

40 Gbit/s-os átviteli rendszerek alkalmazhatósági kérdései

JESZENŐI PÉTER

MATÁV Rt. PKI Távközlésfejlesztési Intézet
jeszenoi.peter@ln.matav.hu

Kulcsszavak: DWDM, SDH, fényvezető szál diszperziója, moduláció

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

Bevezetés

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

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

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

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

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

40 Gbit/s-os átvitel meglévő optikai hálózaton

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

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

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

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

A kromatikus diszperzió problémája

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

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

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

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

Polarizációs módus diszperzió

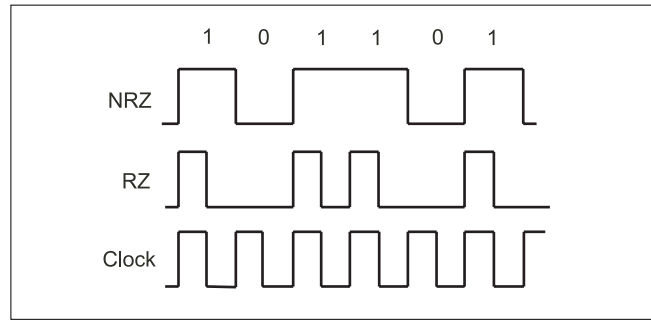
A nagysebességű összeköttetéseket súlyosan érintő másik degradáló paraméter a polarizációs módus diszperzió (PMD). A PMD értéke a fényvezetősál kábelezése és a kábel telepítése során fellépő, és valamilyen mértékben fennmaradó belső mechanikai feszültségektől is függ. Ennek következtében jelentősen eltérhetnek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

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

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

Új modulációs eljárások

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



1. ábra NRZ és RZ jelalakok

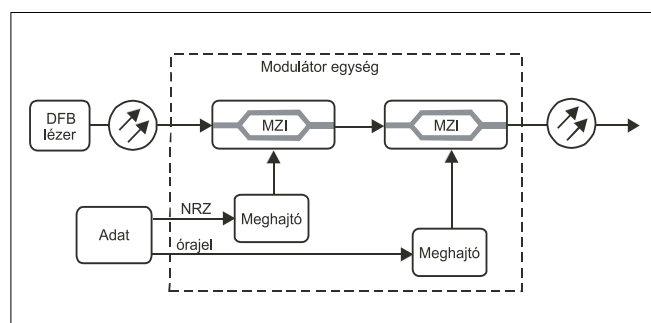
Ennek az eljárásnak legfontosabb előnye az egyszerűség és az olcsó megvalósíthatóság. Egészen 10 Gbit/s-ig ez a modulációs eljárás teljesen megfelelő még nagytávolságú összeköttetések esetében is. Az elméleti kutatásokból régóta tudjuk, hogy az NRZ formátumú modulációnál lehetne hatékonyabb modulációt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

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

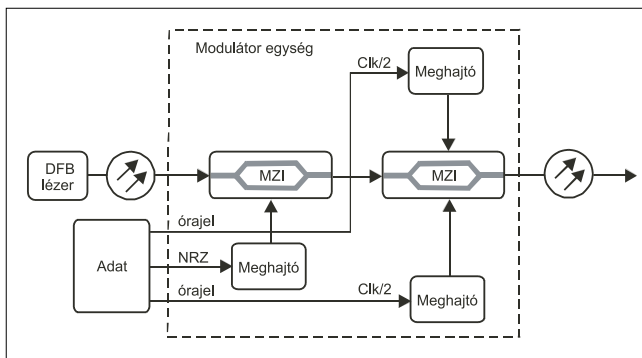
Az NRZ jelek átviteléhez hasonlóan egyszerűen megvalósítható az RZ (Return-to-Zero) jelalaktípus előállítás is, ez a digitális technikából jól ismert. 40 Gbit/s sebességen az elektromos tartományban az RZ jel előállítása nehézségeket okoz. A nehézségek enyhítésére az RZ jel előállítását az NRZ jelből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

