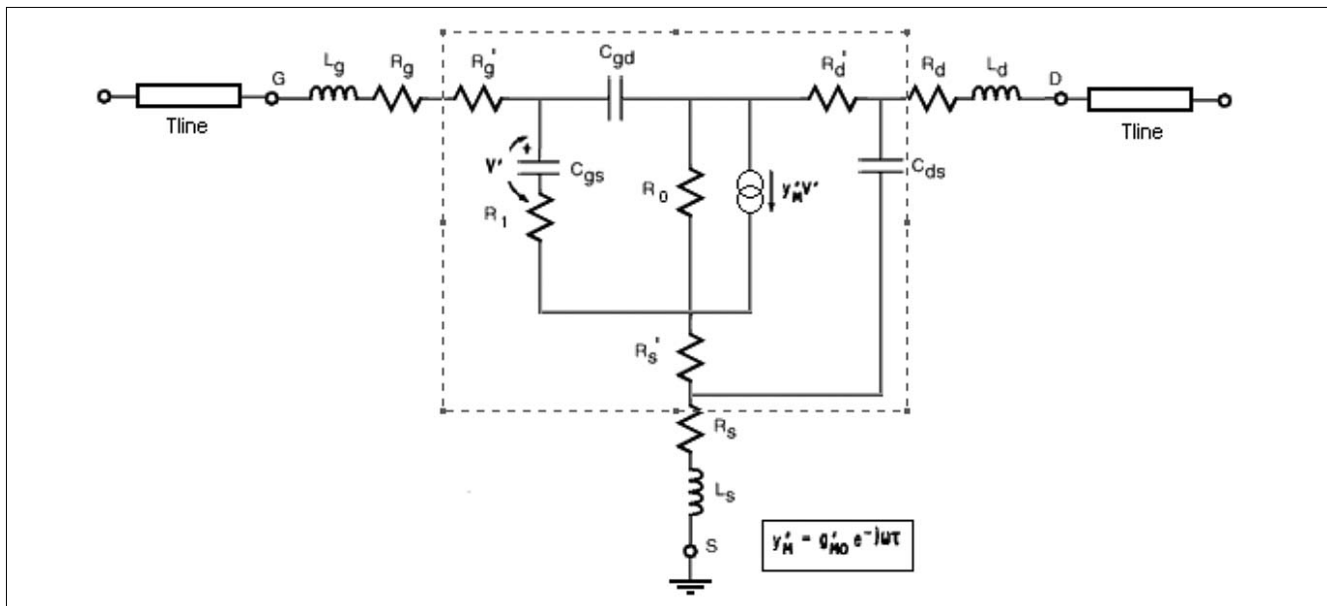




15. ábra
 U_{DS} - I_{DS} karakterisztika változása megvilágítás hatására

A helyettesítő kapcsolás elemei R_s , R_d , R_g , C_{gs} , C_{dg} és C_{ds} az eszköz fizikai felépítéséből következő paraméterek, melyek jellemzik rendre a source, drain és gate ellenállást, a gate-source, drain-gate és drain-source kapacitást. A bemeneteken látható R-L tagok a bondolás hatását jellemzik. A Tline tagok a mérőáramkör 50Ω-os tápvonalainak modelljei. Az Y_m' a transzadmittancia, melynek amplitúdója g_{m0}' , fázistolása τ . Az R_1 ellenállás a C_{gs} kapacitáshoz tartozó töltési ellenállás, R_0 a csatorna-ellenállás.

18. ábra
A választott általános nemlineáris helyettesítő kapcsolás



16-17. ábra
Az S21 és S22 paraméter amplitúdójának változása megvilágítás hatására

A helyettesítő kép segítségével megismerhetők a választott FET paramétereinek megvilágítás hatására történő változásai, és ez felhasználható optikai úton vezérelhető áramkör tervezésére.

4. Összefoglalás

Munkánk során mikrohullámú elektronikai eszközök működési jellemzőinek optikai úton történő változtatásával foglalkoztunk, amely számos új lehetőséget nyújt optikai és mikrohullámú kommunikációs alkalmazások terén.

Megterveztük és elkészítettük a kiválasztott FET megvilágításához szükséges lézer előfeszítő áramkörét és összeállítottuk a megvilágító berendezést. Méréseket végeztünk a megvilágított tranzisztoron, és a kapott eredményeket összevetettük a megvilágítás nélküli mérések eredményeivel. A kapott eredmények alapján elkészítettük a megvilágított tranzisztor nemlineáris helyettesítő kapcsolását.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA (No. T042557) kutatási programnak.

Irodalom

- [1] Dr. Berceli Tibor:
Optical control of microwave devices and circuits (belső tanulmány)
- [2] Dr. Berceli Tibor:
FET model under illumination (belső tanulmány)
- [3] Lajtha György, Szép Iván:
Fényátvklő rendszerek és elemeik, Akadémiai Könyvkiadó, Budapest 1973.
- [4] R. N. Simons:
Microwave performance of an optically controlled AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor and GaAs MESFET, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-35, December 1987., pp.1444–1455.
- [5] P. R. Herczfeld, A. Paoella, A. Daryoush, W. Jemison:
Optical phase and gain control of a GaAs MMIC transmit receive module, Proc. 18th European Microwave Conference, Stockholm, Sweden, 1988.
- [6] T. Berceli, I. Frigyes, P. R. Herczfeld, B. Molnár, I. Pacher:
Optical control of microwave phase detectors and phase locked oscillators. 20th European Microwave Conference, Budapest, September 1990.
- [7] I. Kása, I. Frigyes:
Optical tuning of MESFET oscillator; functional model and equivalent circuit. 20th European Microwave Conf., Budapest 1990.
- [8] Dr. Berceli Tibor:
Optical-Microwave Phase Detection, Proceedings of IEE, J, Vol.139, No.4., Part I, August 1992., pp.296–300.
- [9] T.Berceli, A.Baranyi, A.Hilt, J.Ladvánszky:
Modelling electro-optical interaction in MESFETs. Journal on Communications, Vol.XLIV, No.7., pp.32–35., July 1993.
- [10] T. Berceli, B. Cabon, A. Hilt, G. Járó:
Improved Optical-Microwave Mixing Process Utilizing High-Speed Photo-diodes, Proc. 26th European Microwave Conference, Prague, September 1996., pp.125–129.
- [11] G. Járó, T. Berceli:
New High-Efficiency Optical-Microwave Mixing Approach Journal of Lightwave Technology, Vol.21, No.12., December 2003, pp.3078–3084.
- [12] T. Berceli:
Improved microwave-optical reception applying double amplification in photo transistors, IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium Digest, pp.1351–1354., Philadelphia, USA, June 2003.
- [13] Hilt, T. Berceli, E. Udvary:
Microwave Network Analysis Extended to Optical Systems, COMITE 2005, Proceedings of the 13th Conference on Microwave Techniques, Prague, September 2005. pp.320–323.
- [14] Hwee Har Lim, Alphones, A.:
Optical control on HEMT devices. Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE Volume 2, 8-13 July 2001, pp.518–520.
- [15] Rossek, S.J., Free, C.E.:
Optically controlled microwave switching and phase shifting using GaAs FET's. Microwave and Guided Wave Letters, IEEE [see also IEEE Microwave and Wireless Components Letters] Volume 5, Issue 3, March 1995, pp.81–83.
- [16] Rossek, S.J., Free, C.E.:
Optical control of microwave signals using GaAs FETs. Electronics & Communication Engineering Journal, Volume 6, Issue 1, Februar 1994, pp.2–30.
- [17] Vian, J., Popovic, Z.:
Efficient optical control of microwave circuits, antennas and arrays. Microwave Photonics, International Topical Meeting, 11-13 September 2000, pp.27–30.
- [18] Zuliani, M., Petosa, A., Ittipiboon, A., Roy, L., Chaharmir, R.:
Microstrip periodic leaky-wave antenna with optical control and beam scanning capabilities Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE Volume 2, June 2004, pp.183–1834.
- [19] Bijamov, A., Paroshina, I., Karkashadze, D.:
Simulation of optical control devices based on photonic band structures. Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED 2003, Proc. of 8th International Seminar/Workshop, 23-25 September 2003, pp.59–62.
- [20] Y. Takanashi, K. Takahata, Y. Muramoto:
Characteristics of InAlAs/InGaAs High-Electron Mobility Transistors Under Illumination with Modulated Light. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.46, No.12., December 1999, pp.2271–2277.

Statisztikus nyalábolás és forgalom kötegelés együttes hatása optikai hálózatokban

KERN ANDRÁS, SOMOGYI GYÖRGY, CINKLER TIBOR

BME Távközlési és Média Informatikai Tanszék
{kern, somogyi, cinkler}@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: dinamikus optikai hálózat, GMPLS, forgalomkötegelés, statisztikus nyalábolás

Többrétegű optikai gerinchálózatok nagy sáv szélesség nyújtására képesek. A szükséges erőforrások hatékonyabb kihasználására alkalmas a forgalmak kötegelése (grooming). A kötegelés lényege, hogy ha két forgalmi igény útvonalának van közös része, akkor a két forgalmat egy hullámhosszcsatornába lehet összefogni. A lefoglalt kapacitások hatékonyabb kihasználására ismert másik módszer a forgalmak nyalábolása (multiplexing). A statikus nyalábolás az egyes forgalmi igényeknek nem a maximális sáv szélességet foglalja le, hanem a maximálisnál kevesebb, de az átlagosnál nagyobb. A cikk célja a két módszer együttes hatásának vizsgálata. Az eredmények azt mutatják, hogy a statisztikus nyalábolás önmagában nem eredményez nagyobb átbocsátóképességet: optikai kapcsolókat feltételezve a nyereség elhanyagolható. Ugyanakkor a nyalábolás és a kötegelés együttes alkalmazása nagymértékben megnöveli a kiszolgált igények mennyiségét.

1. Bevezetés

A modern gerinchálózatok szinte kizárólag optikai átvitelre alapulnak, hiszen ez a technológia hatalmas sáv szélességet biztosít. Egy optikai csatornán akár több 10 Gbit/s is elérhető, ráadásul a hullámhossz nyalábolás (Wavelength Multiplexing, WDM) alkalmazásával egy fényvonal több jel egyidejű továbbítására is képes párhuzamos csatornákon. Az összefogott csatornák számától függően beszélhetünk ritka hullámhossz-osztásos (Coarse WDM, CWDM) vagy sűrű hullámhossz-osztásos (Dense WDM, DWDM) rendszerekről. DWDM rendszerek esetén akár több Tbit/s sebesség biztosítható. Ebben a hálózatban az összeköttetéseket fényutakkal, hullámhossz-csatornákkal sorozatával valósítják meg.

Nyilvánvaló cél kapcsolt szállító hálózatok esetén is, hogy a rendelkezésre álló erőforrások a lehető leghatékonyabban legyenek kihasználva, azaz a lehető leg-

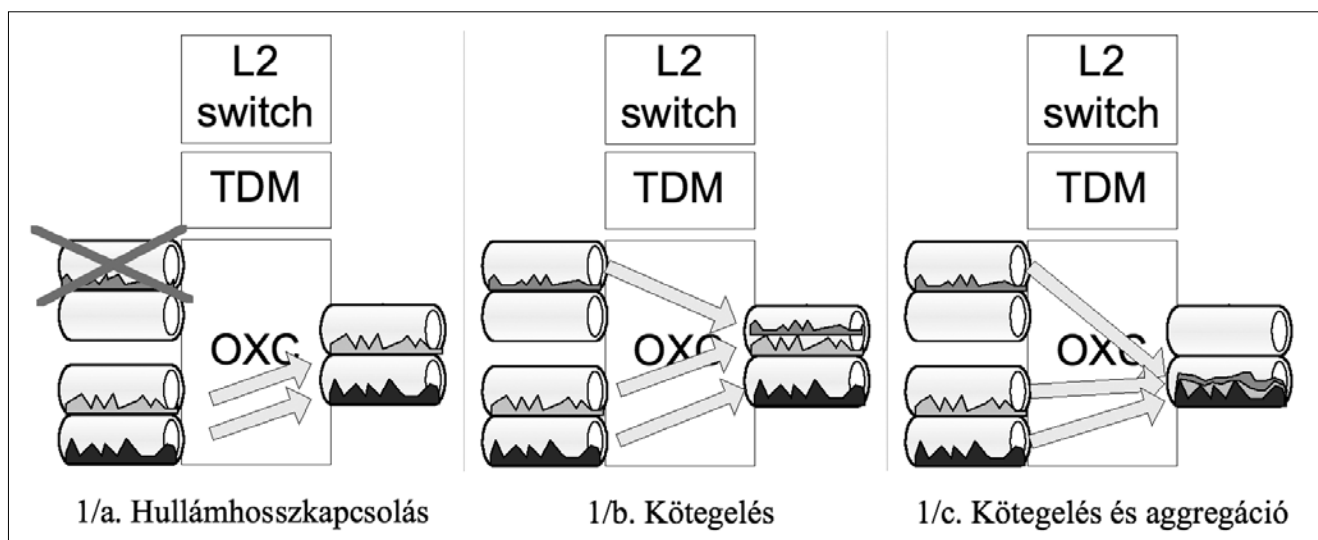
több igényt szolgáljuk ki. Az erőforrás foglalásakor két problémával szembesül a hálózat üzemeltetője:

(1) a forgalmi igények mérete általában nagyságrendekkel kisebb, mint a hullámhosszcsatornák mérete, és

(2) a tényleges forgalom nagysága változó és az idő jelentős részében nem használja ki a lefoglalt kapacitást. Az első problémára megoldást jelent a *forgalmak kötegelése* (traffic grooming) [2], míg a második esettel a *statisztikus nyalábolás* (statistical multiplexing) vagy aggregáció témaköre foglalkozik. A két területnek külön-külön komoly irodalma van, azonban a tudásunk szerint a két lehetőség együttes hatását nem vizsgálták még kapcsolt optikai hálózatokban. Ezt a feladatot tűztük ki célul.

A következő példán keresztül illusztráljuk a fenti problémát. Az 1. ábrán látható csomópont 3 kapuval rendelkezik, kapuként két-két hullámhossz-csatornával. A csomópontba három forrásból érkezik forgalom és ugyan-

1. ábra Kötegelés és aggregáció együttes hatása a kapcsolásra



abba a cél csomópontba tartanak. A három irányból érkező forgalom három hullámhossz csatornán érkezik.

Amennyiben csak hullámhosszakot lehet kapcsolni (1/a. ábra), akkor a három csatornából csak kettőt lehet átvinni. A harmadik forgalmat nem tudjuk kiszolgálni: a kapcsolat-felépítési fázisban blokkolódik. Ha lehetővé tesszük a forgalmak kötegelését, akkor elvileg egy csatornában is összefoghatnánk a három forrásból érkező forgalmakat. Azonban a forgalmak leíróiban megadott maximális sáv szélesség igények összege meghaladná a csatorna kapacitását, ezért csak két csatornában tudjuk átvinni (1/b. ábra). Ha viszont lehetővé tesszük, hogy a forgalmak számára nem a maximális sáv szélesség-igényeik összegét foglaljuk, hanem kevesebbet – hogy pontosan mennyit, később kerül részletezésre –, akkor mindhárom forgalom átvihető egy csatornán (1/c. ábra).

Amennyiben csak teljes hullámhosszakot lehet kapcsolni (nincs kötegelés), akkor az aggregáció figyelembe vételének a jelen példában nincs értelme, hiszen az csak akkor eredményezne bármekkora nyereséget is, ha egy csatornába több forrásból érkező forgalmakat össze lehetne fogni.

2. Erőforrás-foglalás és útvonalválasztás kapcsolt optikai hálózatokban

Kapcsolt optikai hálózatokban statikus erőforrás-foglalásról beszélünk abban az esetben, amikor a forgalmi igényeket leíró mátrix időben nem változik, tehát az igények statikusak. Ekkor az elvezetési probléma megfogalmazható optimalizálási feladatként. Ezzel szemben a valós hálózatokban a forgalmi igények véletlenszerű időpillanatokban érkeznek, és szintén véletlenszerű „tartási idő” után megszűnnek. Ezt az igényformát egy dinamikus foglalási modell írja le, azaz a forgalomnak mind az intenzitása mind a térbeli eloszlása időben változik. Ekkor a feladat az érkező forgalmi igények egymás után történő elvezetése a hálózatban.

2.1. Hullámhosszgráf-modell

A transzport hálózatokban történő dinamikus útvonalválasztás szimulációjához az úgynevezett hullámhosszgráf-modellt használtuk fel [3]. A modell alapötlete, hogy két csomópont között futó fényszálak annyi párhuzamos éllel írjuk le, ahány hullámhossz áll rendelkezésre. Emellett minden fizikai eszközt a típusától függő részgráffal írjuk le, ami lehetőséget biztosít különféle típusú csomópontok egyszerű és szemléletes leírására. Ez a tulajdonság a modell egyik legfontosabb erénye. Jelen cikkben két, képességeiket tekintve lényegesen eltérő csomópont típust tételezünk fel:

Az *optikai vezérelt rendezők* (Optical Cross Connect, OXC) a hullámhossz csatornák fényszálak közötti kapcsolását valósítják meg. Továbbá rendelkeznek optikai leágasztató (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) funkciókkal is, ezért forgalmi igények belépési és kilépési pontjai lehetnek.

Ezzel szemben a *kötegelő (grooming) csomópontok* kiegészítik az OXC csomópontok tulajdonságait azzal, hogy több forgalom egy közös hullámhosszcsatornába történő összefogására, azaz kötegelésére is képesek. A kötegelést részletesebben a következők fejezetben járjuk körül.

2.2. Forgalmkötegelés

A transzport hálózatokba érkező forgalmi igények mérete tipikusan sokkal kisebb, mint egy hullámhosszcsatorna kapacitása. Egy forgalmi igényhez egy teljes csatorna hozzárendelése az esetek nagy részében erőforrás pazarló lenne, ezért lehetőleg meg kell osztani a fényutakat több forgalmi igény között. Közös forrással és céllal rendelkező igényeket az elektromos rétegben össze tudjuk fogni és végig egy fényúton átvinni. Ezt *nyalábolásnak* nevezzük. Ez a módszer azonban nem alkalmazható abban az esetben, amikor a forgalmi igényeknek nem ugyanaz a forrása vagy célja.

Ez utóbbi esetben megtehető, hogy a fényutakat a közös szakasz előtt és után megszakítjuk, és ezekben a pontokban az elektromos rétegbe vezetjük a forgalmat. Ott összefogjuk a forgalmakat – például időosztással –, és a közös szakaszon egy csatornában viszik át őket. Ezt a megoldást nevezi az irodalom *forgalom-kötegelésnek*. Általánosságban akkor beszélünk forgalom-kötegelésről WDM hálózatokban, amikor egy vagy több csatornán érkező forgalmakat felsőbb – elektromos – rétegben átcsoportosítjuk (például a céljuk szerint), és csoportonként összefogva egy-egy külön csatornán továbbítjuk őket.

A kötegelés nyilvánvaló előnye, hogy a hullámhosszcsatornák hatékony kihasználását teszi lehetővé. Ugyanakkor az alkalmazásához optikai-elektromos átalakítókra van szükség a kötegelő csomópontokban, amelyek drága eszközök. Emiatt a méretezési fázisban a kötegelés költségét figyelembe kell venni. Ezzel szemben jelen munkában a tervezési illetve méretezési kérdésekkel nem foglalkozunk.

2.3. Statisztikus multiplexelés (aggregáció)

A gerinchálózatok forgalmának jelentős részét az adatforgalom adja, amelynek nagysága időben változó. Ez felveti annak kérdését, hogy mennyi kapacitást is foglaljunk a forgalmi igények számára. Hagyományos megoldás, hogy a lefoglalt kapacitás egyenlő az egyes igények maximális méretének összegével. Ezt nevezzük *determinisztikus multiplexálásnak*, amely azonban túlméretezett hálózatot eredményez. A kihasználatlan kapacitások mennyisége csökkenthető a *statisztikus multiplexálás* alkalmazásával, ahol azt a jelenséget használjuk ki, hogy az egyes források által generált forgalom maximumai nagy valószínűséggel időben nem esnek egybe. Így az aggregált forgalom számára meghatározható egy korlát, amely esetén annak a valószínűsége, hogy az aggregátum meghaladja a választott korlátot egy rögzített kis érték. Ez utóbbi paraméter túlcsordulási (vagy csomagvesztési) valószínűségnek nevezzük, míg a korlát neve effektív sáv szélesség.

