

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, fényvezetőszál, 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 megjelentek az első üzemszerű forgalmat bonyolító rendszerek.

A korai egycsatornás, egymódusú fényvezető rendszerek idején az üvegszál 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 lézerverrások 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 fényvezetőszálas 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-

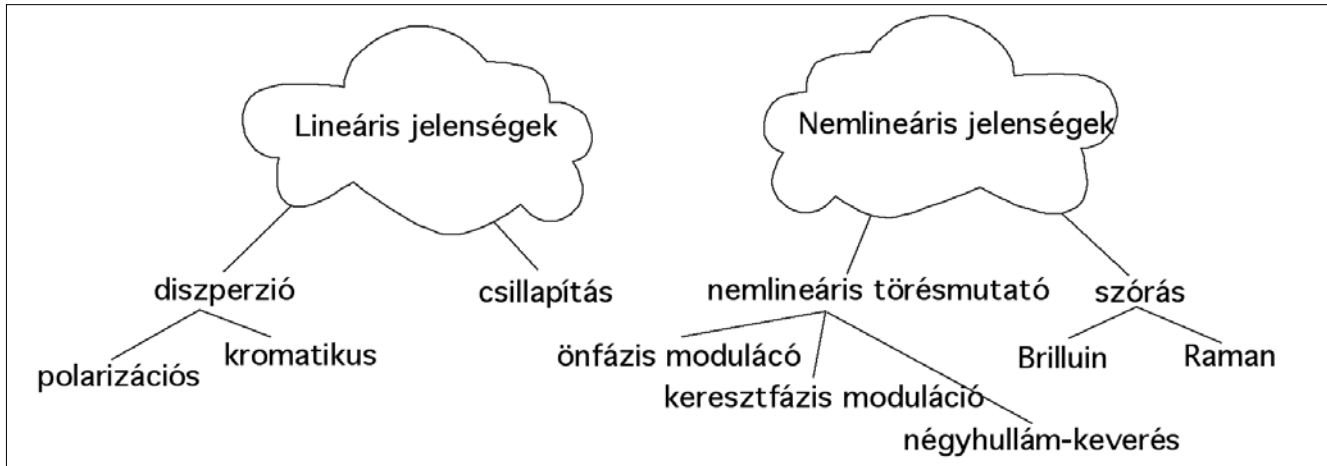
duláció egyszerűen kivitelezhető a fényforrásként használt félvezetőlézert meghajtó áramának ki-be kapcsolásával vagy külső modulátor alkalmazásával. A vételi oldalon nagyon egyszerű, direkt detektálás történik, nincs szükség a vivő előállítására, az eredeti digitális jelet a vevő fotódetektor áramának változása tartalmazza. A jel továbbításhoz nincs szükség különleges kódolásra, a szkremblerezett 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 szálban 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 szálát „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 száltípus 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 száltípusok 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 száltípusokat gyártónként különféle fantázianevekkel különböztetik meg.

2.1.1. Lineáris tulajdonságok

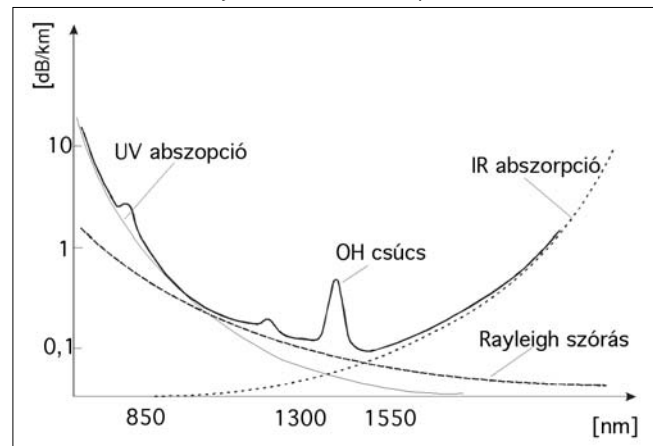
A fényvezetők legfontosabb átviteli jellemzői a hullámhossz függő csillapítás, a kromatikus és polarizációs módus diszperzió.