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

2. ábra RZ modulátor



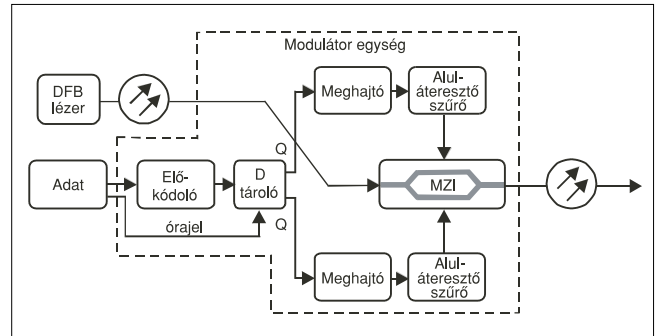
Az RZ, és az NRZ jelek átvitele esetén is az optikai vivőhullám nagy energiával van jelen a spektrumban, de információt nem hordoz. Kézenfekvőnek látszik tehát a vivőhullám kiszűrése a jelből. Ezt az eljárást nevezzük kétoldalsávú elnyomott vivőjű RZ modulációnak (double-sideband carrier-suppressed return-to-zero;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



3. ábra CS-RZ modulátor

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

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



4. ábra Duobináris modulátor

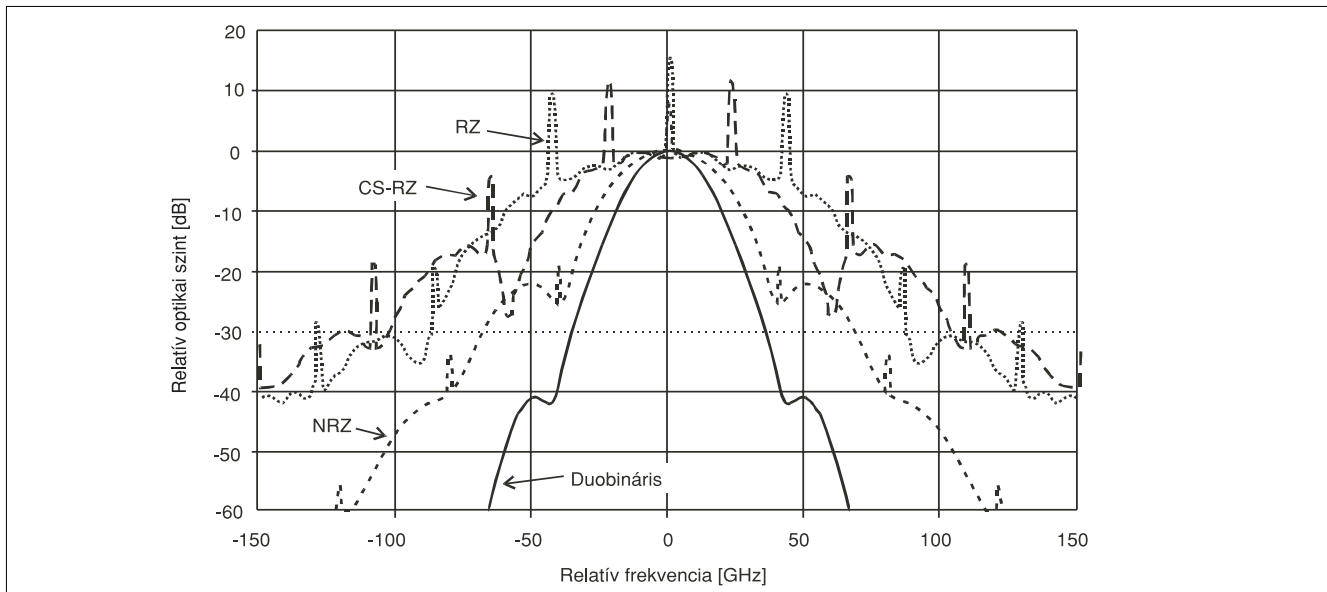
Köszönhetően a jel keskeny spektrumának, és annak, hogy a jel nagyenergiájú része a relatív nulla frekvencia közelében van, az ilyen modulációjú optikai rendszerek meglehetősen érzéketlenek a diszperziós és nemlineáris hatásokra. Jellemző, hogy ilyen eljárással sztenderd egymódusú szájakon 10 Gbit/s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

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

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

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

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



5. ábra Az optikai jel relatív sávszélessége különböző modulációk esetén

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

Kitekintés

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

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

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

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

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

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

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

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

Összefoglalás

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

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

Irodalom

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