Az elméleti alapok taglalása megtalálható F. Kelly cikkében [4]. S. Floyd egy egyszerű módszert javasolt a Hoeffding korlát alapján [5] szükséges effektív sáv szélesség (BW) kiszámolására:

$$BW = \sum_{i=1}^n m_i + \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \cdot \sum_{i=1}^n p_i^2}{2}}, \quad (1)$$

ahol m_i és p_i az i -ik elemi forrás átlagos és maximális sebessége; továbbá ε annak a valószínűsége, hogy az aggregált forgalom nagyobb lesz, mint BW. A módszer előnye, hogy könnyen számolható és konzervatív becslés – azaz garantálja, hogy adott peremfeltételek mellett a sáv szélesség nem lesz nagyobb a kiszámítotttnál. Komoly hátránya, hogy gerinchálózatok esetén a forgalmak már aggregáltak, így az ingadozásuk is kisebb. Emiatt ez a modell meglehetősen pontatlan, és így nem alkalmazható.

Pontosabb modellek alkotásához emiatt feltételezéseket kell tennünk a forgalom természetéről. Tegyük fel, hogy az érkező forgalmak egymástól függetlenek és nagyságuk normális eloszlású. Ez a feltétel gerinchálózatok esetén jól közelíti a valóságot, hisz az egyes igények forgalmi már maguk is aggregátumok. Ekkor alkalmazható például a Guérin által javasolt modell [6], ami szerint a lefoglalandó kapacitás a következőképp számolható:

$$BW = \sum_{i=1}^n m_i + \alpha \cdot \sigma, \quad (2)$$

ahol m_i az egyes elemi forgalmak átlagos sebessége, míg σ az aggregált forgalom szórása. Mivel az elemi forgalmakról feltételeztük, hogy normális eloszlásúak, így az aggregált forgalomról is feltételezhetjük azt. Ekkor annak a valószínűsége, hogy az aggregátum meghaladja a lefoglalt kapacitást (túlcsordulási valószínűség), jól jellemezhető az α paraméterrel. Ahhoz például, hogy a túlcsordulási valószínűség 0,01 legyen, az α értéke 2,33 kell legyen, és $\alpha = 5,61$ esetén, ez a valószínűség 10^{-8} . Mivel további feltételezés, hogy az egyes elemi folyamatok függetlenek egymástól, így az aggregátum szórásnégyzete (σ^2) egyszerűen számolható: megegyezik az elemi forgalmak szórásainak négyzetösszegével.

A Guérin-modell kiterjesztését a [7] taglalja, és több módszert mutat be az α paraméter meghatározására. A modell előnye a könnyű számolhatóság, továbbá, hogy jól modellezi a valós forgalmakat. Ugyanakkor a forgalmi igények leírói között meg kell követelni a forgalom szórását is, vagy azt becsülni kell az egyéb megadott paraméterek (például az átlag és maximális érték) alapján. Ez utóbbi feladat viszont nehézkes.

Lindberger által javasolt közelítés alapötlete, hogy a forgalom eloszlását ekvivalens „Poisson csomókból” álló folyamattal [8] írja le. A kapott formula meghatározza az egyes elemi folyamatok számára szükséges sáv szélességet. Ezt összegezve kapjuk a következő formulát, amely egyenesen arányos az átlagos sáv szélesség-igényekkel (m_i) és a szórásnégyzetekkel (σ^2), valamint fordítottan arányos csatorna kapacitásával (C):

$$BW = \sum_{i=1}^n a \cdot m_i + b \cdot \frac{\sigma^2}{C}, \quad (3)$$

ahol a és b csak a csomagvesztési valószínűségtől (P_{loss}) függ:

$$a = 1 - \frac{\log P_{loss}}{50}, \quad b = -6 \cdot \log P_{loss}.$$

Vizsgálataink során az (1,18; 63) paraméterpárt használtuk, amellyel az elérhető túlcsordulási valószínűség $P_{loss} = 10^{-9}$.

A következő kapacitásbecslő képlet (SCRPCR) esetén a lefoglalandó kapacitás megegyezik az átlagos sáv szélesség igények összegével, és ezt az összeget növeli meg a maximális és átlagos sáv szélesség igény különbségei közül a legnagyobbval:

$$\sum_{i=1}^n m_i + \max_{i=1..n} \{p_i - m_i\}. \quad (4)$$

A különféle aggregációs technikák irodalma bőséges, azonban a cikknek nem célja az összes módszer megvizsgálása ezért ez utóbbi három módszert (2, 3, 4) vizsgáltuk. Az elsőt annak korlátai – rossz becslést ad a gerinchálózati forgalmak esetén – miatt nem alkalmazzuk.

3. Statisztikus multiplexelés és kötegelés együttes vizsgálata

Mind a forgalom-kötegelésnek, mind a statisztikus multiplexelésnek nagy irodalma van, azonban tudásunk szerint az együttes hatásukat nem vizsgálták kimerítően. Cikkünk ezt a területet célozza. Az együttes hatást szimulációval vizsgáltuk. A fő eszköz a tanszéken fejlesztett Intra- és Interdomain Routing (IIDR) nevű diszkrét eseményvezérelt szimulátor, amely egy adott hálózat dinamikus viselkedését szimulálja különböző forgalmi terhelések esetén.

Az üzemeltető csomópontok közötti összeköttetést nyújt szolgáltatásként, amelyek számára erőforrásokat foglal le. Az összeköttetések paramétereit (forrás és cél eszköz címe) és leírót (tartási ideje, átlagos és maximális sáv szélesség-igénye) együttesen forgalmi igénynek nevezzük. A szimuláció során ezek az igények egymás után lépnek be a hálózatba, és a forgalomirányítási algoritmus egyesével vezeti el őket.

Első lépésben az igény forrása és célja között egy megfelelő útvonalat keres. Az útvonal keresését egy logikai gráf felett végzi, amely a korábban bemutatott hullámhossz-gráf modellen alapul. Ebből a gráfból az útkeresés idejére törölődnek azok az élek, amelyen nem áll rendelkezésre elegendő szabad kapacitás az igény számára. Így az útválasztás megoldható legrövidebbút-kereső algoritmusok segítségével. Ekkor, ha létezik út az igény forrása és célja között, akkor az út mentén mindenütt rendelkezésre áll a szükséges mennyiségű erőforrás, így azok lefoglalásra kerülhetnek. Ellenkező esetben az igény blokkolódik, elkerülendő a későbbi torlódást. Egy igény törlése esetén a szimulátor az igényhez rendelt erőforrásokat egy lépésben szabadítja fel.

A különböző vizsgált aggregálási modellek hatása az útvonal-választási lépésben jelenik meg. Statisztikus multiplexálás esetén annak ellenőrzése, hogy rendelkezésre áll-e a szükséges kapacitás, következőképp történik. A forgalomirányítási algoritmus meghatározza az effektív sávszélességet abban az esetben, ha az aktuális igény használná az adott élel. Ha ez az érték nagyobb, mint a rendelkezésre álló kapacitás, akkor nem áll rendelkezésre a szükséges hálózati kapacitás, és az adott él törlődik a logikai gráfból.

A forgalmi igényeket egy erre a célra kifejlesztett alkalmazás generálja, még a szimuláció előtt, lehetővé téve, hogy ugyanazon a forgalmi mintán, több független szimulációt lehessen elvégezni. A szimulációk futtatását, valamint a kimenetek alapján az ábrák készítését perl szkriptek segítségével végezzük el.

3.1. Topológiák

A szimulációkat a COST 266 Európai Unió projekt referenciahálózatainak végeztük [8]. Az egyik a COST 266-os maghálózati topológia (Core Topology), a másik a COST 266-os gyűrűs topológia (Ring Topology).

A maghálózati topológia 16 csomópontot és 23 élel tartalmaz, a csomópontok fokszáma kisebb, mint három. A gyűrűs topológia 28 csomópontot és 35 élel tartalmaz, itt a csomópontok átlagos fokszáma 2,5. Mindkét topológia esetén két csomópont között 4 hullámhosszcsatornát definiáltunk, egy csatorna kapacitása 1000 kbit/s.

3.2. Forgalmi igények

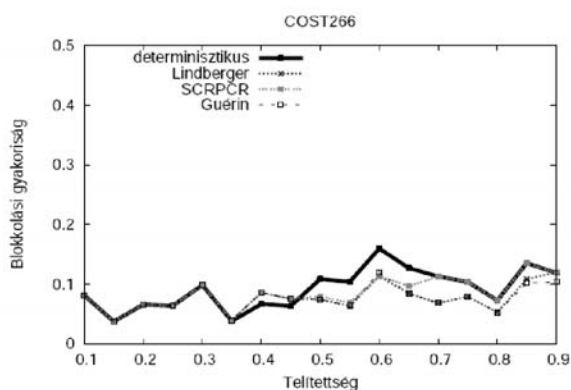
Minden forgalmi igényt hat paraméter írt le. A *forrás és cél* csomópontok határozzák meg az igény végpontjait. Végpont a topológia bármely csomópontja lehet. A hagyományos megközelítéssel szemben, az igény sávszélesség-igényét két paraméter, az *átlagos és a maximális méret* jellemzi. Determinisztikus nyálábolás esetén elegendő lenne a maximális méret is, de a többi modell esetén a másik paraméterre is szükség van. Az igény *belépési ideje* jelöl az időpontot, amikor a forgalmi igényt el kell vezetni. Az utolsó paraméter az igény *tartási ideje*.

3.3. Vizsgált paraméterek

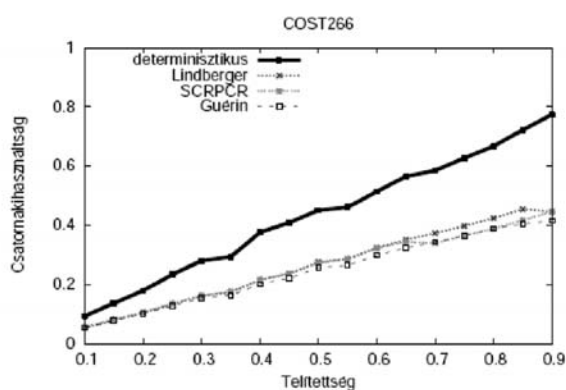
Blokkolási valószínűség a hálózat működése szempontjából talán a legfontosabb jellemző. Azt mutatja meg, hogy a forgalmi igények közül mennyit tudott a hálózat kiszolgálni és mennyi maradt kiszolgáltatatlannal. Ha a blokkolási valószínűség alacsony, akkor az adott hálózaton több igényt lehet átvinni, ami több bevételt eredményezhet.

Összeköttetések telítettsége (szakaszkihasználtság) azt mutatja meg, hogy mekkora az egyes hálózati összeköttetések átlagos terheltsége. Ez a paraméter az egyes eljárások hatékonyságának jó mércéje. Ugyanis, ha kevésbé kihasznált összeköttetések vannak a hálózatban, akkor azokon az éleken több forgalmat lehetne átvinni, így több igényt lehetne kiszolgálni. Ez egyúttal csökkentené a blokkolási valószínűséget is.

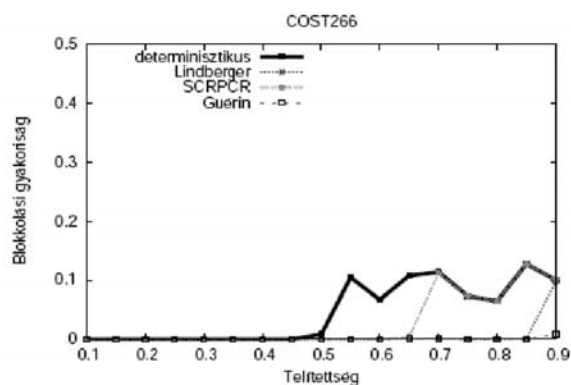
2. ábra Szimulációs eredmények



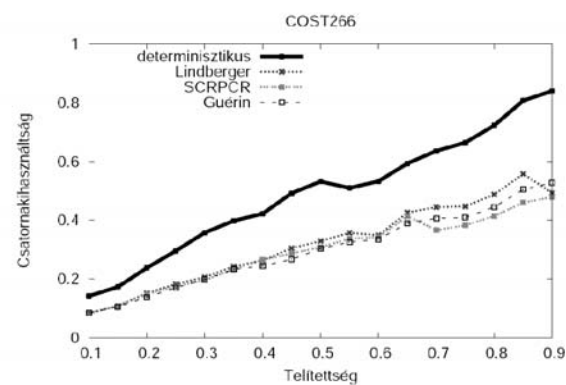
2/a. Blokkolási valószínűség OXC esetben



2/b. Szakasz telítettség OXC esetben



2/c. Blokkolási valószínűség kötegeléses esetben



2/d. Szakasz telítettség kötegeléses esetben

4. Eredmények, összefoglalás

A szimulációkat a két topológiák külön-külön végeztük el. Mindkét topológia esetén két alesetet határoztunk meg. Az első esetben a csomópontok OXC-k voltak, míg a második esetben a csomópontok kötegelési képességgel is rendelkeztek. Ebben a négy alesetben vizsgáltuk meg a blokkolási valószínűséget és csatornakihasználtságot. A forgalmak méretének és dinamikájának leírásához két jellemzőt vezettünk be: a forgalmi igény maximális sávszélesség paraméterének és a hálálhosszak kapacitásának arányát (telítettség); illetve az igények átlagos és maximális méretének az arányát (változékonyság). A következőkben a blokkolási valószínűséget és a szakaszkihasználtságot vizsgáljuk e két paraméter változásain keresztül. Mindkét topológián hasonló mérési eredményeket tapasztaltunk.

A következő szimulációk során az egyes forgalmi igények méretét változtattuk a csatorna kapacitásának 0,1-szereséről 0,9-szeresére. Továbbá feltételeztük hogy az igények maximális és átlagos sávszélességének aránya, azaz a változékonysága 2:1 (2. ábra).

Az ábrákról azt olvashatjuk le, hogy ha OXC csomópontok esetén (2/a), a négy nyálábolási modell szinte teljesen azonos blokkolási eredményt ér el. Ugyanakkor a becsült szakaszkihasználtság (load ratio) lényegesen eltér, és függ a aggregálási modelltől (2/b), de ez a szabad kapacitás kihasználatlanul marad. Ha azonban kötegelést is lehetővé tesszük, az aggregálási modellek között nagy különbség mutatkozik a blokkolási valószínűségek terén (2/c). Determinisztikus esetben a blokkolás 0, ha az igények mérete legfeljebb a fele a link kapacitásának. Ugyanakkor a legjobb teljesítményt nyújtó Guérin-modell esetén 0 blokkolást mértünk, míg a telítettség a 0,9-t el nem éri. A szakasz kihasználtság (2/d) valamivel magasabb, mint OXC esetben, és az összes modell esetén visszaesés figyelhető meg. Ez egybeesik azzal a ponttal, amikor a blokkolási valószínűség 0-ról elmozdul. Ennek oka, hogy amikor a blokkolás hirtelen megnő, kevesebb igény marad a hálózatban, így kevesebb igény számára foglalunk erőforrást.

A fenti méréseket elvégeztük az igények különböző változékonysága mellett. Tapasztalataink azt mutatták, hogy a forgalom változékonyságát növelve a statisztikus multiplexálás egyre hatékonyabbá vált a determinisztikus nyálábolással szemben, ha volt kötegelés.

Megállapítható tehát, hogy OXC kapcsolók alkalmazása esetén nincs jelentős aggregációs nyereség, azaz, nem tudunk több forgalmat elvezetni a hálózatban. Ezzel szemben az igények kötegelésével a statisztikus multiplexálás alkalmazásával a blokkolási valószínűség lényegesen csökkent a vizsgált esetekben, emiatt több igényt tudtunk elvezetni.

A cikkben a forgalom kötegelésének és statisztikus multiplexálásának együttes hatását vizsgáltuk többretegű optikai gerinchálózatokban. Mivel nem célunk ezen eljárások teljes tárházának bemutatása, ezért kiválasztottunk négy megközelítést és azokat ismertettük.

A hálózat dinamikus viselkedését – a tanszéken fejlesztett eszköz segítségével –, szimulációkon keresztül vizsgáltuk. Ezek azt mutatták, hogy ha a forgalmakat nyáláboljuk (nem kötegeljük) a statisztikus multiplexálás nyeresége csak a lefoglalt kapacitás csökkenésében nyilvánul meg, a blokkolási gyakoriság nem változik. Emiatt a hálózatban több igényt elvezetni nem lehet.

Nyilvánvaló tény, hogy a forgalom kötegelése esetén az aggregáció a blokkolási valószínűségeket csökkenteni fogja, azonban annak nagysága kérdéses volt. A cikkben megmutattuk, hogy ez a különbség nagy lehet: például Guérin-modelljét feltételezve, a hálózat 0,9 telítettségi (forgalmi igény maximális sávszélesség-igényének és egy csatorna méretének aránya) paraméter mellett kezd el blokkolni, míg determinisztikus multiplexelés esetén már 0,5-s érték esetén.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői ezúton szeretnének köszönetet mondani Szigeti Jánosnak és Hegyi Péternek a szimulátor alapváltozatának fejlesztéséért, valamint Geleji Gézának a perl nyelvű vezérlő szkriptekért.

Irodalom

- [1] B. Rajagopalan, J. Luciani, D. Awduche: „IP over Optical Networks: A Framework” IETF RFC 3717, <http://www.rfc-archive.org/getrfc.php?rfc=3717>
- [2] E. Modiano, P.J. Lin: „Traffic Grooming in WDM Networks”, IEEE Communications Magazine, Vol.39., No.7, pp.124–129, July 2001.
- [3] Cs. Gáspár, G. Makács, T. Cinkler: „WR-DWDM hálózatok konfigurálása”, Híradástechnika, Vol. LVIII., 2003/7, pp.2–9.
- [4] F. Kelly: „Notes on effective bandwidths,” in Stochastic Networks: Theory and Applications, F. Kelly, S. Zachary, I. Ziedins, Eds. Oxford University Press, 1996., pp.141–168.
- [5] S. Floyd: „Comments on measurement-based admissions control for controlled-load services,” beadva: CCR, 1996 július, <http://www.icir.org/floyd/papers/admit.ps>.
- [6] R. Guérin, H. Ahmadi: „Equivalent capacity and its applications to bandwidth allocation in high-speed networks”, IEEE Journal on Selected Areas Comm., Vol.9, pp.968–981., 1991. szeptember.
- [7] L. Noirie: „Mixed tdm and packet technologies as a best compromise solution to ensure a cost-effective bandwidth use with the current traffic evolution,” in Next Generation Internet Networks Conference (EuroNGI), Róma, 2005.
- [8] K. Lindberger: „Dimensioning and design methods for integrated ATM networks,” in Proceedings 14th Int. Teletraffic Congress 1994, pp.897–906.
- [9] Robert Inkret, Anton Kuchar, Branko Mikac: „Advanced Infrastructure for Photonic Networks”, Extended Final Report of Cost Action 266, <http://www.ure.cas.cz/dpt240/cost266/docs/COST266>

Tájékoztatás a Híradástechnika szerzőinek

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

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

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

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

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

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

• **Lektorálás:** A cikkek különböző minősítési folyamatnál értékes pontokat jelenthetnek. Az új eredményeket tartalmazó cikkeket a szerkesztőség bírálja. A bírálók véleménye alapján a cikket visszaadhatjuk a szerzőnek javításra, esetleg átdolgozásra. Minden félév végén az azt megelőző öt számból kiválogatjuk azokat a cikkeket, melyek a külföldi, nem magyar anyanyelvű olvasók számára is érdekesek lehetnek. Ezeket angolra fordítva a 6. és 12. számban „Selected Papers” címen jelentjük meg. Ez idegen nyelvű publikációnak számít.

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

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

• **A beküldés módja:**
A cikkek eljuttathatók a főszerkesztőhöz:
Szabó Csaba Attila
(BME, Híradástechnikai Tanszék, szabo@hit.bme.hu)
vagy a HTE titkárságára:
Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület
(Bp., Kossuth L. tér 6-8. IV.emelet, info@hte.hu).