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

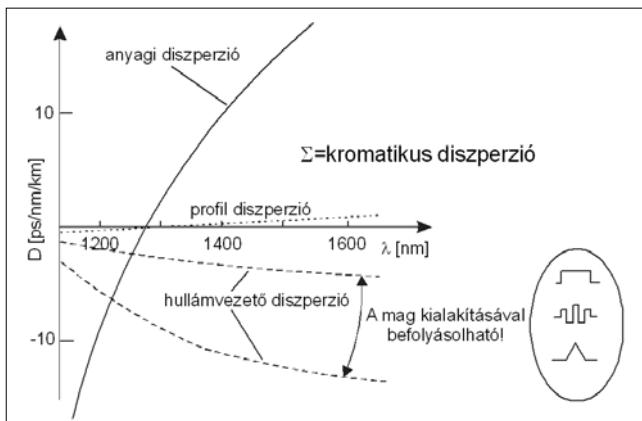
- Az abszorpció lehet intrinszc jellegű, amit az UV tartományba eső elektronátmenetek és az IR tartományú fotonok okoznak; szennyezés keltette, amit az átmeneti fémek, H₂ és OH ionok rezgései okoznak; és végül az anyag homogenitás hibái okozta problémák.
- A szórás veszteségek java részét a Rayleigh-szórás 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

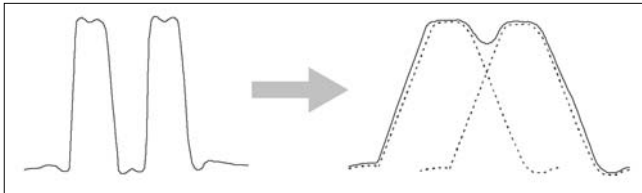


A fényimpulzus különböző hullámhosszúságú összetevői a szilíciumoxid törésmutatójának hullámhosszfüggése következtében eltérő sebességgel haladnak a fényvezetőszálban. A jelenséget *kromatikus diszperzió*nak (CD) nevezzük. A CD több hatás együtteseként keletkezik. Az egyes összetevők közül a hullámvezető 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 szálba 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.

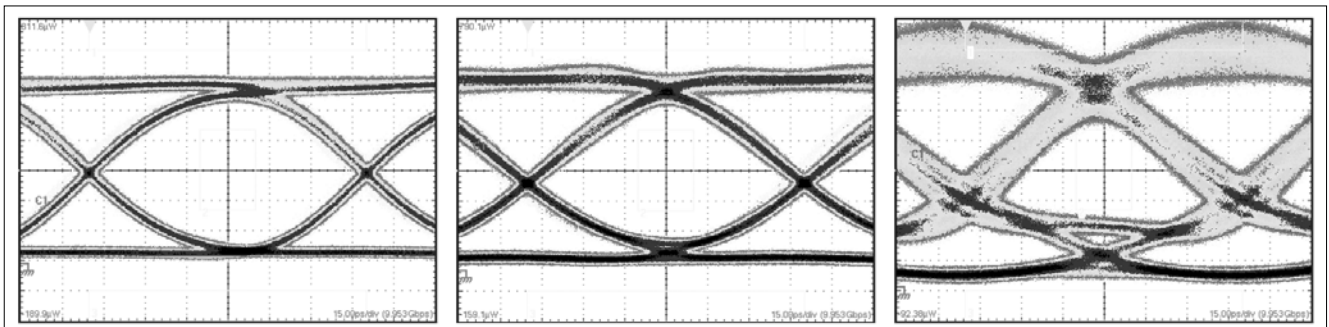
Az 5. ábrán egy G.652 fényvezető szálban terjedő STM-64 (10 Gbit/s) szintű jelalak látható 5, 50 és 100 km fényvezetőszál közbeiktatása után. A vevő egy szabványos SDH referenciavevő. Jól megfigyelhető az impulzuskiszélesedés és az, hogy 100 km szálhossz mérésakor használt optikai erősítő miatt szemmel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