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

A Szerkesztőbizottság

A grid hálózatokban alkalmazható jelzésarchitektúrák és helyreállítási mechanizmusok vizsgálata

LAKATOS ZSOLT

BME Híradástechnikai tanszék, lakatos@hit.bme.hu

SZEGEDI PÉTER

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

Lektorált

Kulcsszavak: grid hálózatok, jelzeshálózatok, késleltetési modellek, helyreállítás, optikai hálózatok

A távoli erőforrások összekapcsolására alkalmas grid hálózat, számos korábban nem létező követelményt támaszt az őt kiszolgáló optikai transzportálóhálózattal szembe. Ilyen követelmény lehet a helyreállítási idő skálázhatósága és a szükséges minőségi paraméterekkel rendelkező kapcsolatok biztosítása, vagyis a „túlszolgáltatás” elkerülése. Feltételezve, hogy a helyreállítási idő elsősorban az alkalmazott jelzésrendszertől és a helyreállítási utak hosszától függ, ezek figyelembe vétele elkerülhetetlen a tervezés során. A következőkben bemutatunk egy analitikus modellt a vezérlési sík megvalósításainak értékelésére, illetve ismertetjük az alkalmazható helyreállítási mechanizmusok ILP alapú tervezési folyamatát. A kidolgozott modellek helyességét és alkalmazhatóságát illusztratív esettanulmányok bizonyítják.

1. Bevezetés

Nyilvánvaló, hogy a kutatóhelyek lokális számítási erőforrásainak fejlődése nem képes lépést tartani a vele szemben támasztott követelményekkel. A nagyobb számítási kapacitások létrehozása érdekében a térben elosztott szabad erőforrások összekapcsolása tűnik észszerűnek.

A grid hálózatok rugalmas, biztonságos, koordinált erőforrás-megosztást tesznek lehetővé a dinamikusan hozzájuk kapcsolódó felhasználók között. A grid hálózatok segítségével áthidalhatóak a távolságokból, szervezeti egységek felépítéséből, számítógép architektúrából és szoftverekből származó korlátok, virtuálisan végtelen nagy számítási erőforrást biztosítva a felhasználók számára. A grid infrastruktúra-szállítók számos egymástól eltérő szempontok szerint, például a grid által kiszolgált szervezeti egységek szerkezete vagy a felépítésében részt vevő erőforrások alapján csoportosították a grid alkalmazásokat. Ebben a cikkben a következők három csoportra osztjuk fel a grid alkalmazásokat:

- „Számítási” grid hálózatok (*Compute Grid*) a hatékonyabb kihasználtság elérése érdekében összefogják és koordinálják a felépítésükben részt vevő számítástechnikai erőforrásokat. Többnyire olyan problémák megoldására alkalmazzák, amelyek több független szervezet együttműködését igénylik.

- „Adat”-grid hálózatok (*Data Grid*) nagymennyiségű adathalmazon végeznek műveleteket. Tipikusan az adat-orientált feldolgozásokra optimalizáltak. Habár nagymennyiségű tárolókapacitást használnak fel, eltérnek a klasszikus adattárolási hálózatoktól.

- „Alkalmazási” grid hálózatok (*Utility Grid*) az értékesíthető számítási erőforrások gyűjteménye, amelyek felügyeletét és menedzselését az őt működtető szolgáltató végzi el. A felhasználók szükség esetén képesek a lokális erőforrásaikat bővíteni az Alkalmazás grid hálózatoktól vásárolt számítási idő megvásárlásával.

A cikkben a grid hálózatok transzportálóhálózatokkal szemben támasztott követelményeiket a MUPBED projekt alapján határoztuk meg. Az Európai Unió támogatásával zajló IST-FP6 MUPBED projekt a kutatóhálózatokban alkalmazott technológia vizsgálatával foglalkozik, beleértve a grid alkalmazásokat is [3].

A továbbiakban a lehetséges alkalmazások közül kizárólag az *Alkalmazás grid hálózatokra* koncentrálunk, ugyanis az ezeken futó *Katasztrófa Helyreállítás (KH, Disaster Recovery)* és az *Üzleti Folytonosság (ÜF, Business Continuity)* alkalmazások igénylik a legmegbízhatóbb transzportálóhálózatot, illetve ezek támasztják a legszigorúbb minőségi követelményeket.

2. Grid alkalmazások és követelményeik

Mivel a grid az elosztott erőforrások koordinált használatára épül, elkerülhetetlen az alatta lévő transzportálóhálózat reagálása a sávszélesség igény, a hálózatminőség és az összeköttetések megváltozására. Az Alkalmazási grid hálózatok esetén elkerülhetetlen az olyan skálázható architektúra használata, amely képes rugalmasan biztosítani az eltérő erőforrás-típusok számára a nekik megfelelő QoS paramétereket. A jelenlegi grid implementációk gyakran a hagyományos harmadik rétegbeli protokollokra épülnek, mellőzve a megkövetelt hálózatminőség garantálását.

Az optikai transzportálóhálózat minősége jelentős szerepet játszik az alkalmazás grid hálózatok szempontjából. Az optikai hálózatokban létrejövő kapcsolatok felépítését dinamikusan, közvetlenül a grid alkalmazások vezérlik, lehetővé téve az eltérő szolgáltatási paraméterek alkalmazását minden egyes kapcsolat számára. A potenciális minőségi leírók lehetnek az optikai összeköttetések rendelkezésre állása, a helyreállítási és a ki-esési idő, a kapcsolatok prioritása, valamint a fizikai rétegben mért jelszint degradáció.

Az „alkalmazási” grid hálózatok számára nehéz általános védelmi követelményrendszert előírni, ugyanis ezek szorosan függnek éppen futtatott alkalmazások egyedi tulajdonságaitól. Napjainkban számos bizonytalanság alakult ki a két legnépszerűbb grid alkalmazás, a Katasztrófa Helyreállítás és az Üzleti Folytonosság pontos definíciója körül. Hierarchikus megközelítés esetén, a legfelső szinten az ÜF áll, vagyis ez integrálja önmagába az összes alacsonyabb szintű funkciót. Egy szinttel lejjebb található meg a KH terv, amely általában magába foglalja az adatmentést, adat-helyreállítást, valamint a hálózathédelmet. Ugyanakkor a valódi KH sokkal többet jelent, mint az adatmentés, mert egy adott esemény bekövetkezésekor az adatok vagy az egész üzleti folyamat tükrözésével képes sokkal komplexebb folyamatok helyreállítására is [1].

Az ÜF és KH alkalmazások esetén a hálózattal szemben támasztott követelmény lehet:

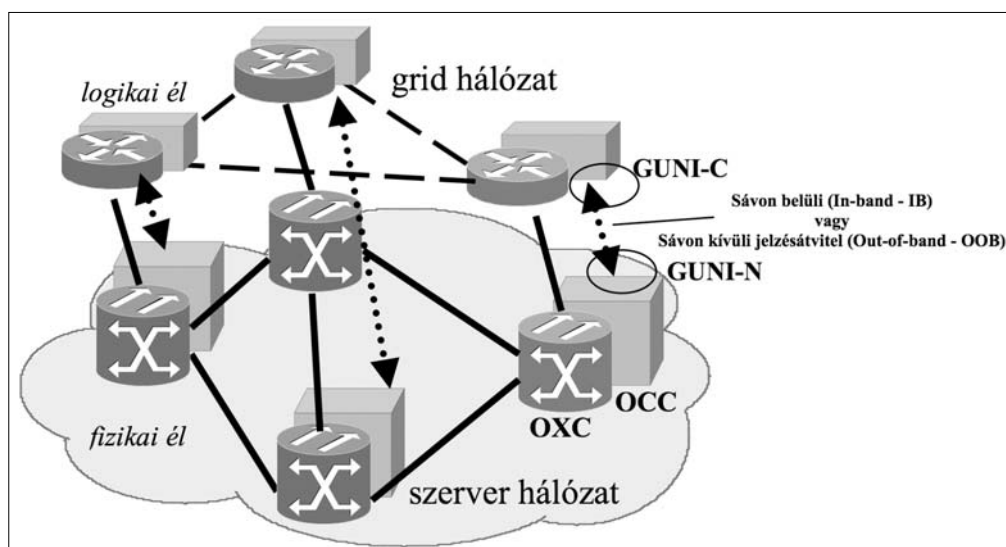
- Hálózat megbízhatóság:
 - MTBF (Mean Time Between Failure) és
 - MTTR (Mean Time To Restore) paraméterek;
- Az igény szerint létrehozott optikai összeköttetések felépítési ideje és késleltetése;
- Ütemezési idő többszörös érkezés esetén;
- Adatintegritás és adatbiztonság.

Az optikai hálózatok esetén minőségi követelmény a hálózat megbízhatósága. Az alkalmazás grid hálózatok helyreállítási-ideje érzékeny alkalmazásokat futtatnak, ezért az automatikus (öngyógyító) védelmi mechanizmusok használata elengedhetetlen kábel-meghibásodások hatásainak kivédésére. A MUPBED projekt célja olyan hálózat kialakítása, amely képest ezt az igényt kielégíteni [2,3].

Hasonlóan fontos a hálózatban létrejövő új összeköttetések felépítési ideje is. A kapcsolatok felépítési ideje alapvetően a hálózatban alkalmazott jelzéshálózat architektúrájától és ennek a konkrét megvalósításától függ.

Az ütemezés szintén fontos szerepet játszik a grid alkalmazások esetén, mert többszörös beérkezés esetén fair ütemezéssel szabályozható a kapcsolat-felépítési idő. Megjegyzendő, hogy ÜF és KH esetén hatalmas mennyiségű adat mozgatása is lehetséges, vagyis az általuk használt összeköttetések élettartama a másodperces tartománytól egészen órákig is terjedhet.

1. ábra
A jelzéshálózat szerkezete



3. Az optikai vezérlési síkban alkalmazott jelzésrendszerek

Két lényegesen eltérő megoldás alakult ki a transzport-hálózatok jelzésrendszerének implementálására:

- Sávon belüli jelzésátvitel (In-band, IB)
- Sávon kívüli jelzésátvitel (Out-of-band, OOB)

Sávon belüli jelzésátvitel esetén a jelzési forgalom és az adatforgalom ugyanazt az adatcsatornát használja. A cikkben leírt vizsgálatoknál az SDH fejrészt (Data Communication Channel, DCC) használjuk fel a jelzési adatok átvitelére, melynek maximális adatsebessége az alkalmazott fejrésztől függően 192 bit/s vagy 576 bit/s korlátot nem haladhatja meg.

A sokkal rugalmasabb OTN (Optical Transport Network, ITU-T Rec.G.709) architektúra esetén hasonló célokra a GCC (General Communication Channel), maximum 6 byte-ja használható. Ebben a megoldásban a jelzéshálózat megbízhatósága kellően jó, de a korlátos sáv szélesség egyes esetekben problémát okozhat (például on-line szoftverfrissítés esetén). Alternatív megoldásként, a hasznos adatok szállítására fenntartott mezőkből is rendelhetünk kizárólagos sáv szélességet a jelzésforgalom számára.

Sávon kívüli jelzésátvitel esetén eltérő kommunikációs csatornát alkalmazunk a jelzéshálózat és a hasznos adatok átvitelére. Klasszikus példája a sávon kívüli jelzésátvitelnek az SS7-es (Signaling System 7) hálózat. A napjainkban mindenütt jelenlévő IP következtében a GMPLS képes hálózatok tipikusan külső IP alapú jelzéshálózatot használnak. A sávon kívüli jelzésátvitel hátránya a jelzéshálózat megbízhatóságának biztosítása, illetve a jelzési üzenetek késleltetése. Hasonlóan a korábbi esethez itt is kiemelkedően fontos a jelzési üzenetek biztonságának garantálása.

A jelzési üzenetek eltérő továbbítási módjai mellett különböző üzenet-feldolgozási módok is kialakultak. A jelzési protokollok alapvetően szoftveres úton implementáltak a protokollok nagy komplexitása, illetve a gyakori frissítések szükségessége miatt. A szoftveres megvalósítás hátránya a jelzési üzenetek lassabb feldolgo-

zása, ugyanis az így implementált jelzési protokollok tipikusan néhány száz üzenetet képesek csak feldolgozni másodpercenként. A feldolgozási teljesítménynövelése érdekében a szakirodalom a protokoll hardveres implementációját javasolja [4,6].

Kompromisszumos megoldásként újrakonfigurálható FPGA (Field Programmable Gate Arrays) és szoftveres technikák kombinációjának alkalmazása is felmerült, ami a kellő rugalmasság mellett a feldolgozási teljesítményt is jelentősen megnöveli. Ezt a megoldást alkalmazva a feldolgozási teljesítmény másodpercenként néhány akár százezer üzenetre is növelhető.

4. Jelzési késleltetés illusztrálása a grid UNI modell alapján

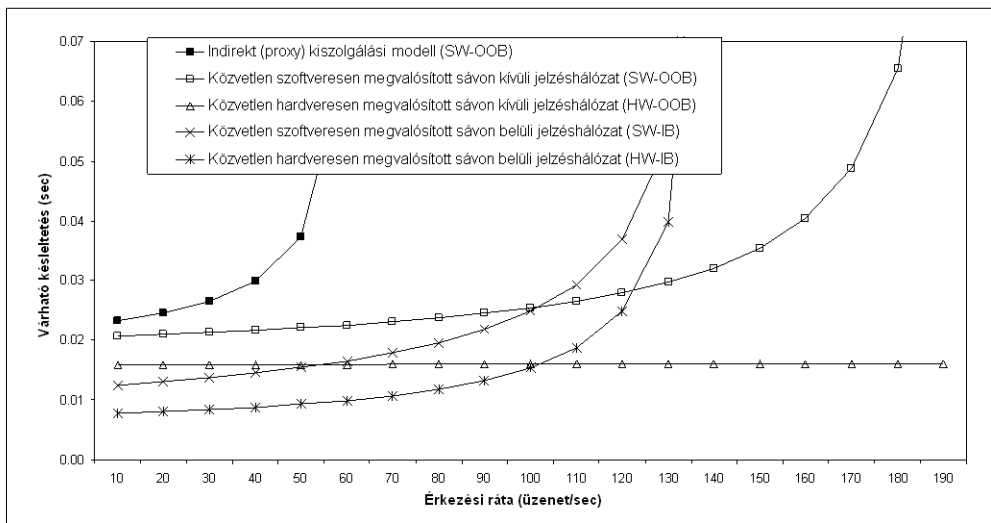
4.1. Analitikus modellek

Ebben a részben egyszerű sorbanállási modellek alapján [7] kiszámítjuk Alkalmazás grid hálózatokban a GUNI (Grid User Network Interface) jelzési modell várható késleltetését. Elsődleges feladat a késleltetést okozó komponensek azonosítása, majd a kiinduló feltételek definiálása. A jelzési késleltetés magába foglalja az alábbi tényezőket:

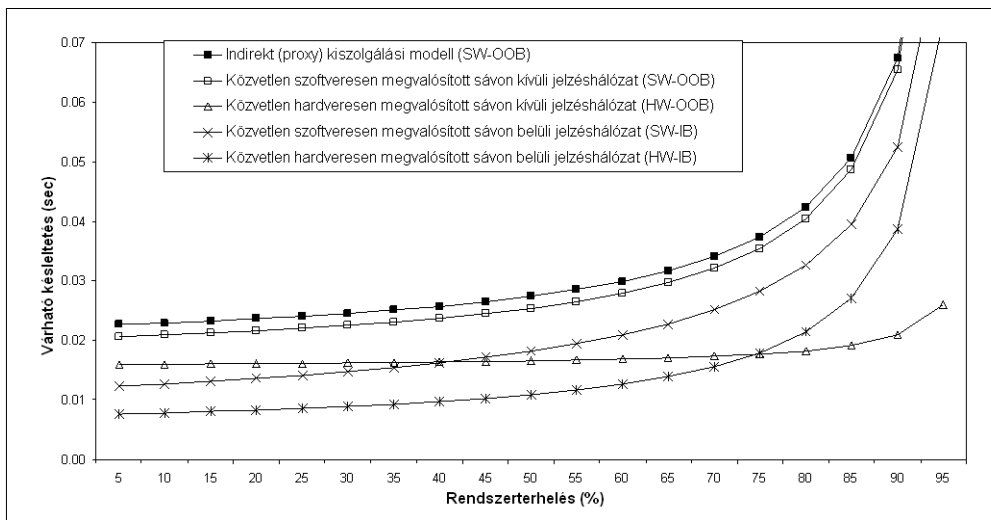
- Az üzenetek feldolgozásából származó késleltetést, ami jelentősen függ a jelzeshálózat feldolgozó képességétől (szoftveres implementáció esetén: 200 üzenet/s, hardveres implementáció esetén 20.000 üzenet/s);
- A jelzési adatok átviteli késleltetését. Ez függ a rendelkezésre álló sávszélességtől, amely sávon belüli esetben maximálisan 576 kbit/s vagy sávon kívüli esetben maximálisan 10 Mbit/s;
- És az átviteli összeköttetésekben származó késleltetést: ez a komponens csak a sávon kívüli esetben fordul elő, mintapéldánk során konstans 15 ms-os késleltetéssel számoltunk.

A következő előfeltevések szükségesek a modell alkalmazásához:

- a jelzési üzenetek érkezési folyamata Poisson-folyamat (λ paraméterű),
- a feldolgozási folyamat exponenciális (μ_{proc}),
- az átviteli folyamat determinisztikus (μ_{tx}),
- az átviteli összeköttetésekben származó késleltetés konstans (T_{link}).



2/a. ábra
A várható késleltetés a grid UNI jelzeshálózat esetén, abszolút skálán



2/b. ábra
A várható késleltetés a grid UNI jelzeshálózat esetén, relatív skálán

A késleltetési modellben az üzenetek feldolgozási folyamatát M/M/1 sorral, az átviteli késleltetést M/D/1 sorral írtuk le. Az analitikus számítások során Little és Burke-tételek alapján [7] kiszámolható két sorból álló tandem rendszer a várható késleltetése. A GUNI jelzési hálózat késleltetésének várható értéke általános esetben a következő módon számítható:

$$E[T_s] = E[T_{M/M/1}] + E[T_{M/D/1}] + T_{link} \quad (1)$$

Alkalmazva az általános képletet (1) az adott műszaki problémára, a késleltetés várható értéke az alábbi módon áll számolható:

$$E[T_s] = \frac{1}{\mu_{proc} - \lambda_{input}} + \frac{1 - \lambda_{input}}{2\mu_{tx} - \lambda_{input}} + T_{link} \quad (2)$$

A modellek alapján kiszámított eredmények a 2/a. és 2/b. ábrán láthatók, az előző oldalon. A 2/a. ábra függőleges tengelyén a várható késleltetés értéke szerepel másodperces léptékkel, a GUNI jelzésüzenetek beérkezési gyakoriságának (üzenet/sec) függvényében. Az indirekt (proxy) kiszolgálási modellben számolt késleltetés emelkedik a leggyorsabban a lehetséges megvalósítási esetek közül.

A közvetlen kiszolgálási modelleknek négyféle változata szerepelt a vizsgálatokban:

a) A sávon kívüli jelzeshálózat és szoftveresen megvalósított üzenet-feldolgozás esetén (Software Processed Out-of-Band, SW-OOB) a várható késleltetés kisebb, mint az indirekt esetben, ugyanakkor a szoftveres feldolgozás teljesítőképességének határát elérve meredeken emelkedik a késleltetés.

b) A szoftveres megvalósítás helyett a hardver alkalmazása (Hardware Accelerated Out-of-Band, HW-OOB) nagyságrendekkel megnöveli a feldolgozó-kapacitást, ezért még nagy terhelés esetén sem tapasztalható számottevő késleltetés, vagyis az ehhez tartozó görbe gyakorlatilag konstans.

c) A sávon belüli jelzésrendszer szoftveres feldolgozással kombinálva (Software Processed In-Band, SW-IB) ugyan az átviteli összeköttetésekből származó késleltetés nem jelenik meg, de a korlátozottan rendelkezésre álló sáv szélesség ellensúlyozza ezt. Az SW-IB alacsony terhelésen jobb teljesítményt nyújt (55 üzenet/sec), mint a HW-OOB és közepes terhelésnél kisebb késleltetést eredményez (100 üzenet/sec), mint a SW-OOB.

d) A sávon belüli jelzeshálózatoknál, a hardveres jelzésüzenet feldolgozás (HW-IB) felülmúlja a szoftverest (SW-IB).

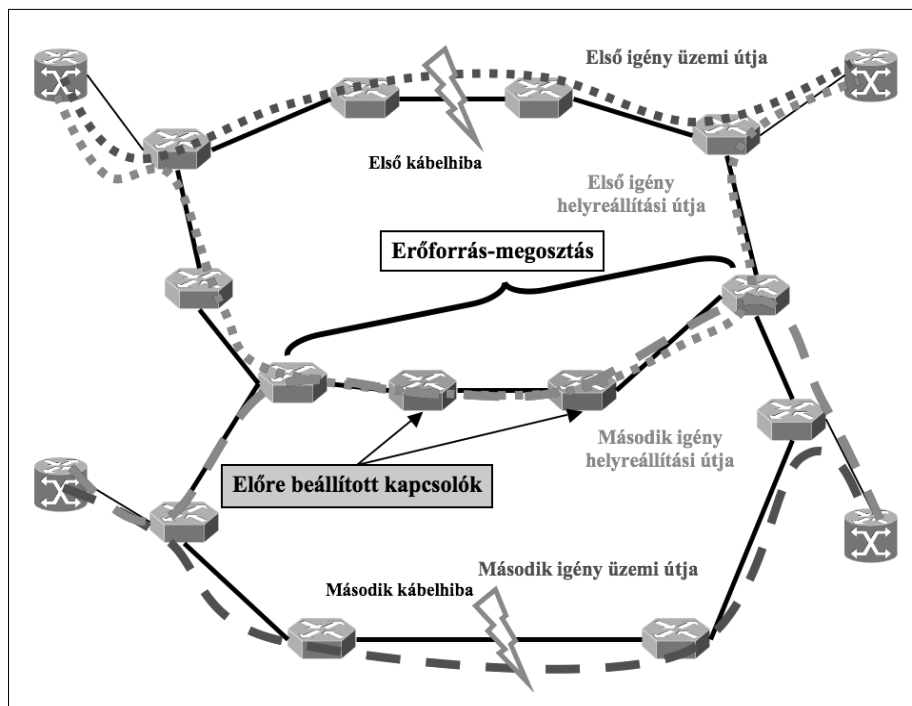
A 2/b. ábrán a várható késleltetés értékei találhatók meg a rendszer relatív terhelésének függvényében. A 100 százalékos terhelés esetén rendszerben lévő feldolgozatlan üzenetek száma a tandem sorok mindegyikében a végtelenhez közelít, vagyis a rendszer instabil állapotba kerül. Általános tendenciaként megállapítható, hogy a közvetlen kiszolgálási modellek mindegyike felülmúlja az indirekt esetet. Emellett a közvetlen megvalósításoknál 40 százalékos terhelés alatt az SW-IB felülmúlja a HW-OOB esetet, köszönhetően sávon kívüli megvalósítás magasabb átviteli késleltetésének. Ez a korlát 75 százalékgig terjeszthető ki sávon belüli jelzeshálózat alkalmazásával.

A számítási eredmények alapján megállapítható, hogy a grid hálózatok által elszenvedett transzporthálózati kapcsolási késleltetések, jelentősen függenek az adott transzporthálózat jelzeshálózatának megvalósításától.

5. A grid hálózatokban alkalmazható helyreállítási mechanizmusok

A grid hálózatok szigorú minőségi követelményeinek hatékony kielégítéséhez elengedhetetlen olyan védelmi mechanizmusok alkalmazása, amelyek skálázhatóan kezelik az adott összeköttetések helyreállítási idejét. A jelzeshálózat teljesítménye kritikus a helyreállítási idők szempontjából, ugyanis jelentősen befolyásolja az alkalmazott védelmi mechanizmus végrehajtásának időbeli lefolyását. A következőkben tárgyalt tervezési modell lehetővé teszi az összeköttetések helyreállítási idejének egyenként kezelését.

3. ábra
Az előre bekonfigurált kapcsolók alkalmazása a védelmi utak mentén



A helyreállítási idő arányosnak tekinthető a helyreállítási utakban részt vevő aktív csomópontok számával és az átkonfiguráláshoz szükséges feldolgozási idővel. A helyreállítási idő skálázhatósága a helyreállítási utak mentén előre beállított kapcsolók alkalmazásával érhető el (3. ábra) [5]. Ez a megoldás egyrészt lecsökkenti a kapcsolók feldolgozó kapacitásának terhelését, másrészt a kapcsolók előre bekonfigurálásával csökken a hálózat rugalmassága és ennek következményeként romlik az erőforrások közös használatának lehetősége.

5.1. A helyreállítási idő skálázhatóságának modellezési kérdései

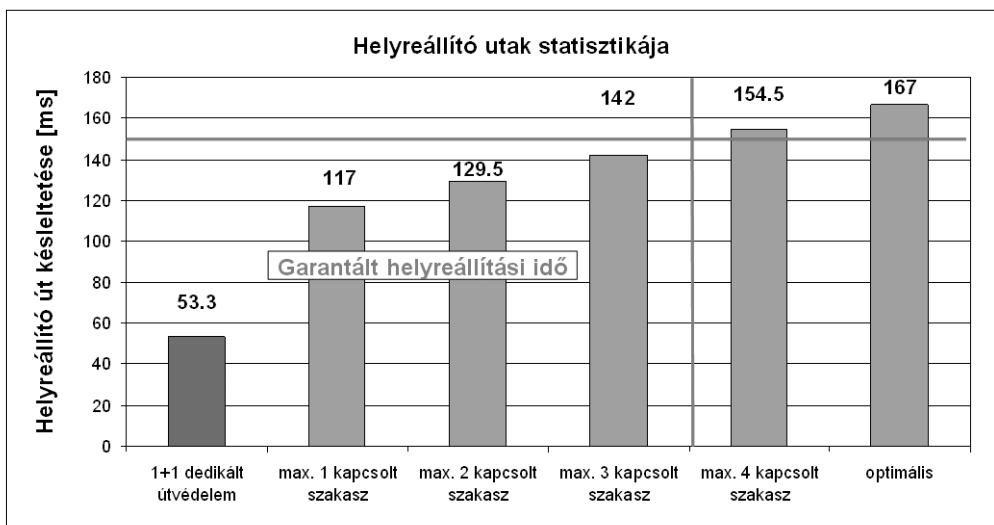
A modell alapvető ötlete az, hogy helyreállítási utak kiválasztása közben figyelembe veszi a helyreállítási időre vonatkozó kritériumot is, vagyis az aktív kapcsolópontot tartalmazó szakaszok számát. Ennek eléréséhez a hálózatmodellben bekerülnek olyan új élek, amelyek a kapcsolópontok előre beállításával megkerülik az aktív kapcsolópontokat. Ezek a megkerülő élek a hálózat fizikai éleire ráültetett logikai élek.

Elméletileg egy teljes gráfot kellene felépíteni a logikai élek segítségével, de néhány egyszerű műszaki megfontolás alapján jelentősen csökkenthető a szükséges logikai élek száma. Mivel a hálózat védelmi mechanizmusa csak egyszeres hibák esetén garantálja a teljes helyreállítást, elegendő minden szomszédos csomópontpár között egy, a nem szomszédos csomópontpárok között két új logikai él bevétele. Amennyiben ezek az új élek a független minimálutak mentén helyezkednek el a fizikai rétegben, garantálják az elkerülő utak meglétét az egyszeres hibáknál.

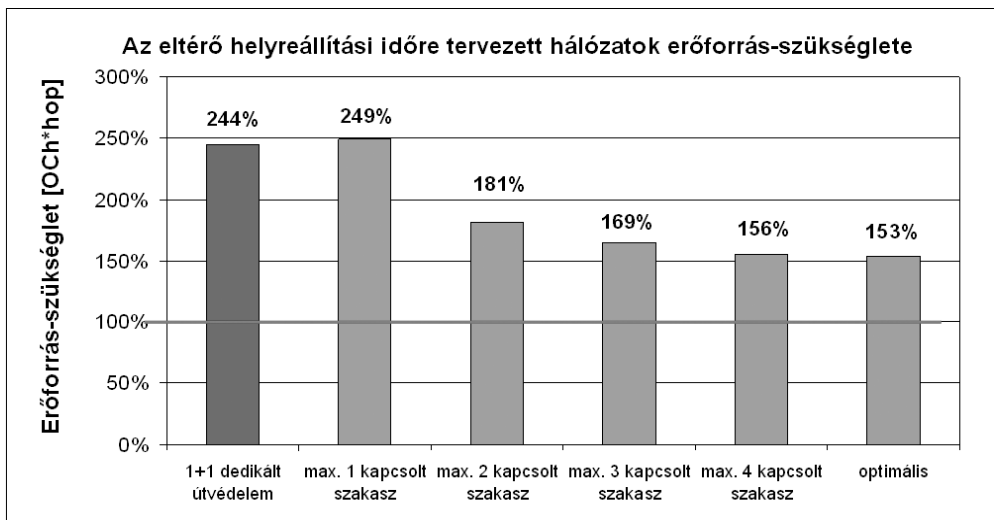
Az új logikai élek bevitelével a modell mérete meg növekedett, az új hálózat éleinek száma nagyobb lett, de a csomópontok száma nem változott. Erre a hálózatmodellre alapozva felépíthető egy útalapú ILP (Integer Linear Programming) formalizálás, amelyet felhasználásra került az esettanulmány előállításakor. Az ILP program egyszerű költségfüggvénye a felhasznált hálózati erőforrásait tartalmazta. A formalizálások megoldása során az ILOG cég CPLEX megoldószoftverét alkalmaztuk [10].

5.2. Illusztratív esettanulmányok

A következő esettanulmányban az ÜF applikációk számára 150 ms-os helyreállítási időkorlátot tételeztünk fel. A hatékony erőforrás-kihasználás érdekében az optikai transzportálózatban osztott erőforrásokon alapuló úthelyreállítást alkalmaztunk.



4/a. ábra
Készletetési értékek
összehasonlítása



4/b. ábra
Erőforrás-szükségletek
összehasonlítása

Az eltérő jelzeshálózati modelleknek köszönhetően lehetővé vált az adott feltételeknek megfelelő hálózat megtervezése. A 4/a. ábrán megfigyelhető, hogy az erőforrás-felhasználás szempontjából optimális megoldás esetén az adott jelzeshálózat (OOB-SW) nagyobb késleltetést eredményez, mint az applikáció által megkövetelt korlát. A helyreállítási idő javítása érdekében a helyreállító utak mentén található aktív kapcsolók számát korlátoztuk. Megfigyelhető, hogy az adott hálózat és követelményrendszer esetén maximálisan három aktív kapcsoló alkalmazása megengedett a helyreállító utak mentén.

Az alacsonyabb helyreállítási idő eléréséhez, nagyobb erőforrás-felhasználás tartozik. A 4/b. ábrán az eltérő tervezési eredmények erőforrás-szükséglete látható. Optimális erőforrás-felhasználás esetén 53 százalékkal több erőforrás szükséges, mint a nem védett hálózatban. A követelményrendszert éppen kielégítő hálózati megoldás (maximálisan 3 aktív kapcsoló) 67 százalékkal több erőforrási igényel, mint a referenciának nem védett hálózat. A részletes hálózati adatok feldolgozásából megállapítható, hogy az optimális erőforrás-felhasználás esetén a helyreállító utak 42,7 százaléka, még a maximálisan 4 aktív kapcsolót tartalmazó esetben 37,7 százaléka marad a helyreállítási időkorláton belül. Ha a helyreállító utak számát háromra korlátozzuk, minden összeköttetés helyreállítási ideje kielégíti a követelményrendszert.

6. Összefoglalás

Az intelligens optikai hálózatok elosztott vezérlési funkciói (gyakori erőforrás lefoglalási-, vagy útvonalválasztási-információ váltások) kritikus skálázhatósági problémákat okozhatnak pont a vezérlő kialakítása során. Ezért egy lényeges tervezési szempont a jelzéstovábbítás módjának optimális megválasztás. Az analitikus modellek segítségével bemutattuk, hogy a sávon kívüli jelzéstovábbítás, bár kevésbé terhelte hálózat esetén nagyobb késleltetést visz a rendszerbe, mint a sávon belüli megvalósítás, növekvő jelzeshálózat terhelésnél, a nem limitált sáv szélessége miatt, késleltetés szempontjából jobban teljesít.

A jelzeshálózat megfelelő kiválasztásának összhangban kell lennie az alkalmazott védelmi stratégiával. A bemutatott modellek és esettanulmányok alapján megállapítható, hogy az adott hálózat tulajdonságaitól függően, megtalálható az optimális megoldás a felhasznált erőforrások és a helyreállítási idők tekintetében.

Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretnének köszönetet mondani a szerzők Dr. Jan Spaeth-nek (Marconi) a cikk megírásában nyújtott szakmai támogatásáért, és a MUPBED projekt minden résztvevőjének az együttműködésükért és támogatásukért.

Ezt a munkát az FP6-511780 projekt keretében az Európai Bizottság részelegesen támogatta.

Irodalom

- [1] Drew Robb:
„Disaster Recovery vs. Business Continuity”,
April 2005.
<http://www.esecurityplanet.com>.
- [2] IST-MUPBED, Deliverable 1.1,
„Preliminary Definition of a Reference Architecture
for an Intelligent Optical Network Supporting
Advanced Applications in Research Environments”,
May 2005.
<http://www.ist-mupbed.org/publications>
- [3] <http://www.ist-mupbed.org>
- [4] P. Szegedi,
„Delay Models for Different UNI Signaling Implementations in the Context of IST Project MUPBED”,
ICTON 2005, July 3-7, Barcelona 2005.
- [5] T. Jakab, Zs. Lakatos:
Resilience with Tailored Recovery Time in
Switched Optical Networks, Proceedings of 8th
European Conference on Networks & Optical
Communications – NOC 2003, Vienna, July 2003.
- [6] H. Wang, R. Karri, M. Veeraraghavan, T. Li:
„Hardware-Accelerated Implementation of
the RSVP-TE Signaling Protocol”,
In Proc. of IEEE ICC2004, June 20-24, Paris 2004.
- [7] Chen, Hong, Yao, David D.:
„Fundamentals of Queuing Networks”, Springer;
1st Edition, June 15, 2001,
ISBN 0387951660
- [8] OIF-UNI 1.0 Release 2,
„User Network Interface (UNI) 1.0
Signaling Specification, Release 2: Common Part”,
[http://www.oiforum.com/public/documents/
OIF-UNI-01.0-R2-Common.pdf](http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-UNI-01.0-R2-Common.pdf)
- [9] ITU-T Rec.G.8080/Y.1304,
„Architecture for the
Automatically Switched Optical Network (ASON)”.
- [10] <http://www.ilog.com>

Valós időben konfigurált optikaicsatorna-szolgáltatást nyújtó hálózatok kapacitás-kihasználtságának javítása

KÁRÁSZ TAMÁS

BME Híradástechnikai Tanszék

karasz@hit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: UCLP, optikai hálózatok, valós idejű optikai csatorna szolgáltatások, hálózat-konszolidáció

A cikk a felhasználók által üzemeltethető hullámhossz utak (User Controlled Lightpath, UCLP) koncepcióján keresztül bemutatja a konszolidáción alapuló hálózat-üzemeltetési életciklust a hozzá kapcsolódó tervezési és üzemeltetési kérdésekkel. Továbbá ismerteti az optimális átrendezés stratégiájának vizsgálata során elért eredményeket.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb igény mutatkozik arra, hogy kutatóközpontok, egyetemek és kormányzati szervek egymással nagy sáv szélesség-igényű kapcsolatokon kommunikáljanak. A felhasználók által üzemeltethető hullámhossz-utak (User Controlled Lightpath, UCLP) koncepciója lehetővé teszi, hogy a felhasználók önmaguk konfigurálhassák és menedzselhessék az általuk bérelt hálózati elemek fölötti saját hálózatukat, üzemeltetési költséget takarítva meg ezzel.

A felhasználók a hálózatukban különböző minőségű és védelmi osztályba tartozó szolgáltatásokat vehetnek igénybe. A szolgáltatásokra általában jellemző, hogy tartási idejük lényegesen hosszabb konfigurációs idejüknél. Az optikai csatorna alapú szolgáltatások kialakítása valós idejű, on-line konfigurációs folyamaton alapul. Ezek a folyamatok a beérkező optikai csatorna kéréseket az aktuális hálózati állapotban megvalósítható optimális megoldással (útvonal- és hullámhossz-választás) szolgálják ki.

A csatornakérések egy adott sorozatának kiszolgálása a folyamat jellegéből adódóan azonban szuboptimális hálózati konfigurációra vezet. Ezért időnként célszerű a kialakított optikai csatornákat a hálózat jobb kihasználtsága érdekében átrendezni. Ezt az átrendezési folyamatot tekintjük a hálózat *konszolidációjának*. A konszolidáció célja az, hogy az időben és térben elosztottan érkező és kiszolgált igényeket időnként valamilyen körültekintően megválasztott szempont (cél-függvény) alapján optimálisan átrendezzük. Ehhez csak egy intelligens menedzsment rendszer alkalmazására van szükség, mivel a konszolidáció ugyanazokra a hálózati funkciókra épül, mint a szolgáltatás-konfigurálási folyamat.

Ez a cikk az UCLP koncepció jellemző tulajdonságainak ismertetésén keresztül mutatja be a konszolidáción alapuló hálózat-üzemeltetési életciklust a hozzá kapcsolódó tervezési és üzemeltetési kérdésekkel együtt. Továbbá röviden ismerteti az optimális átrendezési stratégiájának vizsgálata során elért eredményeket is.

2. Az UCLP koncepció

Az UCLP elnevezés egy koncepciót és egy ezt megvalósító szoftvercsomagot takar, amelyet a CANARIE Inc. (Canada's Research and Innovation Network) fejlesztett ki a Cisco Canada-val közösen. A cikk az UCLP mögötti hálózati architektúrát mutatja be, nem célja a szoftver felépítésének ismertetése. A koncepció lehetővé teszi, hogy a felhasználók (nagyobb vállalatok, kutatóközpontok, egyetemek, kormányzati szervek) saját maguk üzemeltessék az általuk bérelt optikai hálózati infrastruktúrán megvalósított, a fizikai topológiától eltérő logikai topológiájú hálózatukat, végponttól végpontig terjedő, QoS (Quality of Service) képességekkel rendelkező kapcsolatok konfigurálásával. Ez a kapcsolat, attól függően, hogy melyik rétegben kerül kialakításra, lehet például WDM hálózat esetén egy optikai hullámhossz-út, Ethernet hálózat esetén egy VLAN, MPLS hálózat esetén egy LSP, vagy akár egy IP VPN is [1].

Az optikai rétegbeli virtuális magánhálózatok (Layer 1 Virtual Private Network, L1VPN) alkalmasak arra, hogy hatékonyan támogassák ezt a sokféle transzport technológiát úgy, hogy közben a felhasználó a hálózatán belül saját maga konfigurálhatja és menedzselheti kapcsolatait. Az ehhez szükséges protokollokat, illetve az alkalmazott útvonal- és hullámhossz-választási valamint védelmi megoldásokat az általuk menedzselte hálózatrészen belül szintén a felhasználók határozhatják meg [2].

Az UCLP koncepció elsődleges célja azonban nem az, hogy végponttól végpontig terjedő kapcsolatokat hozzunk létre, hanem az, hogy a felhasználók saját maguk menedzselhessék a hullámhosszak és rendszereket, akár több más felhasználó által üzemeltetett hálózatrészen keresztül haladó (inter-domain) kapcsolatok esetén is. Az UCLP segítségével így létrejövő felhasználó által menedzselhető, nagy távolságú kapcsolatokkal még több üzemeltetési költség takarítható meg. Természetesen ahhoz, hogy ezeket a hálózatokat érdemes legyen összekötni, a sötét szálat hosszabb időre kell bérelnie a felhasználóknak. Ilyen felhasználók által üzemeltetett sötét szál alapú hálózatok

eddig is léteztek, azonban az ezek összekapcsolásához szükséges, nagy távolságok áthidalására is alkalmas optikai kábelek [3] és berendezések csak az elmúlt években váltak elérhetővé.