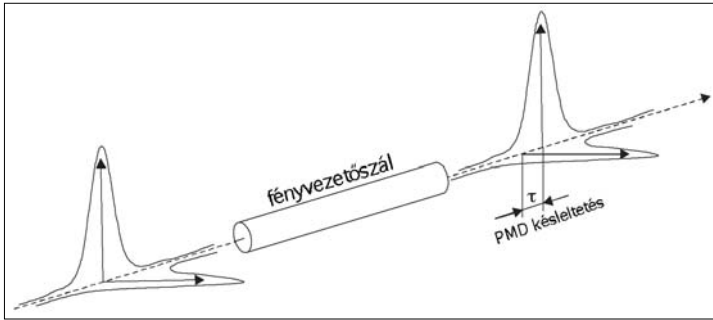
A fényvezetőszál izotróp anyagának és körkeresztmetszetének ellenére enyhén kettőtörő tulajdonságú. A nem teljesen pontos köralak, a gyártás során keletkező felületi egyenetlenségek, és a telepítés során keletkező hossz- és keresztirányú erőhatások, a hosszirányú csavarodás és hajlítás okozzák a kettőtörő jellegét. A polarizációs módus diszperzió a fény HE₁₁ 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 fényvezetőszál 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 fényvezetőszál 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 térerősséggel függő 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 fényvezető 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 fényvezető szálszakaszok 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 zsidó 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 túlkompensálását 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 hullámaival 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-erősítés-sel 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-sávzélességet 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-sávzélességnél 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 áramkörü elemek	Nem függ a teljesítménytől	Csökken a teljesítmény, BER	Rövidebb szakasz, kisebb csillapítású optikai szál
CD	Hullámhosszfüggő 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-hullámjainak kölcsönhatása	5 mW	Teljesítmény- és OSNR-csökkenés, jel instabilitás, áthallás, BER	Nagyobb spektrumszélességű forrás

Hatását a vivőhullámon alkalmazott néhány százalékos alacsonyfrekvenciás (30...100 kHz) amplitúdó-modulációval lehet csökkenteni.

A stimulált Raman-szórás a fény és a szál SiO₂ 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:

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

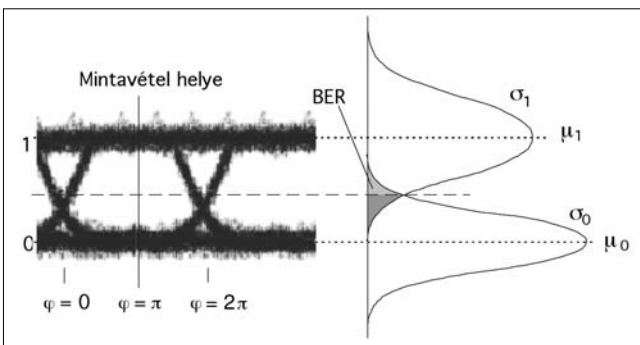
ahol az *erfc* az x-től a ∞ -ig integrált kiegészítő hibafüggvény, μ a döntési küszöbszint. Az ITU az *erfc* függvény közelítésére az alábbi képletet ajánlja:

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

ahol

$a_0 = 1.69071595$	$b_0 = 1.90764542$
$a_1 = 1.45117156$	$b_1 = 3.79485940$
$a_2 = 0.50003230$	$b_2 = 2.90845448$
	$b_3 = 1.00000000$

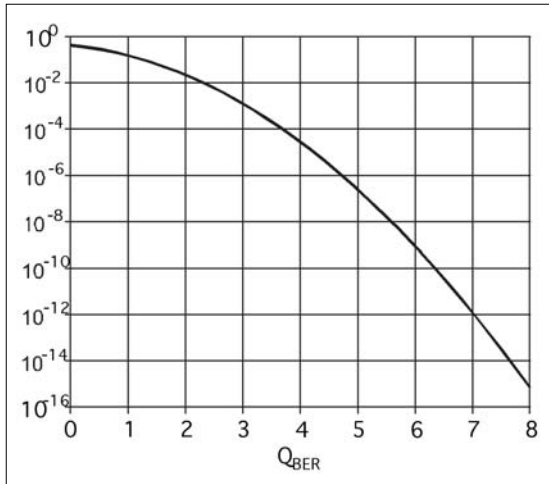
7. ábra
Zajeloszlás, logikai 1-ek és 0-ák átlagértéke és szórása