Az UCLP koncepció mögötti üzleti modell a következőképpen néz ki. A felhasználók a szükséges sötét szálakat vagy egy hálózati szolgáltatótól vagy egy ezek telepítésére és fenntartására szakosodott szolgáltatótól (Alternate Distribution Company, ADCo) hosszabb időre bérlik, általában 10 vagy 20 évre. Ezen cégek esetében a sötét szálak építése, üzemeltetése és karbantartása hasonlóan történik, mint a társasházaké (condominium), ebből származik ezeknek a hálózatoknak a szakirodalomban található *condominium dark fiber network* elnevezése is.

A vállalat a kábelhálózat építésének megkezdése előtt meghirdeti a projektet és megpróbálja előre bérbe adni a sötét szálakat, biztosítva ezzel az építéshez szükséges tőkét és a beruházás várható megtérülését. A hálózat elkészülte után, a felhasználók saját maguk üzemeltetik az általuk bérelt sötét szálakon kiépített kommunikációs hálózatot, azonban az optikai kábelhálózat fenntartási, javítási és bővítési munkáit továbbra is a hálózat tulajdonosa látja el.

A felhasználók a szolgáltatóktól csak az optikai sötét szálakat bérlik, a nagy távolságok áthidalásához szükséges erősítőket nem, ezeket a felhasználók saját maguk szerelik fel. Szintén a felhasználóknak kell ellátniuk a hálózatot a hullámhosszak dinamikus konfigurálásához szükséges berendezésekkel, optikai kapcsolókkal (Optical Cross-Connect, OXC), optikai leágazó multiplexerekkel (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) [4].

Az OADM-ek esetén megkülönböztetünk fix OADM-et (FOADM) és konfigurálható OADM-et (ROADM), attól függően, hogy csak előre meghatározott vagy tetszőleges hullámhosszak ágaztathatóak-e le. Valós időben történő optikai csatorna kérések konfigurálásához a flexibilisebb ROADM berendezések használata ajánlott.

Az egyes felhasználók által létrehozott hálózatok összekapcsolásával létrejövő condominium hálózatok üzemeltetésével kapcsolatban több kérdés is felmerül. Az első arra vonatkozik, hogy az összekapcsoláshoz az egyes hálózatok között a felhasználóknak megfelelő kapcsolókra (OXC, OADM) van szükségük. Ezekről az eszközökről a felhasználóknak maguknak kell gondoskodniuk, és bár ezek a saját hálózatokon belül alkalmazott kapcsolóknál lényegesen bonyolultabbak és így drágábbak is, telepítésük költségét a felhasználók közösen, megosztva viselhetik.

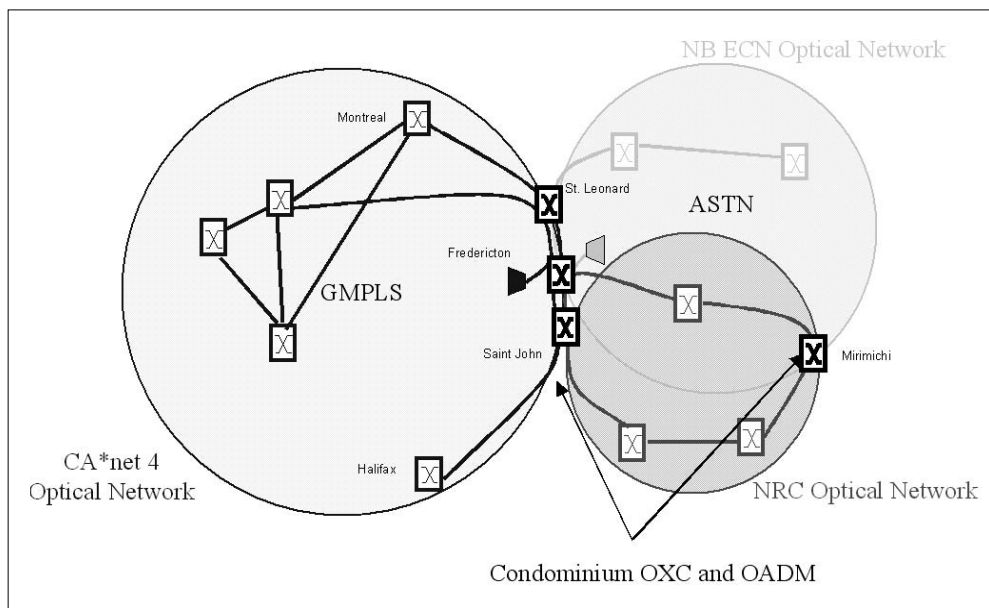
A második kérdés a hálózat menedzsment rendszerével kapcsolatos. Mivel ezekben a hálózatokban a felhasználók a saját hálózatukon kívül, más felhasználók által üzemeltetett hálózatokon átívelő kapcsolatokat is menedzselhetnek, a hálózat menedzsment elosztottan működik. Ennek megvalósítására többféle megközelítés is létezik.

Az egyik megoldás, hogy a felhasználók a hálózataikban alkalmazott, a központi menedzsmenttel rendelkező hálózatok esetén már bevált, GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) vagy ASON/ASTN (Automatically Switched Optical/Transport Network) alapú menedzsment rendszert kiterjesztik a különböző hálózatrészek között található, közös kapcsolókra, mintha az a saját hálózatuk része lenne (1. ábra). Ez a megközelítés bár egyszerűbb, de kevésbé illeszkedik a hálózat elosztott felépítéséből következő üzemeltetési követelményekhez.

A másik megközelítés, amelyet az UCLP koncepcióban javasolnak, azon alapszik, hogy az elosztott menedzselési probléma nagyban hasonlít a grid hálózatok és más elosztott rendszerek üzemeltetésére. Ezért ezeknek a menedzsment eszközöknek és protolloknak a kifejlesztése az itt már jól bevált technikák alapján történhet.

Az így kialakított menedzsment rendszerek közül a legelterjedtebb az *Open Grid Services Architecture*, amely web szolgáltatásokon alapul, illetve a JINI és a

1. ábra
Felhasználók által
üzemeltetett hálózatok
összekapcsolásával
létrejövő
condominium hálózat
képe [4]



JavaSpaces, amelyek egy térben elosztott modellen alapulnak, ahol minden egyes felhasználó rendelkezik egy mások által is elérhető tárterülettel, amelyen hirdethetik szabad kapacitásaikat és lefoglalhatják mások kapacitásait [4].

Ha egy ilyen az összekapcsolás után létrejövő condominium hálózatra egy optikai csatorna kérés érkezik, akkor ez az egyes felhasználók hálózataiban az ott alkalmazott útvonal- és hullámhossz-választásnak megfelelően kiszolgálásra kerül, illetve az egyes hálózatok között a bérelt optikai kapcsolókon keresztül továbbítani fog. Ez alapján az egyes felhasználók hálózatai egy magasabb absztrakciós szintről szemlélve úgy is tekinthetők, mintha azok a felhasználói végpontok közötti egyszerű kapcsolóelemek lennének.

Az, hogy a felhasználók maguk üzemeltethetik a bérelt infrastruktúra fölötti logikai hálózatot, többféle előnnyel is jár [5]:

– A legfontosabb a költségmegtakarítás, amely többféle tényezéből tevődik össze:

- a.) A sötét szálak hosszú távú bérleti díja lényegesen kevesebb költséget jelent a felhasználók számára, mint egy adott sáv szélességű összeköttetés havi bérleti díja. Ez a különbség nagyobb sáv szélesség bérlése esetén még jelentősebb.
- b.) Mivel a felhasználók üzemeltetik a hálózatot, a szolgáltató felé ezután csak a fenntartási és javítási munkákért kell fizetni. Emellett a felhasználók várhatóan kisebb költséggel tudják üzemeltetni a hálózatot, mint ha azt egy szolgáltató végezné (például megtakarítható a szolgáltató által felszámolt profit).
- c.) A bérelt hálózatok összekapcsolásához szükséges OXC (Optical Cross Connect) és OADM (Optical Add Drop Multiplexer) berendezések költsége szétosztható a felhasználók között.

– A felhasználók a saját hálózatukban, a többi hálózatrésztől függetlenül, meghatározhatják az alkalmazott szolgáltatás-konfigurálási és védelmi megoldásokat.

– A hálózatukon belül a felhasználók GbE (Gigabit Ethernet) vagy 10GbE technológiát is alkalmazhatnak, csökkentve ezzel a hálózati menedzsment komplexitását és kihasználva, hogy az ezekhez szükséges eszközök jelentősen olcsóbbak.

– A felhasználók könnyebben alakíthatnak ki egymással nagy távolságú, akár több hálózaton, más felhasználók által üzemeltetett hálózatrészen is átívelő, adott minőségi (Quality of Service, QoS) paraméterekkel rendelkező, dedikált összeköttetéseket és ezeken keresztül biztonságosabban és olcsóbban vehetnek igénybe olyan szolgáltatásokat, mint nagyméretű fájlok átvitele, video, grid vagy adattárolási hálózati szolgáltatások (Storage Area Network, SAN).

– A nagy kapacitású bérelt sötét szálak új, nagy sáv szélességű technológiák fejlesztését, tesztelését il-

letve használatát teszik lehetővé a kutatóközpontok és egyetemek számára, amelyekre egy szolgáltató által menedzselte optikai infrastruktúra felett már nem lenne lehetőség.

– A felhasználó, ha nem használja ki az általa bérelt kapacitást, átengedheti azt más felhasználónak.

– A rendelkezésre álló sötét szálak könnyedén egy kötegbe (pool) szervezhetők és így hatékonyabban felhasználhatók a kutatócsoportok számára.

– Ha a felhasználó növelni szeretné hálózata kapacitását, akkor ehhez csak a berendezéseket kell bővítenie, az optikai szálak bővítését a szolgáltató végzi.

A nagy tartási idejű kapcsolatok esetén a felhasználóknak célszerű az általuk üzemeltetett hálózaton belül haladó összeköttetéseket időnként optimálisan átrendezni; a harmadik fejezet egy olyan hálózatüzemeltetési életciklust mutat be, amely magában foglalja ezt az átrendezési folyamatot is.

3. Valós időben konfigurált optikaicsatorna-szolgáltatást nyújtó hálózatok üzemeltetése

A transzporthálózatok tervezése és méretezése korábban, amíg a beszéd alapú szolgáltatásokból származott a forgalom meghatározó része, a várható forgalom becslésén alapult. Ennek alapja a beszédforgalom elfogadható pontosságú előre jelezhetősége volt.

Napjainkra a nehezen becsülhető és állandóan növekvő IP szolgáltatások és szélessávú alkalmazások váltak a transzporthálózatok forgalmának meghatározó komponensévé. Ez a forgalmi struktúráváltás és a közben bekövetkezett piaci változások, valamint a szolgáltató piac réteges felépítettsége (tartalomszolgáltatók, Internet szolgáltatók, transzporthálózati szolgáltatók) a forgalomnövekedés és a szolgáltatások modellezését és előrejelzését jelentősen megnehezítik, a tradicionális becslésen alapuló, off-line tervezési módszereket és a hálózati erőforrások előre konfigurálását lehetetlenné teszik. Ezt a trendet az újgenerációs koncepció (Next Generation Network, NGN) [6] elterjedése csak tovább erősíti.

Ahhoz, hogy a forgalom előre nem várható változásait kezelni tudjuk, illetve elkerülhessük a forgalom blokkolódását és torlódását a hálózatban, többféle megközelítés is létezik. Az egyik a kapacitások jelentős túlméretezése, a másik egy rugalmas konfigurációs intelligencia telepítése a hálózatba, amellyel a torlódó igények a szabad kapacitások felé terelhetők.

A fejezet címében található valós időben konfigurált optikai csatorna szolgáltatást nyújtó hálózat kifejezés olyan hálózatot takar, amelyben a térben és időben elosztottan és függetlenül beérkező optikai csatorna kéréseket egy elosztottan működő jelzés és kapcsoló intelligencia valós időben szolgálja ki. Ez alapján a hálózat egy inkrementális modellel szemléltethető, ahol az optikai csatorna kérések kiszolgálása azok beérkezési sorrendjétől függően történik [7].

A valós időben konfigurált optikai csatorna szolgáltatást nyújtó hálózatok tradicionális üzemeltetési életciklusa a következőképpen néz ki:

- **Szolgáltatás-konfigurálási fázis:**
beérkező optikai csatorna igények sorrendfüggő kiszolgálása. A folyamat egy idő után bizonyos hálózati kapacitások telítődéséhez fog vezetni, ekkor a kapacitások bővítésére van szükség.
- **Hálózatbővítési fázis:**
további kapacitások tervezése és telepítése a hálózatba a szűk kapacitások és torlódások megszüntetése, elkerülése érdekében.

A szolgáltatás-konfigurálási fázis célja, hogy a beérkező optikai csatorna kérések elvezetése során jelentkező útvonal és hullámhossz hozzárendelési problémát (Route and Wavelength Assignment, RWA) valós idejű on-line döntések és konfigurációs lépések alapján oldjuk meg. Az útvonalak és hullámhosszak hozzárendelése történhet együtt és külön-külön is. A folyamat lényege, hogy az adott hálózati kapacitások fölött a beérkező csatorna kéréseket a lehető legkisebb blokkolással szolgáljuk ki.

A kérések kiszolgálása alatt az igényekhez tartozó különböző védelmi és helyreállítási követelmények is figyelembe vehetők. Erre az irodalomban számos megoldás található, például arányosan súlyozott útvonalválasztás [8], a hullámhossz tartomány felosztása a különböző igényosztályok üzemi és védelmi elvezetései között [9], osztott védelem a linkekre definiált megoszthatósági korlátokkal [10].

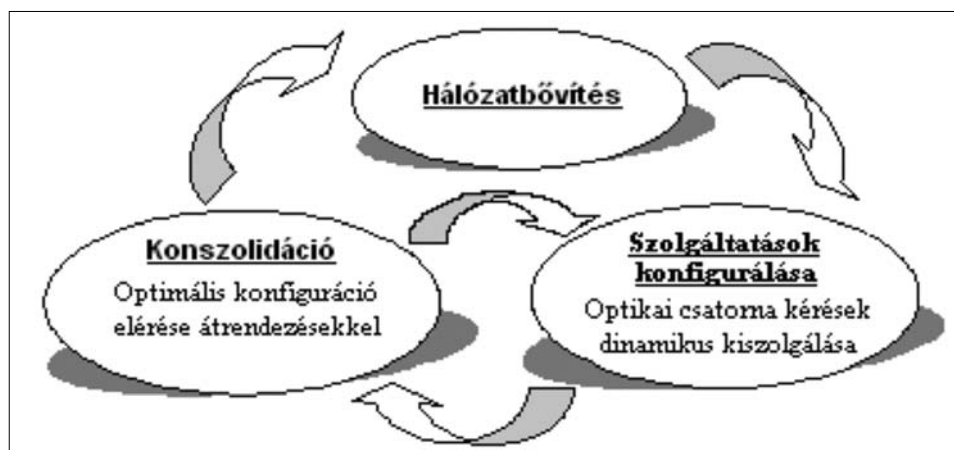
Mivel egy inkrementális forgalmi modell mellett a hálózat fokozatos telítődése nem kerülhető el, szükség van időnként a hálózatbővítési fázis alkalmazására is. A hálózatbővítés azonban nem minden esetben jelenti új hálózati elemek (linkek) létrehozását, sokszor csak a telítődött kapacitások bővítését. A hálózatban kialakuló torlódások oka, hogy a kiszolgálási folyamat alatti valós idejű döntések miatt kialakuló hálózati konfiguráció csak szuboptimális. Ez azt jelenti, hogy habár az egyes igények elvezetése az adott hálózati állapotban optimális döntések alapján történik, az igények sorrendi kiszolgálása miatt és amiatt, hogy a beérkező igények előre nem ismertek, az így kialakuló hálózati kép összességében mégsem lesz az.

Ennek a problémának a megoldására szolgál az előbb bemutatott hálózat üzemeltetési életciklus kiegészítése egy konszolidációs fázissal, amelynek segítségével a szolgáltatás-konfigurálási fázis alatt beérkező kérések elvezetéseit valamilyen előre meghatározott szempontok szerint optimálisan átrendezhetjük. Ez az átrendezés hagyományos off-line tervezési eljárások alkalmazását teszi szükségessé a folyamatban. A konszolidáció alapja, hogy az igények egy már ismert csoportjára együttesen meghozott konfigurációs döntések hatékonyabbak, mint ugyanezen igények egyenkénti kiszolgálásának folyamata, amely folyamat a szolgáltatás-konfigurálási fázis alatt megjelenő igények véletlenszerű sorrendi realizációja. Így tehát a konszolidáció segítségével a hálózati kapacitások kihasználásának hatékonysága növelhető.

A kiegészített, háromfázisú hálózat-üzemeltetési életciklus a 2. ábrán látható.

A 2. ábra alapján a konszolidáció után mindkét másik fázis következhet. Azaz, a konszolidációt követheti a hálózatbővítési fázis, ezáltal lehetővé téve, hogy egy már optimális hálózati kép mellett tervezzük meg a hálózat bővítéséhez szükséges kapacitásokat. Vagy követheti a szolgáltatás-konfigurálási (provisioning-) fázis is. Ekkor a konszolidáció célja az eddig beérkezett igények átrendezése annak érdekében, hogy a szolgáltatás-konfigurálási fázisban hozott döntéseink minél hatékonyabbak legyenek. Természetesen az igényekhez tartozó szolgáltatási követelmények (például védelmi követelmények, az igények fizikai jellemzőire vonatkozó követelmények) a konszolidációs fázis alatt is megtarthatóak. Emellett a konszolidáció során lehetőség van a szolgáltatás-konfigurálási fázis alatti követelmények kiszolgálásának hatékonyabbá tételére is, a provisioning fázis egyszerűsítése érdekében.

Például ha a szolgáltatás-konfigurálási fázisban előre tervezett egyszeres hibák ellen védő 1+1-es vagy osztott útvédelmet alkalmazunk, akkor a konszolidáció során az 1+1-es védelemről osztott útvédlemre, az előre tervezett osztott útvédlemről optimálisan osztott útvédlemre (az egyetlen védelmi út optimális az osztzkodás szempontjából) válthatunk. Mindkét váltás tipikusan csökkenti az erőforrás-szükségletet, ugyanakkor valós idejű megvalósításuk viszonylag bonyolult lenne.



2. ábra
Valós időben konfigurált optikai csatorna szolgáltatást nyújtó hálózatok üzemeltetési életciklusa

A konszolidálandó igények optimális elvezetéseinek meghatározása során az átrendezések meggyorsítása érdekében lehetőség van bizonyos korlátozások alkalmazására is. Ez a korlátozás azonban csökkenti az elérhető hatékonyságot, a kapott hálózati kép csak ezen korlátozások mellett lesz optimális. Ebből következően kompromisszumot kell kötnünk az átrendezés mértéke és hatékonysága között. Az átrendezés mértéke korlátozható az átrendezési lépések száma és típusa szerint is. Például, ha az igények elvezetése a hálózatban fix útvonalhalmaz alapján történik, az átrendezés korlátozható csak az igények hullámhosszára.

A konszolidációval kapcsolatban felmerülő másik fontos kérdés, hogy mikor történjen az igények átrendezése. A legegyszerűbb megközelítés, ha az átrendezés fix időközönként történik. Egy másik megoldás lehet, ha a konszolidációt valamilyen hálózati jellemző, például a linkek telítettségének mértéke, triggereli. Az átkonfigurálás sűrűsége emellett hatással van mind az átrendezés mértékére, mind az optimális megoldás kiszámításának bonyolultságára.

Az irodalomban található, az átrendezés mértékére és időpontjára vonatkozó megoldások összefoglalója a [11] publikációban található.

A kérdések alapján, vagyis hogy mi legyen az átrendezés mértéke és mi triggerelje azt, különböző konszolidációs stratégiák definiálhatók úgy, hogy azok a hálózat és az elvezetendő igények jellemzőihez a legjobban illeszkedjenek. A konszolidáció végrehajtása szempontjából lényeges a hálózatban végrehajtható átrendezési lépések sorrendje, amit a rendelkezésre álló szabad kapacitások, és az egyes igények – élő forgalom – rövid idejű megszakításának számára vonatkozó előírások jelentősen korlátozhatnak.