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 mindenkoribite sebességnek



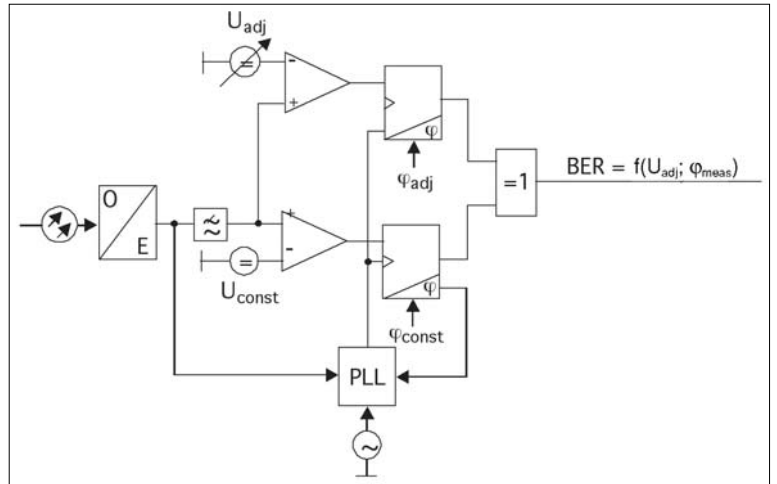
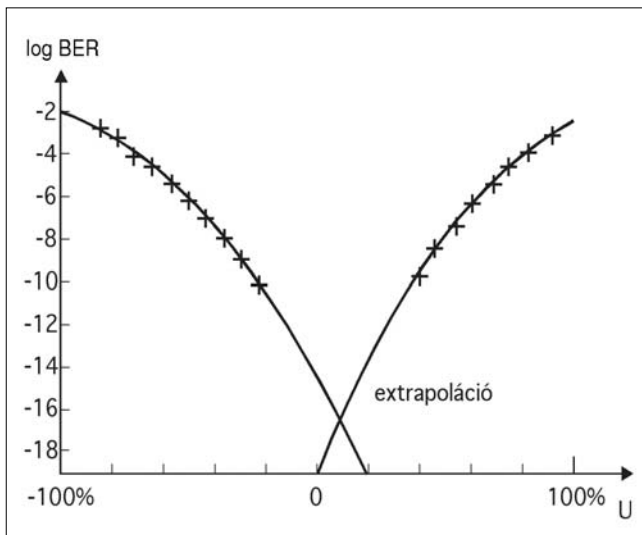
8. ábra Q-faktor és BER közötti összefüggés

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



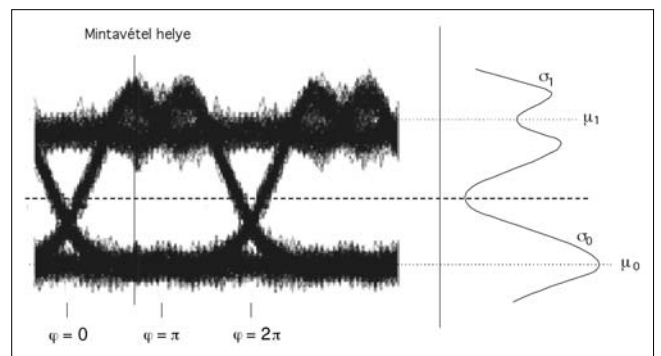
9. ábra Szinkron kétküszöbös módszer Q-faktor méréshez

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

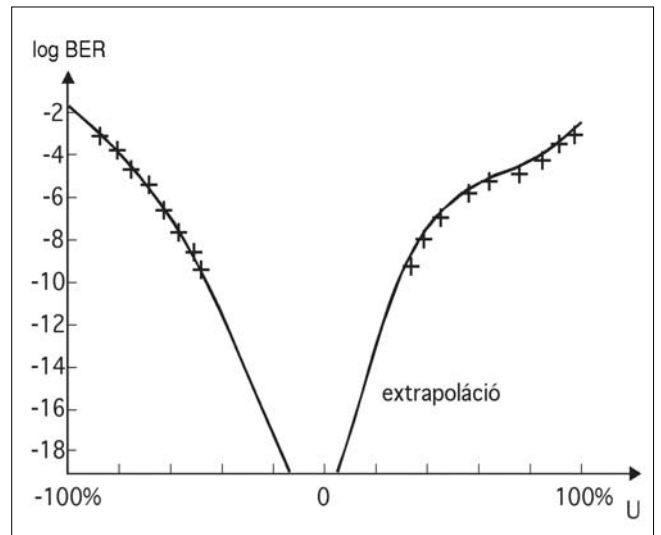
3.1. A Q-faktor mérés alkalmazási lehetőségei

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 taka-

rítható 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).