4. Konszolidációs stratégiák

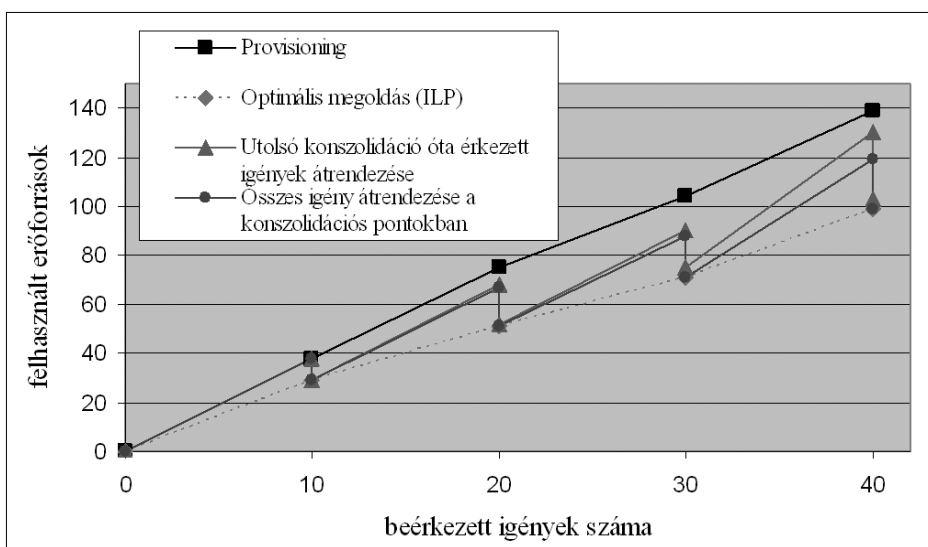
Ebben a fejezetben néhány egyszerű konszolidációs stratégiát szeretnénk bemutatni arra a speciális esetre, ha a hálózat a konszolidációs fázisok előtt a telítődés

határán van. A példában alkalmazott provisioning stratégia alkalmas arra, hogy az igényekhez rendelt rendelkezésre állási követelményeket teljesíteni tudja többszörös meghibásodások mellett is. A probléma komplexitásának csökkentése érdekében definiálunk egy értéket, amely annak valószínűsége, hogy egy osztott védelmi erőforrás már nem használható egy adott igény esetén, mert azt már más igények elfoglalták. A megoszthatóság mértékére egy határértéket definiálunk. A provisioning stratégia tehát egy osztott védelmi elvezetés ezzel a megoszthatósági határértékkel kiegészítve [10].

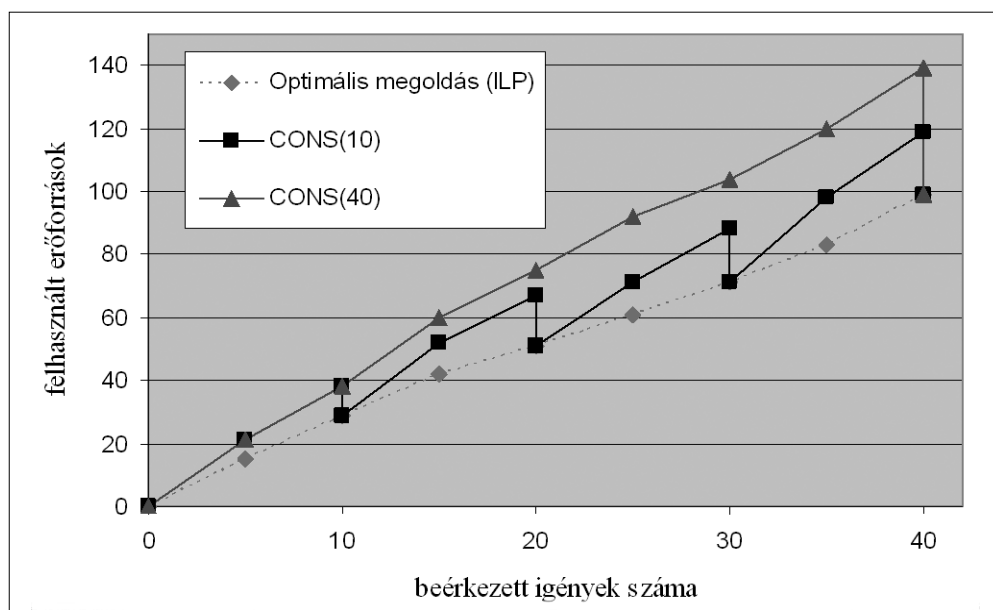
A mintahálózat egy L1VPN egy hipotetikus magyar optikai hálózat felett (9 csomópont, 16 él, 9 hullámhossz/él), amelyen 40 darab hullámhossznyi kapacitású optikai csatorna igényt próbálunk elvezetni. A hálózatban található 9 hullámhossz egy VPN-hez tartozik, a példa ezen VPN konszolidációjára vonatkozik. Emellett a hálózat kapacitásainak kismértékű bővítése a hálózatbővítési fázisban, könnyen elvégezhető ezen hullámhossztartomány 1-2 hullámhosszal való kiegészítésével. A hálózatot 10 igény beérkezése után átrendezzük, és a provisioning fázist ebből az optimális állapotból indítjuk újra. Az optimális állapot előállításához egészértékű lineáris programozást (Integer Linear Programming, ILP) használunk.

A telítés határán lévő hálózat konszolidációja azért jelenthet problémát, mert az átrendezéshez nincs túl sok szabad kapacitás a hálózatban. A megoldás az, hogy egy konszolidációs fázis alatt csak kevés átrendezési lépést végzünk. Egyrészt ezt elérhetjük úgy, hogy csak bizonyos számú igényt rendezünk át, ez a triviális megoldás. Másrészt megoldhatjuk úgy is, hogy nem engedjük, hogy a hálózat túl messzire kerüljön az optimális állapottól a provisioning fázis alatt, így az optimális állapot kevés konfigurációs lépéssel elérhetővé válik. Azt, hogy az optimális állapot az átrendezési lépések milyen sorrendjével érhető el, a cikk nem tárgyalja.

Az első megoldási megközelítésre egy lehetséges konszolidációs stratégia, hogy minden konszolidációs fázisban csak az utolsó átrendezés óta beérkezett igény



3. ábra
Lefoglalt kapacitások
mennyisége
az összes igény átrendezése
és az utolsó konszolidáció óta
beérkezett igények
átrendezése esetén



4. ábra
Lefoglalt kapacitások
mennyisége
különböző gyakoriságú
konszolidáció esetén

nyeket rendezzük át. Így, bár az optimális megoldás nem érhető el, viszont az átrendezési lépések száma jelentősen csökkenthető. A foglalt hálózati kapacitások mennyiségének alakulása az egyes fázisokban az előző oldali, 3. ábrán látható.

A 4. ábrán az látható, hogy a konszolidációs pontokban nő a hálózat kihasználtságának hatékonysága. Megfigyelhető az is, hogy bár ez a stratégia rosszabbul teljesít, mintha a konszolidációs pontokban a teljes hálózat átrendezhető lenne, azonban az eltérés nem túl jelentős.

Ezzel szemben az átrendezési lépések átlagos száma jelentősen csökken. Ez az 5. ábrán figyelhető meg, ahol a CONS(10) oszlopok jelölik a teljes átrendezéshez tartozó különböző konfigurációs lépések számát az egyes konszolidációs pontokban, míg a CONS(last) oszlopok a fenti stratégia átrendezési lépéseinek átlagos számát mutatják.

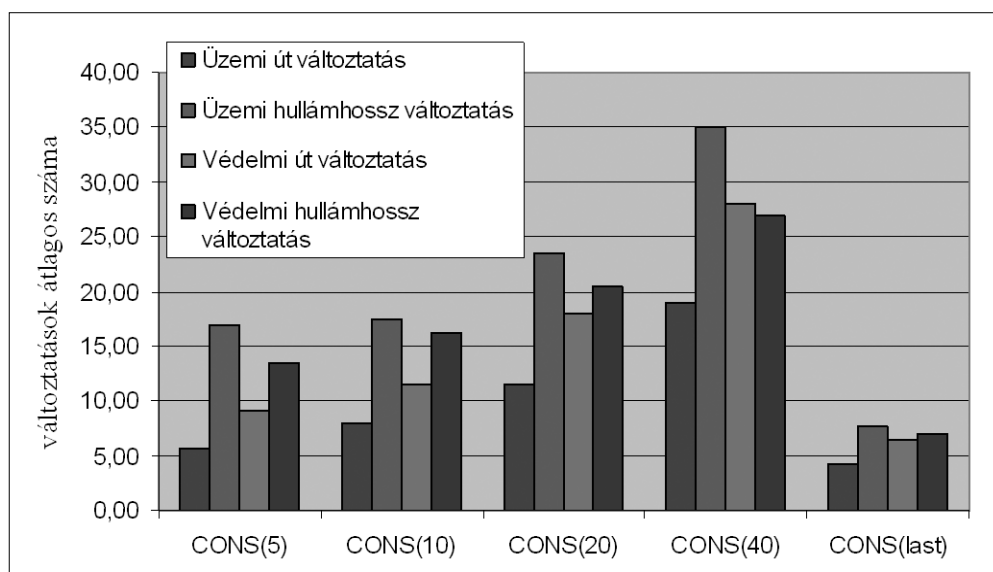
A másik megoldási megközelítés az, hogy a hálózatnak nem szabad az optimális állapottól messzire ke-

rülnie. A vizsgálatok során arra a megállapításra jutottunk, hogy ez akkor következik be, ha a hálózatot gyakrabban konszolidáljuk.

A 4. ábrán megfigyelhető, hogy hogyan alakul a foglalt kapacitások mennyisége különböző gyakoriságú konszolidáció esetén. Az ábrán CONS(x)-szel jelöltük az egyes konszolidációs stratégiákat, ahol az x jelenti a két átrendezés között beérkezett igények számát.

Látható, hogy gyakoribb konszolidációval kevésbé távolodunk el az optimális állapottól, így kevesebb konfigurációs lépés kell annak eléréséhez is az egyes konszolidációs pontokban. Mint azt az 5. ábra mutatja, gyakoribb átrendezés esetén, mivel több konszolidációs pont van, bár összességében több átrendezési lépésre van szükség, de az átlagos átrendezési szám a mégis kisebb az egyes konszolidációs pontokban.

Összefoglalva tehát azt mondhatjuk, hogy egy telítődés határán lévő hálózat konszolidációjakor akkor érjük el a legnagyobb hatékonyságot, ha olyan konszolidációs stratégiát használunk, amely minél gyakrabban



5. ábra
Út és hullámhossz
változtatások
átlagos száma különböző
konszolidációs stratégiák
esetén

rendezi át a hálózatot és az igényeknek csak bizonyos részét konfigurálja át. Ebben az esetben bár nagy valószínűséggel nem érjük el az optimális állapotot, de jelentősen kevesebb átrendezési lépésre lesz szükségünk az egyes konszolidációs pontokban.

5. Összefoglalás

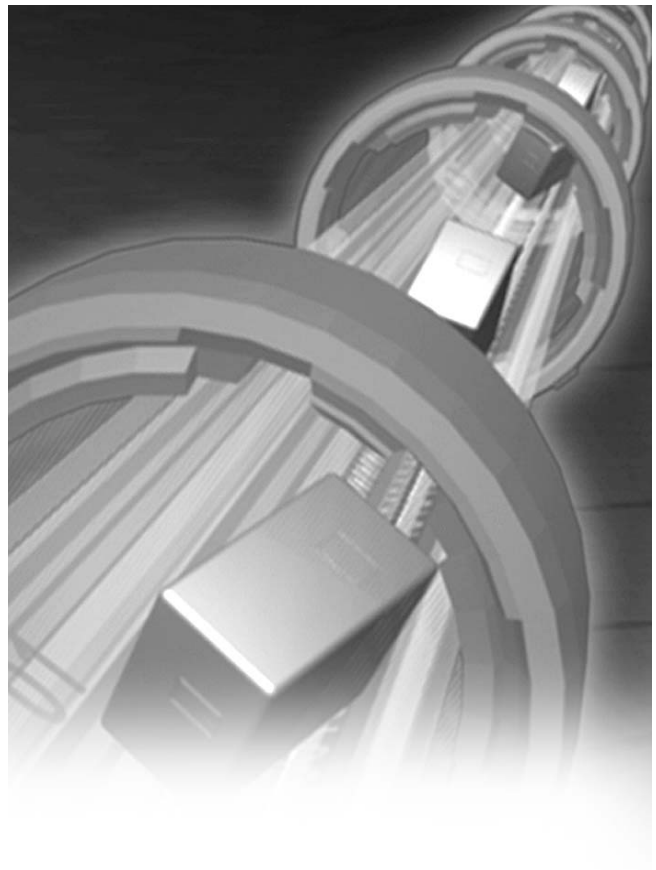
Cikkünkben összefoglaltuk a felhasználók által üzemeltethető hullámhossz utak koncepciójának jellemzőit, az ennek kialakulásához vezető hálózati hátteret és a kapcsolódó tervezési és üzemeltetési kérdéseket. Majd ezen keresztül bemutattunk egy a provisioning orientált optikai hálózatok üzemeltetésére alkalmas hálózat-üzemeltetési életciklust. Végül a konszolidáció használatának szemléltetésére néhány konszolidációs stratégiát mutattunk telítődés határán lévő hálózatokra.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Braun Péternek és Jakab Tivadarnak a cikk elkészítéséhez nyújtott segítségükért. A cikk az OTKA 048985 számú „Védett hálózatok tervezése és megbízhatósági analízise DiR modell alkalmazása esetén” című pályázatának támogatásával készült.

Irodalom

- [1] B. St. Arnaud:
CA*net 4 Research Program Update –
UCLP Roadmap Web Services Workflow for
Connecting Research Instruments and Sensors to
Networks, Draft, December 2004.
[http://www.canarie.ca/canet4/library/recent/
ONT_slides_%20NASA_Ames-CANARIE.ppt](http://www.canarie.ca/canet4/library/recent/ONT_slides_%20NASA_Ames-CANARIE.ppt)
- [2] T. Takeda, I. Inoue, R. Aubin, M. Carugi:
Layer 1 virtual private networks:
service concepts, architecture requirements and
related advances in standardization,
IEEE Communications Magazine,
Vol.42, June 2004, pp.132–138.
- [3] International Telecommunication Union (ITU-T):
G.656 – Characteristics of a fibre and cable with
Non-Zero Dispersion for Wideband Optical Transport,
April 2004.
- [4] B. St. Arnaud, J. Wu, B. Kalali:
Customer Controlled and Managed Optical Networks,
Journal of Lightwave Technology, Vol.21, 2003.
- [5] B. St. Arnaud:
Frequently Asked Questions about Customer
Owned Dark Fiber, Condominium Fiber,
Community and Municipal Fiber Networks,
ARDNOC White Papers, 2002.
[http://www.sunesys.com/downloads/
FrequentlyAskedQuestionsaboutDarkFiber.pdf](http://www.sunesys.com/downloads/FrequentlyAskedQuestionsaboutDarkFiber.pdf)
- [6] International Packet Communication Consortium
(IPCC): Reference Architecture v1.2, June 2002,
<http://www.ipccorum.org>
- [7] S. Ramamurthy, L. Sahasrabudhe, B. Mukherjee:
Survivable WDM mesh networks,
Journal of Lightwave Technology, Vol.21, No.4,
April 2003, pp.870–883.
- [8] L. Valcarenghi, A. Fumagalli:
Implementing Stochastic Preplanned Restoration
with Proportional Weighted Path Choice
in IP/GMPLS/WDM Networks,
Photonic Network Communications – Special Issue
on Routing, Protection, and Restoration Strategies
and Algorithms for WDM Optical Networks,
Kluwer Academic Publishers, Vol.4, No.3/4, 2002.
- [9] N. Andriolli, T. Jakab, L. Valcarenghi, P. Castoldi:
Separate wavelength pools for
multiple-class optical channel provisioning,
NETWORKS 2004 Conference, Vienna, June 2004,
pp.379–384.
- [10] Zs. Pándi, M. Tacca, A. Fumagalli:
A Threshold Based On-line RWA Algorithm with
Reliability Guarantees, ONDM 2005 Conference,
Milan, February 2005, pp.447–453
[http://cntic90.hit.bme.hu/~zspandi/publ/2005/
ondm2005_paper_12.4.pdf](http://cntic90.hit.bme.hu/~zspandi/publ/2005/ondm2005_paper_12.4.pdf)
- [11] T. Kárász, Zs. Pándi:
Optimal reconfiguration of provisioning oriented
optical networks, HET-NETs '05, Ilkley, U.K., July 2005
[http://cntic90.hit.bme.hu/~zspandi/publ/2005/
Karasz_final.pdf](http://cntic90.hit.bme.hu/~zspandi/publ/2005/Karasz_final.pdf)



A hullámhossz-utak adaptív fragmentálása forgalomkötegeléses WDM optikai hálózatokban

GELEJI GÉZA, ASZTALOS MÁRK, CINKLER TIBOR, HEGYI PÉTER

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
{geleji, asztalos, cinkler, hegyi}@tmit.bme.hu

Kulcsszavak: dinamikus optikai hálózat, WR-DWDM, traffic grooming, peer modell

A hullámhossz-osztásos nyalábolást alkalmazó dinamikus, automatikusan kapcsolt optikai hálózatokban megjelenő forgalmi igények tipikusan jelentősen kisebb sáv szélességet igényelnek, mint a hullámhossz-csatornák kapacitása. Ez teszi szükségessé a forgalomkötegelés alkalmazását, melynek során a közös szakaszokat tartalmazó utakon haladó forgalmi igényeket a közös szakaszokon közös hullámhossz-csatornában vezetjük el, ezáltal javítva a kapacitás kihasználtságát. Cikkünkben két ilyen eljárást vizsgálunk meg és rajtuk keresztül bemutatjuk a hullámhossz-csatornák fragmentációjának, illetve defragmentációjának jelenségét, valamint egy lehetséges megoldást a problémára. Szimuláció segítségével igazoljuk, hogy a probléma kiküszöbölése a hálózat átbocsátóképességének jelentős mértékű növekedéséhez vezet.

1. Bevezetés

1.1. Áramkörkapcsolt optikai hálózatok

Hullámhossz-osztásos nyalábolást (WDM: Wavelength Division Multiplexing) használó optikai hálózatokban áramkörkapcsolás alatt egy olyan technikát értünk, mely során a fényvezető szálakban úgynevezett hullámhossz-csatornákat (azaz λ -csatornákat) alakítunk ki [2]. A hálózati csomópontokban lévő hullámhosszkapcsoló rendszerek (vezérlősíkkal kiegészített optikai rendezők: Optical Cross Connect, OXC) teljes λ -csatornákat kapcsolnak, anélkül, hogy a szállított adatfolyamokat feldolgoznák. Több, egy-egy fizikai szakasz hosszú, azonos hullámhosszú λ -csatornát sorbakötve kapjuk a hullámhossz utat (azaz λ -utat) két fizikailag nem feltétlenül szomszédos hálózati csomópont között. E kapcsolt vagy rendezett hullámhossz utakat tekintjük optikai áramköröknek. A forgalomirányítást végző felső réteg egy egyszerűsített, logikai hálózati topológiát „lát”, melynek csomópontjai az eredeti hálózat csomópontjai, az éleket azonban a fizikai szakaszok (optikai szálak) helyett a λ -utak (hullámhossz-utak) adják. Az ilyen típusú hálózatok jellemző alkalmazásaiban a λ -csatornában megjelenő forgalmi igények jelentősen kisebb sáv szélességet igényelnek, mint a csatorna kapacitása.

Ahhoz, hogy egy igényt el tudjunk vezetni, le kell foglalnunk számára azokat a λ -csatornákat, amiken keresztülhalad. Egy újabb igényt, ami az előzővel párhuzamosan (vagyis legalább részben azonos fizikai szakaszokon) halad, csak úgy tudunk elvezetni, ha számára újabb csatornát foglalunk le a közös szakaszokon. Minden egyes igényhez egy teljes λ -csatornát rendelni pazarlás, hiszen így a csatornák kapacitásának nagy része kihasználatlan marad, és, mivel a felmerülő igények számához képest az egy fényvezető szálban kialakítható csatornák száma nagyon kevés, a keletkező igények töredékét tudnánk csak elvezetni.