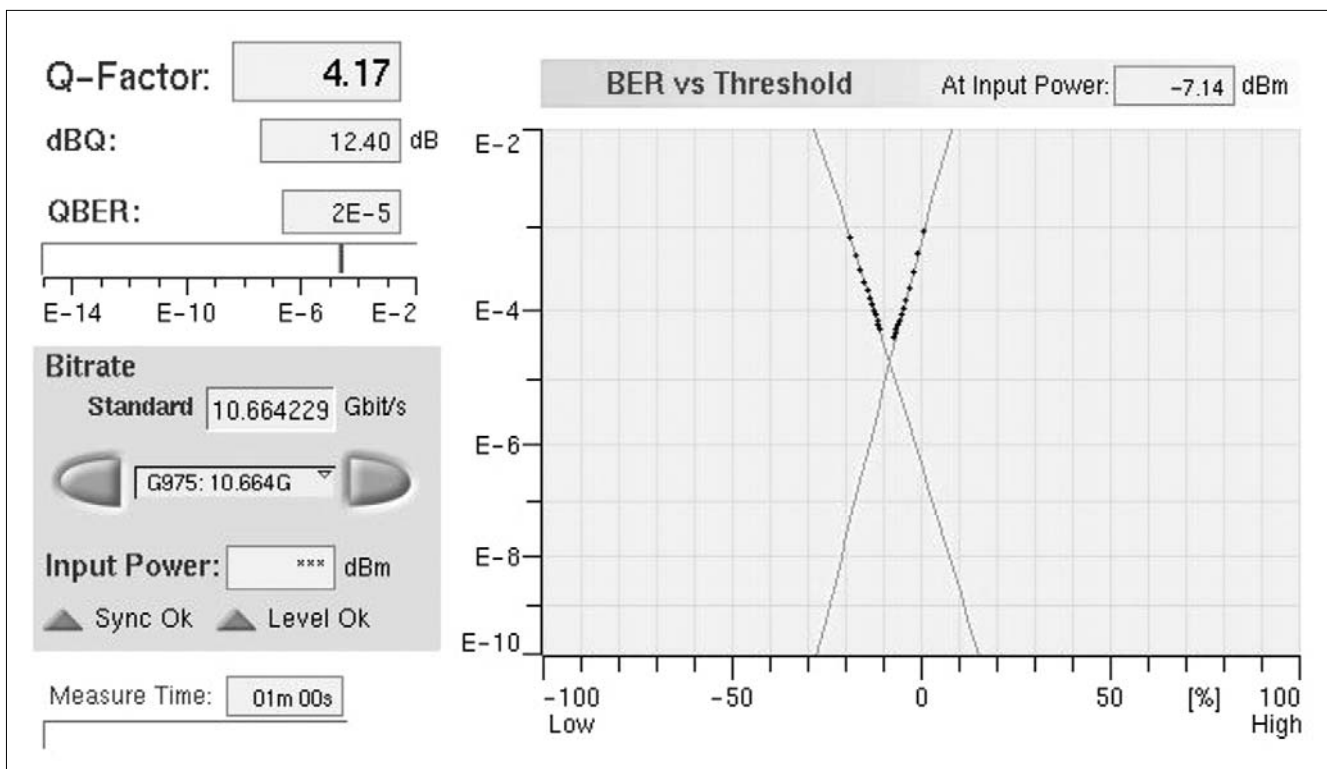
A Q-faktor mérés másik érdekes alkalmazási lehetősége az optikai rendszerek diszperzió kompenzálási és szintbeállítási kérdéseinek optimalizálása. A Q-faktor mérés lehetőséget teremt a kompenzálási, szintbeállítási paraméterek változtatása utáni gyors ellenőrzésekre, lehetővé téve az optikai jel szempontjából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