1.2. Többrétegű hálózatok

A továbbiakban olyan többrétegű szállítóhálózatokkal foglalkozunk, melyek egy optikai Wavelength Routed – Dense Wavelength Division Multiplexed réteget és egy rá épülő elektronikus réteget tartalmaznak (a WR-DWDM a sűrű hullámhossz-osztásos nyalábolást, illetve a λ -csatornák szerinti forgalomirányítást jelenti).

Két csomópont, melyet hullámhossz-út köt össze a WR-DWDM rétegben, szomszédosnak fog látszani a felső réteg számára. A felső réteg elektronikus, vagyis képes számos olyan feladat ellátására, melyek tisztán optikai eszközökkel nem, vagy csak nagyon költségesen valósíthatók meg [5] – ilyen feladatok például a hullámhossz-konverzió, illetve a forgalomkötegelés.

A két réteg vezérlősíkainak egymáshoz való viszonya alapján többféle hálózati modellt különböztetünk meg: a peer, az overlay (1. ábra) és az augmented modelleket [3].

Az *overlay*, vagyis átfedő modellben a két réteg vezérlősíkja szinte teljesen elkülönül, egymással jól definiált protokollok segítségével kommunikálnak és csak a legszükségesebb információkat osztják meg egymással. A kétszeresen megvalósított vezérlőfunkciók, az ezekhez szükséges kommunikáció és adatcsere a hálózaton többletterhelést jelent.

A *peer* (társ) modellben a két réteget közös vezérlősík irányítja, amely elektronikus és optikai eszközöket egy logikai egységként kezeli. Ez hatékonyabb forgalomirányítást tesz lehetővé, de nem alkalmazható olyan üzleti modellekben, ahol a két réteg bizonyos információkat nem oszthat meg egymás közt (például a két vezérlősík más-más szolgáltatóhoz tartozik).

A két véglet között helyezkedik el az *augmented* (javított) modell, ebben is két elkülönülő vezérlősíkról beszélhetünk, ezek azonban több információt osztanak meg egymással, mint az overlay modellben.

Bár az útvonalválasztás a peer modellben bonyolultabb, mint az overlay modellben, mert az adatsík két rétegének sajátosságait egyidőben kell figyelembe venni, mégis sokkal rugalmasabb, gyorsabban alkalmazkodik a forgalmi változásokhoz és jobb erőforrás-kihasználást biztosít. A forgalomkötegelés leghatékonyabb megvalósítását ezáltal a peer modell teszi lehetővé.

1.3. Kötegelés

Tegyük fel, hogy egy hálózatban két forgalmi igény halad, úgy, hogy fizikai útvonalainak van közös szakasza. Ha a közös szakaszt nem azonosítjuk, az igényeknek feltehetően egymástól függetlenül fogunk erőforrást foglalni, vagyis külön λ -csatornákon, rossz esetben külön fényszálakon vezetjük el őket. A közös szakaszon azonban hatékonyabb erőforrás-kihasználást valósíthatunk meg az úgynevezett kötegelés alkalmazásával, melynek során a hálózat automatikusan felismeri, hogy a két (esetleg több) igény számára egyetlen csatorna lefoglalása is elegendő és ennek megfelelően alakítja ki útvonalukat.

Célszerűnek tűnik felhívni a figyelmet a kötegelés és a nyalábolás (multiplexelés) közti különbségre. Nyaláboláson a forgalmi igények előre meghatározott módon történő összefogásának technikáját értjük, míg a kötegelés magába foglalja a leghatékonyabb elrendezés megtalálására irányuló módszert, stratégiát is (topológiától, illetve hálózati terheléstől függően).

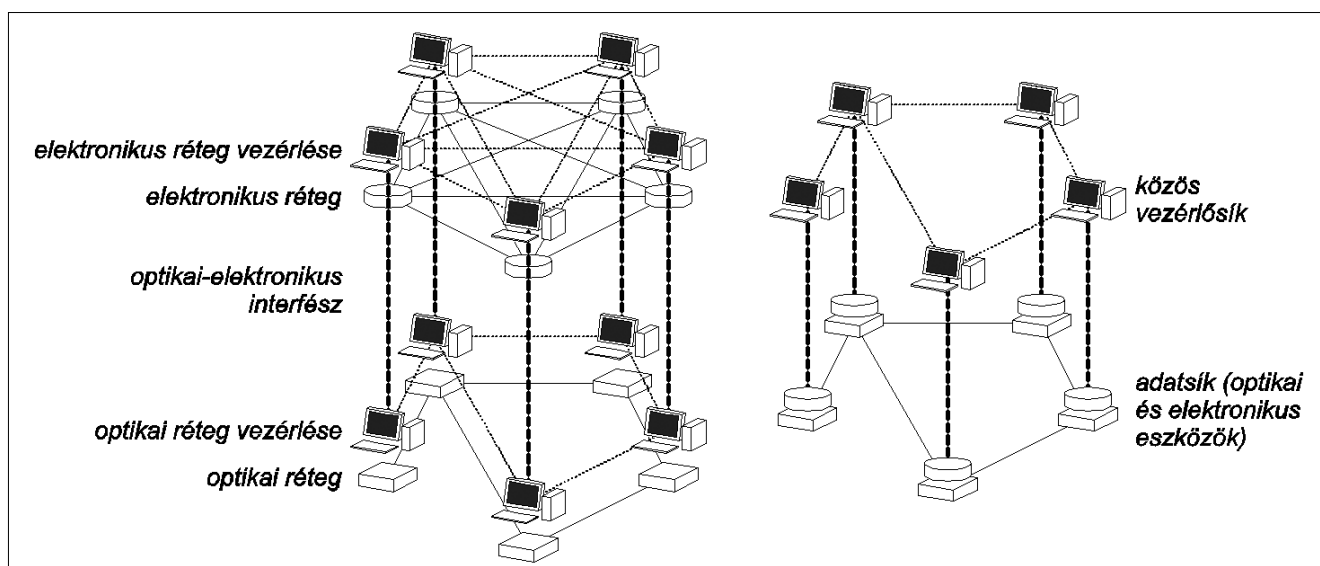
Forgalomkötegelés (traffic grooming, [4]) esetén a különböző adatfolyamokat közös λ -csatornába vagy λ -útba multiplexeljük. Ez lehetővé teszi a λ -csatornák lényegesen jobb kihasználását azáltal, hogy több, párhuzamos útvonalon haladó igényt, vagy igények megfelelő szakaszait közös λ -csatornába vagy λ -utakba fogja össze.

A forgalomkötegelésnek a következő két változatát különíthetjük el:

- Statikus forgalomkötegelés esetén feltételezzük, hogy a hálózatban megjelenő forgalom minden részlete előre ismert és jelentős minőségbeli változások nem történnek benne. Ekkor a forgalomvezetés off-line módon optimalizálható (adott költségfüggvényre). Megjegyezzük, hogy az ilyen jellegű feladatok NP-teljesek [6].
- A dinamikus kötegelés viszonylag kevés előrejelzést tételez fel a forgalom jellegét illetően; lehetővé teszi, hogy egy lényeges forgalmi változás esetén a λ -csatornáknak kialakított szub- λ csatornák (ez a forgalomkötegelés által a λ -csatornáknak kialakított kisebb kapacitású csatornákat jelenti) elrendezése automatikusan egy közel optimális elrendezéshez konvergáljon (költségfüggvényként például a lefoglalt λ -csatornák számát tekintve). Mivel a forgalmi igények folyamatosan, előre nem ismert módon érkeznek, az optimalizálást valós időben kell elvégezni. Az általunk vizsgált forgalomkötegelési eljárások dinamikus forgalom elvezetésére alkalmasak. Ez a megközelítés a széles körben elterjedt gerinchálózati megoldásokkal (pl. SDH) szemben az alacsonyabb hálózati rétegek (pl. OTN, WDM) dinamikus, elosztott és automatikus kezelését teszi lehetővé (pl. ASTN/GMPLS), ami olyan alkalmazások fejlesztését egyszerűsíti, mint például multimédiás közvetítés nagy látogatottságú sport- vagy hasonló események helyszínén.

Cikkünkben két forgalomkötegelési eljárással foglalkozunk. Az elsőt *egyszerű*, a másodikat *felszakításos modellnek* nevezzük. Az egyszerű modell szerinti hálózati csomópontok képesek hullámhossz-konverzióra és forgalomkötegelésre (ideértve a multiplexelést, de-multiplexelést és az újra-multiplexelést is). Ehhez képest a felszakításos modell mindemellett egy lényeges újítást is tartalmaz: képes a használatban lévő λ -csatornák felszakítására, vagyis egy optikai rétegben haladó csatorna felvezetésére az elektronikus rétegbe, ahol lehetőség nyílik a forgalom újra-multiplexelésére, adatfolya-

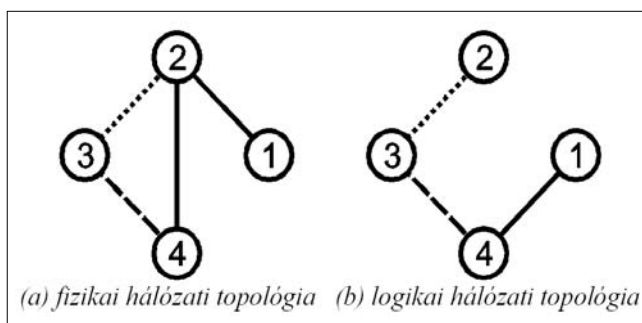
1. ábra Kétrétegű együttműködési modellek (overlay – balra, peer – jobbra)



mok leválasztására vagy hozzáadására. Látni fogjuk, hogy ez a módosítás lényeges hatékonyságbeli javulást eredményez azon az áron, hogy a kliensnek tolerálnia kell egy bizonyos mértékű csomagvesztést a felszakítás során (például beszéd, TCP/IP, esetleg video esetén ez még nem gond).

1.4. Fragmentáció és defragmentáció

A felszakításos kötegelési eljárás során nem kell a korábbi működés következményeként kialakult λ -út konfigurációt használni, azt át lehet alakítani az új igények ismeretében, amennyiben ezzel javítani lehet a hálózat kihasználtságán. Kezdetben, egy üres hálózatban akkor tudunk optimális kihasználtságot elérni, ha minden egyes felmerülő igény számára minél hosszabb (lehetőleg a forrástól a célcsomópontig haladó) λ -utat alakítunk ki, így jellemzően hosszú λ -utak alakulnak ki, a hálózat defragmentálttá válik [7]. Az előzőek értelmében a felső réteg felé látszó logikai hálózati topológiában szereplő élek (a fizikai hálózatban a λ -utak) nagyszámú fizikai szakaszon haladhatnak át, ami túl hosszú utakat eredményezhet, ez pedig a hálózat szuboptimális kihasználtságát okozhatja. A következő példán (2. ábra) illusztráljuk, hogyan rontja a hálózat teljesítményét a defragmentáltság.



2. ábra A defragmentációs probléma bemutatása

Minta hálózatunk négy csomópontból áll, melyek közt a fizikai összeköttetéseket az (a) topológia élei jelölik. Tegyük fel, hogy szakaszonként 1 hullámhosszt használhatunk és a hálózat korábbi dinamikus működése az ábrán látható hullámhossz λ -út konfigurációt eredményezi; a szaggatott, pontozott és folytonos élek különböző λ -utakat jelentenek (tehát az 1-es és a 4-es csomópont között egy darab λ -út húzódik, ami két fizikai szakaszból áll). A hálózat logikai topológiájában (lásd az ábra (b) részét) tehát két csomópont szomszédos, ha azokat a fizikai hálózatban λ -út köti össze. Tegyük fel, hogy a csomópontok nem képesek a felszakításra, azaz egy új igény elvezetéséhez a már kialakult λ -út konfigurációt kell használniuk és továbbítani szeretnénk egy igényt az 1-esből a 2-es csomópontba. A forgalomirányítást a logikai topológia alapján végezzük (hiszen a forgalomirányítás számára ez látható), így a (b) ábrára tekintve látható módon az igény az összes szakaszt érintve fog eljutni az 1-es csúcsból a 2-esbe.

Láthatjuk, hogy az útvonal (λ -út) áthalad az összes fizikai szakaszon; mivel a λ -utak felszakítására nincs lehetőség, a 2-es csomópontban nem tudjuk felvezetni az igényt az elektronikus rétegbe, hogy feldolgozzuk az adatfolyamot. Ezért az igényt továbbítjuk a 4-es csomópontba, ezután innen a 3-ason keresztül jut el a célhoz. Az adott igény továbbításához nagy kerülőutat kellett tenni, aminek oka a hálózatban kialakult (a hálózat méretéhez képest) hosszú λ -út volt.

Nagyobb hálózatokban, sok forgalmi igény esetén lényegesen rosszabb a helyzet, hiszen ez az erőforrás-foglalási stratégia végponttól-végpontig összeköttetések számára foglalja le a hullámhossz-csatornákat. Mivel egy hullámhossz-csatornában egyszerre számos igény haladhat és az útvonalak átterelésére gyakorlatilag nincs lehetőség igények megszakítása nélkül, ezért az így kialakult logikai topológián kell elvezetni a később érkező igényeket is. A defragmentáltság tehát feleslegesen növeli a hálózat terhelését és így rontja annak kihasználtságát; a λ -utak felszakításával azonban, mint látni fogjuk, ez a probléma kiküszöbölhető.

1.5. Szimulációs vizsgálatok

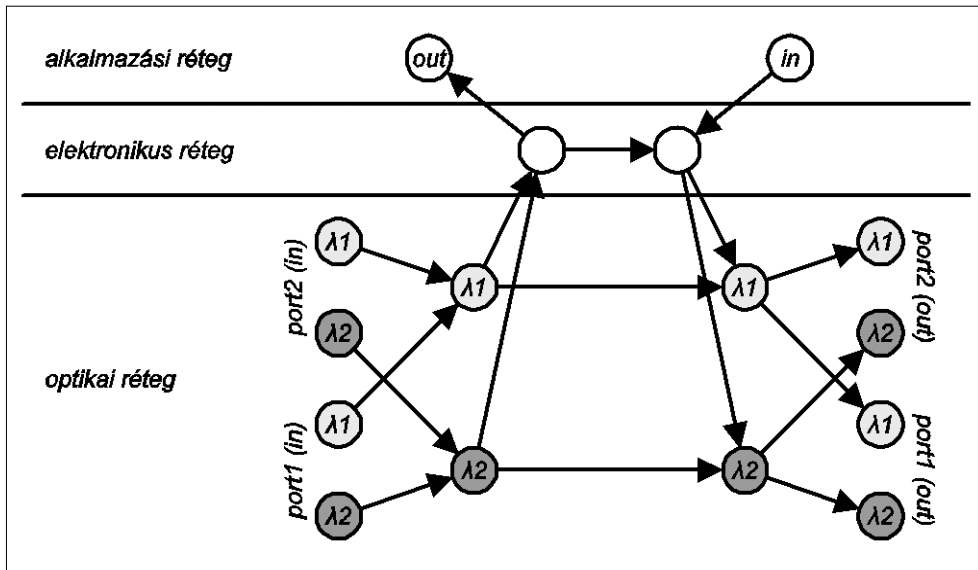
Munkánk során vizsgáltunk és összehasonlítottunk egy egyszerű és egy felszakításos forgalomkötegelési eljárást. Célunk volt, hogy szimulációval elemezzük, hogyan viselkednek a hálózatok különböző összetett forgalommal történő terhelés során. Cikkünkben egy konkrét szimulációt és annak eredményeit mutatjuk be részletesebben, melyben a két kötegelési modell összehasonlításával vázoljuk a defragmentálódási probléma hatását és jelentőségét, illetve azt, hogy a felszakításos forgalomkötegelési eljárás mennyire tudja biztosítani a hálózat megfelelő fragmentáltságát.

A szimulációk során referenciaként egy úgynevezett OXC-modellt használtunk. Ez olyan hálózatokat jelöl, melynek csomópontjai mind OXC típusúak, azaz sem forgalomkötegelésre, sem hullámhossz-konverzióra nem képesek, ezért minden forgalmi igényt exkluzív λ -úton vezetnek el. Később ismertetett példánkban ez a csatornák körülbelül 20-60%-os kihasználtságát eredményezi, ami közelítőleg megfelel a gyakorlatban alkalmazott hálózatok méretezési követelményeinek.

2. Szimulációs környezet

Kutatásainkhoz számítógépes szimulációt végeztünk, melynek során azt modelleztük, hogy a különböző kötegelési modellek hogyan vezetik el a felsőbb hálózati rétegek felől érkező forgalmi igényeket.

A forgalmat az igények időrendi listájával írjuk le; ezt a listát forgalmi mintának nevezzük. A szimulátor meghatározott forgalomirányítási és kötegelési algoritmusok szerint megpróbálja elvezetni az igényeket azok forrás és célcsomópontja között; ehhez egy kiválasztott útvonalon a megfelelő sávszélességet és erőforrásokat az adott véges időtartamra lefoglalja (például videokonferencia-hívások vagy helyszíni multimédiás köz-



3. ábra
A kötegelő csomópontok
modellje

vetítések számára). Amennyiben a szükséges sávszélességet semmilyen útvonalon nem sikerül lefoglalni, adott számú próbálkozás után az igény blokkolódik.

Az útválasztás során a hálózat fizikai topológiája és az alkalmazott kötegelési eljárásnak megfelelő csomópont modell (ez határozza meg, hogy a csomópont mely portjai közt haladhat forgalom) alapján készítettünk egy súlyozott éleket tartalmazó, úgynevezett logikai hálózatot, melyben Dijkstra útvonalválasztó algoritmusával az igényeket a minimális súlyú utakon vezetjük el.

A vizsgálatainkban alkalmazott forgalmi minták nagyságrendileg ezer forgalmi igényt tartalmaznak; ezeket az adott terhelésre jellemző valószínűségi változók paramétereit meghatározva, a hálózat topológiájának ismeretében véletlenszerűen generáljuk. Valószínűségi változóink a tartási idő, a születésintenzitás (milyen gyakran érkeznek igények a hálózatba) és a sávszélesség igény. Az igények feldolgozása során a program olyan információkat jelenít meg, melyekkel nyomon követhető többek között a hálózat terhelése, illetve a blokkolódott és az elvezetett igények száma.

A továbbiakban blokkolási arányon egy teljes forgalmi minta elvezetése során a blokkolódott és a felajánlott igények számainak arányát, hálózati terhelésen pedig a szimuláció során az egyes fizikai szakaszokon rendelkezésre álló összes kapacitás legnagyobb kihasználtságát értjük, linkekre átlagolva (a forgalmi minták jellege miatt feltehetjük, hogy ezen érték jól jellemzi az erőforrások kihasználtságát).

2.1. Hálózati csomópont modellek

A három eljárás vizsgálata során (referencia, egyszerű kötegelés, felszakításos kötegelés) a hálózatban különféle csomópont típusokat alkalmaztunk a vizsgált eljárások megvalósítására. A referencia modellben minden csomópont megvalósítható tisztán optikai eszközökkel; az ilyen csomópontok nem képesek sem forgalomkötegelésre, sem hullámhossz-konverzióra.

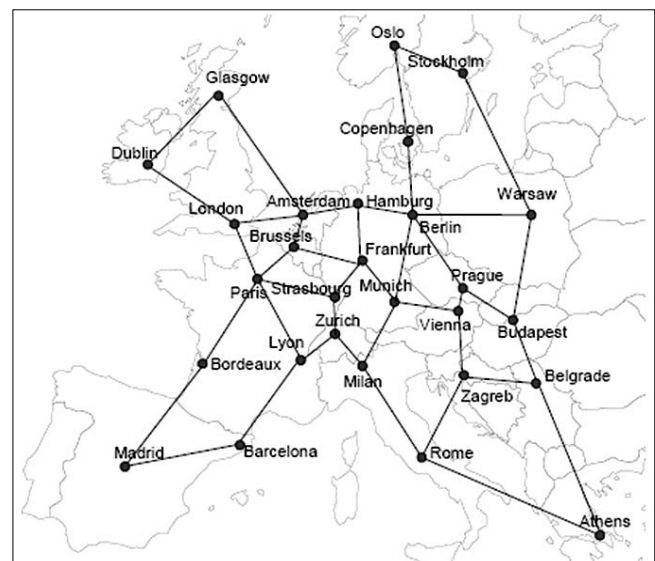
A kötegelő csomópontok felépítésének vázlata a 3. ábrán látható; a két típus (az egyszerű és a felszakítá-

sos) csak a vezérlőszék megvalósításában különbözik. Az egyszerűség kedvéért az ábrázolt csomópont két kiemenő és két bemenő porttal rendelkezik és két hullámhosszt képes kezelni; a minta alapján a struktúra könnyen általánosítható több portra és több hullámhosszra is. A kötegelő csomópontok alkalmazása többletköltséget jelent az OXC-khez képest, hiszen az E/O átalakítás drága eszközöket igényel, továbbá a nagy sebességű elektronika (melyet vizsgálataink során szoftverrel szimuláltunk) költségeivel is számolnunk kell; mindazonáltal látni fogjuk, hogy ezen az áron jelentős teljesítménybeli növekedést érhetünk el [9].

3. Numerikus eredmények

A szimulációhoz a COST 266 Basic Reference Topology hálózatát használtuk ([1] (4. ábra), mely 28 csomópontból és 41 élből áll. A hálózat csomópontjai minden kísérlet során egyformák voltak; külön kísérletet végez-

4. ábra COST266 Basic Reference Topology



tünk az OXC-s referencia modellre, az egyszerű, illetve a felszakításos kötegelési modellekre. A két utóbbi esetben minden csomópontban legfeljebb 25 O/E és ugyanennyi E/O átalakításra volt lehetőség. Vizsgálataink során feltételeztük, hogy a hálózat összes csomópontja képes a forgalomkötegelés megvalósítására; a valóságban azonban ez feleslegesen költséges lehet. A kötegelő csomópontok megválasztására [8] javasol eljárást.

A szimuláció gyors kivitelezhetősége érdekében a hálózat szakaszain 4 λ -csatornát alakítottunk ki és az egyes csatornák kapacitását a vizsgálat során 700 egységről 2700-ra növeltük 100 nagyságú lépésekben (a szakaszonkénti λ -csatornák számának és kapacitásának hatásait és a hatások skálázódását részletesebben elemzi [9]).

Az eredmények zajos jellegének csökkentése végett minden lépésben 4, azonos paraméterekkel, véletlenszerűen előállított forgalmi mintát vezettünk el a hálózaton; megfigyeltük, hogy a mintát alkotó igények mekkora hányada kerül blokkolásra és a hálózat teljes kapacitása milyen arányban kerül felhasználásra, majd a minták eredményeinek átlagát ábrázoltuk az 5. és 6. ábrák diagramjain. Korábbi tapasztalataink azt mutatták, hogy az adott paraméterek mellett 4 forgalmi minta eredményeinek átlagolása már kielégítő minőségű eredményeket ad.

Forgalmi mintáink mindegyike körülbelül 1500 forgalmi igényből állt, melyek sávszélességét egyenletes eloszlással generáltuk az 500-600 egység intervallumban. A 2000 időegység hosszú mintában megjelenő igények tartási idejét 80 időegység várható értékű exponenciális eloszlással határoztuk meg. Külön vizsgálatokkal megállapítottuk, hogy a hálózat a szimuláció időtartamához képest viszonylag hamar felvesz egy stabil állapotot; eredményeink ennek megfelelően értelmezendők.

Az ábrákon a három különböző görbe a három modell viselkedését mutatja.

A görbék kezdeti szakaszán, vagyis 1000 egység λ -csatorna kapacitásig a három modell közel azonosan viselkedik. Mivel a csatornák kapacitása legfeljebb 1000 egység, a forgalmi igények sávszélessége pedig 500-600 egység közé esik, minden λ -csatornában legfeljebb 1 igény vezethető el; ezen a szakaszon tehát nincs lehetőség kötegelésre.

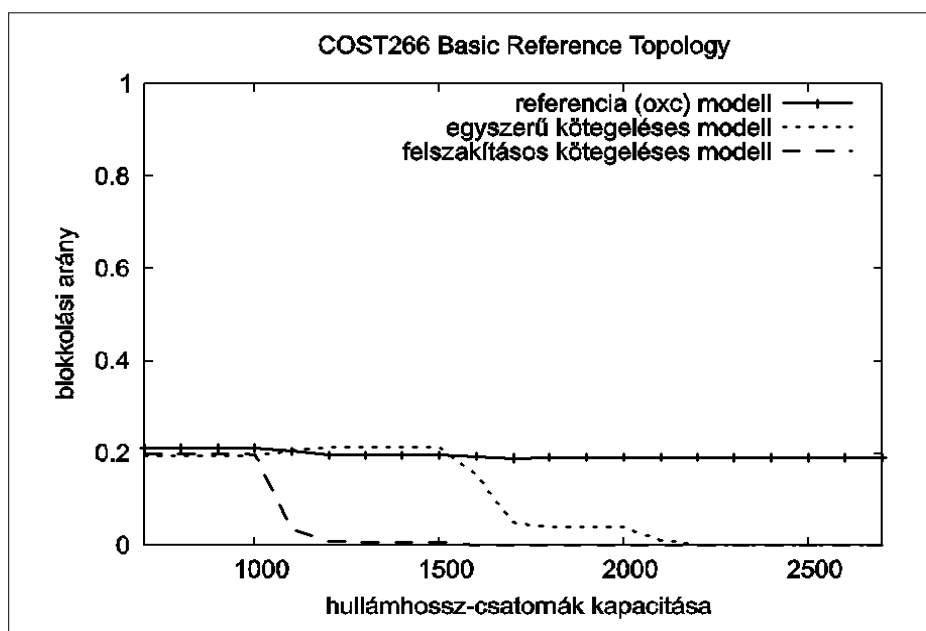
Amikor a λ -csatornák kapacitása az 1100 egységet eléri, a kapacitásviszonyok lehetővé teszik λ -csatornánként két forgalmi igény elvezetését. (Ennek megfelelően a hálózati terhelést ábrázoló görbén lépcsőfokok figyelhetőek meg 550 egységenként, ahogy a kapacitásviszonyok egyre több és több igény összenyalábolását teszik lehetővé. A lépcsőfokok az igények sávszélességeinek szórása miatt egyre elmosódottabbak.) Ennek megfelelően azt várnánk, hogy a kötegeléses modelleknél a blokkolási arány itt hirtelen lecsökken, a terhelési arány pedig megnő.

Ez utóbbi várakozásunk teljesül, ami igazolja, hogy a rendelkezésre álló kapacitás jóval nagyobb hányadát használjuk fel. Az egyszerű kötegeléses modell esetében azonban a blokkolási arány meglepő módon nemhogy nem csökken, hanem kis mértékben növekszik is.

Feltételeztük, hogy a jelenség oka a λ -utak defragmentálódása, vagyis az, hogy az egyszerű kötegeléses modell kezdetben, a javarészt üres hálózatban minden egyes forgalmi igényhez exkluzív, végponttól végpontig tartó λ -utakat rendel, melyeket nem módosíthat, míg az azt használó igény tart.

Ez a stratégia egy darabig igen jó hatékonyságot biztosít, azonban egy idő után szabad kapacitás hiányában az exkluzív útvonalak már nem haladnak a legrövidebb utakon. Ekkor a modell kénytelen kerülőutakon foglalni az újabb λ -utakat, vagy a meglévő, hosszú útvonalakon elvezetni olyan igényeket, melyek egy közelebbi célpont felé tartanak. Világos azonban, hogy az igények mindkét esetben kerülőúton halad-

5. ábra
A különböző kötegelési modellek
blokkolási arányai



nak, ezáltal feleslegesen sok hálózati erőforrást foglalnak.

A felszakításos kötegelő modell esetén ez a probléma nem áll fenn, ugyanis egy meglévő λ -utat annak tetszőleges csomópontjában felszakíthatunk és a felszakítás helyén lehetőség nyílik az igények újra-multiplexelésére.

A fenti feltevések igazolására megmértük, hogy az 5. ábrán az 1300 egység λ -csatorna kapacitáshoz tartozó kísérletekben az egyes modellek átlagosan milyen hosszú útvonalakon vezetik el a forgalmi minták igényeit. (Az útvonalhosszon itt ugrásszámot értünk, vagyis azon csomópontok számát, melyeken az igény keresztülhalad.)

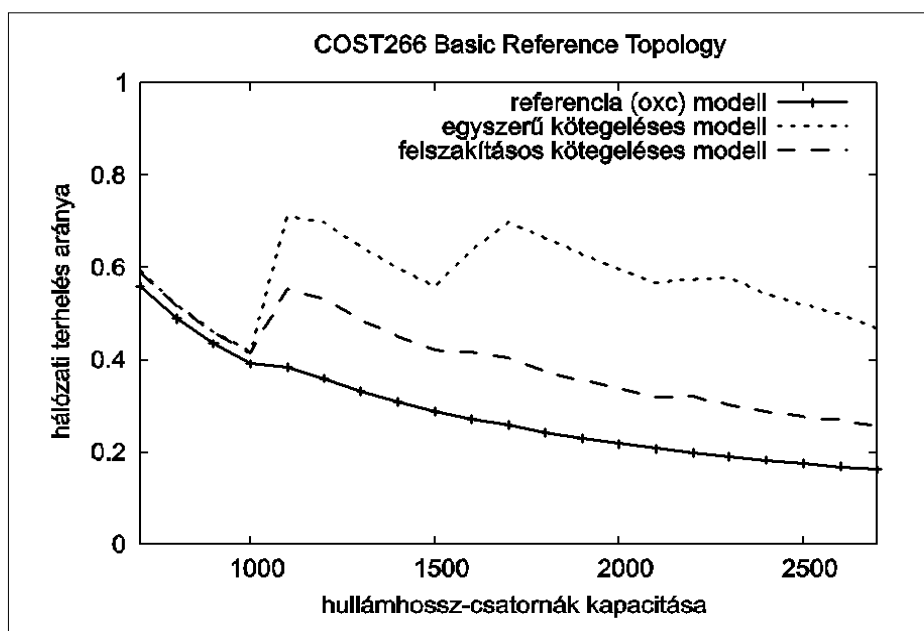
A referenciamodellben az átlagos ugrásszám 3.98 volt, míg az egyszerű és a felszakításos modellekben rendre 9.32, illetve 4.39. Ugyanakkor az igények blokkolási arányai 19.6% (referencia), 21.3% (egyszerű modell), illetve 0.7% (felszakításos modell) voltak. Ez azt mutatja, hogy a felszakítást nem engedélyező modell körülbelül kétszer annyi erőforrás foglалásával is csak jóval kevesebb forgalmi igényt képes elvezetni.

4. Összegzés

A fentiekben egy olyan szimulációs eredményről számoltunk be, mely igazolja, hogy a forgalomkötegelést alkalmazó kapcsolt optikai hálózatok átbocsátóképessége nagymértékben növelhető, amennyiben megengedjük, hogy a hálózati csomópontok a korábban kialakított λ -utakat felszakítsák (fragmentálják) és az elektronikus rétegben végződtessek, hogy ott lehetőség nyíljon a forgalom újranyalábolására. Ezzel jelentősen csökkenthető a defragmentáció okozta teljesítményromlás.

Irodalom

- [1] R. Inkret et al.: „Advanced Infrastructure for Photonic Networks: Extended Final Report of COST Action 266”, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, 2003.
- [2] A. S. Tanenbaum: „Számítógép hálózatok”, Panem kiadó, 2004.
- [3] B. Rajagopalan et al.: „IP over Optical Networks: Architectural Aspects”, IEEE Communications Magazine, September 2000, Vol.38, No.9, pp.94–102.
- [4] T. Cinkler: „Traffic and I Grooming”, IEEE Network, March/April 2003, Vol.17, No.2, pp.16–21.
- [5] Arthur S. Morris, III: „Optoelectronics: In Search of Transparent Networks”, IEEE Spectrum, October 2001, Vol.38, No.10, pp.47–51.
- [6] A. Chiu, E. Modiano: „Traffic Grooming Algorithms for Reducing Electronic Multiplexing Costs in WDM Ring Networks”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, January 2000, Vol.18, pp.2–12.
- [7] T. Cinkler, G. Geleji, M. Asztalos, P. Hegyi, A. Kern, J. Szigeti: „Lambda-path Fragmentation and De-Fragmentation through Dynamic Grooming”, ICTON 2005, Barcelona, Spain, July 3-7, 2005.
- [8] M. Perényi, J. Breuer, T. Cinkler, Cs. Gáspár: „Grooming node placement in switched multilayer networks”, ONDM 2005, Milan, Italy, February 7-9, 2005.
- [9] M. Asztalos, G. Geleji: „Forgalomvezetés vizsgálata optikai gerinchálózatokban”, Tudományos Diákköri Konf., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 2005.



6. ábra
A kötegelési modellek működése során mért hálózati terhelés

Physical Constraints of the 10 and 40 Gbit/s DWDM Systems

Keywords: DWDM, non-linearity of fibres, Q-factor, error-rate

Due to the growing transmission demands and the technical evolution, the DWDM systems are having more and more channels for the transmitting of digital streams of higher and higher speeds. In case of 10 Gbit/s systems, and 40 Gbit/s ones in particular, the dispersion characteristics of the optical fibres come to the focus of attention. Due to the high optical levels that can be provided with optical amplifiers, non-linear phenomena can be observed in the optical fibres which are in close relation with the high-speed transmission and they have to be taken into account when designing, installing and operating such systems.

Polarization Mode Dispersion and its Compensation Possibilities in WDM Networks

Keywords: Polarization Mode Dispersion, PMD compensation

The tremendous growth in broadband communication services, brought for the phenomenal expansion of the Internet, has triggered an unprecedented demand for bandwidth in telecommunication networks. Because of this bit rate expansion new physical effects become the limiting factor of the telecommunication systems. One of the most important physical effect is the Polarization Mode Dispersion. In systems using 2.5 Gbit/s bit rate the influence of the PMD is negligible, but in case of higher bit rates such as 10 or 40 Gbit/s the PMD becomes the most dominating physical impairment which limits the telecommunication systems. In the last years many kind of PMD compensation techniques have been developed.

Optical Links between Satellite Systems

Keywords: exo-atmospheric propagation, IOL, ISL, SILEX, Acquisition-Tracking Mode

The first exo-atmospheric one- and two-way data links between the ARTEMIS (GEO) and observation (LEO) satellites was installed by ESA at the end of 2001. The terminals of the SILEX systems use the 800 nm optical communication band. Data rate is 2 Mbps for forward and 50 Mbps for return channel. The quality of data transfer is characterized by bit error rate of $10^{-6} \pm 10^{-9}$. The suitability of the optical links in satellite-submarine communications are briefly mentioned. Development stages, achievements reached and research activities of the future optical Inter Orbital Links systems are described.

Node Implementation and Label Processing in Optical Packet Switched Networks

Keywords: SCML, WDM, optical filters, wavelength conversion

This paper reports an implemented optical packet switching node. First the most important theoretical aspects of these networks are introduced – optical transparency, label multiplexing techniques and optical prefiltering. Then an overview of the implemented node is given, which is based on Subcarrier Multiplexed Labels. Technical details of the optical and electrical signal processing are given, including the payload and label separation, the electrical data recovery, the routing and wavelength conversion, and finally the construction of the new SCML signal, along with measurement results of the transmitted signal.

Optically Controlled Semiconductor Devices and Circuits

Keywords: optical control, optical-microwave mixing, phase detection, optically stabilized oscillators, FET models

This paper presents how the semiconductor devices can be controlled by optical signal and several potential applications are presented such as amplifier gain control, phase shifting, optical-microwave mixing, reduction of oscillator distortion, and also simplification of the signal distribution and beam steering in future phased array antenna systems. The illumination affects many elements of the equivalent circuits and the effect is different in each case. In the first section we examine it in case of FETs. In the sec-

ond section we present the physical basics of the illumination. Lastly, the third section presents experimental results of a 0.5-12 GHz low noise GaAs FETs, which show the increase in the drain current, the change in the microwave scattering parameters and in the RF gain under illumination, furthermore an equivalent circuit model is computed.

On the Joint Application of Statistical Multiplexing and Traffic Grooming in Optical Networks

Keywords: dynamic optical networks, GMPLS, traffic grooming

The Multi-Layer optical transport networks are able to provide huge bandwidths. Using Wavelength Multiplexing (WDM), the available bandwidth can be extended up to several Tbps. Traffic Grooming allows bundling the traffic of two demands into one wavelength channel when the two paths for the two demands have common part. Considering the short-time variances of the traffic, effects of statistical multiplexing can be exploited to decrease the allocated network capacities. Both areas have been extensively dealt with in the literature, however, the effects of joint application of grooming and statistical multiplexing is hardly investigated. This paper is aimed at filling this gap. We overview the wavelength graph model, that is able to describe the traffic grooming, while various statistical multiplexing models are presented.

Signaling Architectures and Recovery Time Scaling for Grid Applications

Keywords: grid networks, signaling, resilience, queueing models

Local computational resources cannot keep up with the demands generated by some users/applications in an economical way. Therefore, distributed computing and the concept of computational Grids are now emerging. Novel transport network concepts are needed to support such visions and high-speed intelligent optical networking may be the required infrastructure that will enable global Grids. This paper presents simple analytical models for the implementation options of the optical control plane signaling, shows simulation models for different resilience strategies and finally shows some illustrative numerical comparisons to support the aforementioned efforts. This research area is also targeted in the European research project "Multi-Partner European Test Beds for Research Networking".

Consolidation-based Lifecycle of Provisioning-oriented Optical Networks

Keywords: UCLP, optical networks, provisioning, consolidation

The paper introduces the consolidation-based lifecycle of the provisioning-oriented optical networks and the related design and operating questions by means of the concepts of UCLP (User Controlled Lightpath) and customer controlled and managed dark fiber networks. Furthermore, results achieved from the research of consolidation strategies are presented.

Effects of λ -path De-fragmentation in WDM Optical Networks Employing Traffic Grooming

Keywords: dynamic optical network, WR-DWDM, traffic grooming

In wavelength-multiplexed optical backbone networks, traffic demands usually have bandwidth requirements which are smaller than the capacity of a wavelength channel by orders of magnitude. Thus, the allocation of exclusive wavelengths to each single demand leads to an uneconomical use of network resources. Traffic grooming is a means of significantly improving resource utilization; it allows demands that share networks nodes along their path to be routed along common wavelength channels between the shared nodes. Hereby we investigate the performance of two such grooming methods and demonstrate the phenomena of lambda-path fragmentation and de-fragmentation. A solution is also presented together with simulation results which show a significant increase of the network throughput.

Contents

<i>OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS</i>	1
Péter Jeszenői, Jenő Szatmári Physical Constraints of the 10 and 40 Gbit/s DWDM Systems	2
Szilárd Zsigmond Polarization Mode Dispersion and its Compensation Possibilities in WDM Networks	11
Andrea Farkasvölgyi Optical Links between Satellite Systems	17
Gábor Kovács, Tamás Bánky, Tibor Berceli Node Implementation and Label Processing in Optical Packet Switched Networks	23
Tamás Bódi, Péter Szekeres Optically Controlled Semiconductor Devices and Circuits	27
András Kern, György Somogyi, Tibor Cinkler On the Joint Application of Statistical Multiplexing and Traffic Grooming in Optical Networks	35
Zsolt Lakatos, Péter Szegedi Signaling Architectures and Recovery Time Scaling for Grid Applications	41
Tamás Kárász Consolidation-based Lifecycle of Provisioning-oriented Optical Networks	47
Géza Geleji, Márk Asztalos, Tibor Cinkler, Péter Hegyi Effects of λ -path De-fragmentation in WDM Optical Networks Employing Traffic Grooming	54

Cover: "Eye diagram" of a 10 Gbps data stream at the end of 100 kms optical fibre (Photo: Péter Jeszenői, PKI)

Szerkesztőség

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

Szabó A. Csaba, BME Híradástechnikai Tanszék
Tel.: 463-3261, Fax: 463-3263
e-mail: szabo@hit.bme.hu

Előfizetés

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

2006-os előfizetési díjak

Közületi előfizetők részére: bruttó 30.450 Ft/év
Hazai egyéni előfizetők részére: bruttó 6.800 Ft/év
HTE egyén tagok részére: bruttó 3.400 Ft/év

Subscription rates for foreign subscribers:

12 issues 150 USD,
single copies 15 USD

www.hte.hu

Felelős kiadó: NAGY PÉTER
Lapmenedzser: Dankó András

HU ISSN 0018-2028

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