

Optikai jelszint meghatározása CWDM hálózatokban a fizikai hatások figyelembevételével

SZABÓ ÁRON, ZSIGMOND SZILÁRD

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
{szabo.aron, zsigmond}@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: WDM, CWDM, Q-faktor, stimulált Raman szórás, GVD, RIN

Napjainkban az optikai hálózatokkal kapcsolatban alapvető célkitűzés a nagyobb áthidalható távolság elérése. Számos technikai megoldás létezik ennek a megvalósítására, de a legegyszerűbb a szálba csatolt optikai teljesítmény növelése. A becsatolt teljesítménynek azonban határt szab a szálban fellépő nemlineáris optikai hatások megjelenése, korlátozva a tisztán optikával áthidalható távolságot is. A cikkben egy analitikus modellt ismertetünk a számítási eredményekkel együtt, amely a jelminőség degradációját írja le 8 és 18 csatornás CWDM (Coarse WDM – ritka hullámhosszosztásos WDM) rendszerekben, 2,5 Gbit/s sebesség mellett. A modell számítási eredményeire alapozva megadjuk a szálba csatolt optimális jelteljesítményt különböző hálózati paraméterek esetén.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kap az access hálózatok rézről optikára történő migrációja. Ugyanez a tendencia volt látható az elmúlt években a belvárosi helyi hálózatokban (metropolitan area network, MAN). Erre a célra ideális szabvány a CWDM (coarse WDM, azaz ritka hullámhosszosztásos WDM), ami az 1270-1610 nm-es tartományt használja 20 nm csatornákózzal, 18 csatornát biztosítva ezáltal. A legtöbb esetben a CWDM rendszerek felső 8 csatornáját építik ki, 1470 nm-től 1610 nm-ig. Ennek oka egyrészt az optikai szál 1383 nm-nél lévő OH⁻ abszorpció maximumának elkerülése, másrészt a jó minőségű lézerek hiánya 1400 nm környékén.

A WDM rendszerekben fellépő fizikai hatásokat a szakirodalom részletesen tárgyalja, azonban ezeknek az összefoglalása CWDM rendszerekre, és az optimális becsatolt teljesítmény meghatározása ezeket figyelembe véve ismereteink szerint eddig nem volt fellelhető.

A cikk bemutat egy analitikus modellt és a belőle kapott számszerű eredményeket a fizikai hatások okozta jelminőség romlásra 8 és 18 csatornás, egyirányú pont-pont CWDM összeköttetésekben, 2,5 Gbit/s sebesség mellett, 3-féle szálhosszúságnál (60 km, 100 km, 140 km). A jelminőség romlására kapott eredmények alapján meghatároztuk azt a maximális becsatolt teljesítményt, ami mellett a jel minősége a vevő oldalon még megfelelő. Ezt a teljesítményt tekintjük a hálózat szempontjából optimális teljesítménynek.

2. Analitikus modell

A DWDM (dense WDM, azaz sűrű hullámhosszosztásos WDM) rendszerekben fellépő nemlineáris optikai hatásokat részletesen tárgyalja [1,2]. CWDM rendszerek esetében a széles csatorna-

köz, a DWDM-nél rövidebb távolságok és az erősítetlen jelteljesítmény miatt a nemlineáris hatások közül csak a stimulált Raman-szórás (stimulated Raman-scattering, SRS) és a stimulált Brillouin-szórás (stimulated Brillouin-scattering, SBS) számottevő [2,3]. A CWDM rendszerek főleg 2,5 Gbit/s sebességen működnek, így a számításhoz is ezt a sebességet választottuk. A polarizációfüggő jelenségek, a polarizáció módusdiszperzió (polarization mode dispersion, PMD) és a polarizációfüggő csillapítás (polarization-dependent loss, PDL) a viszonylag alacsony átviteli sebesség miatt elhanyagolható [4].

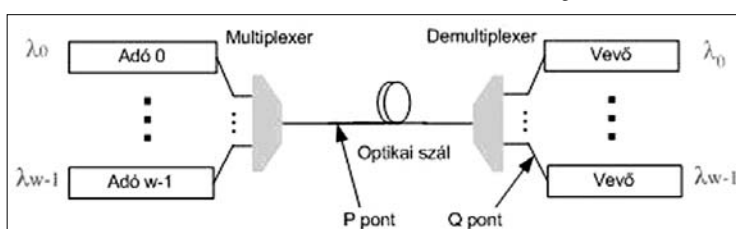
Diszperziókompenzáló egységeket (dispersion compensation unit, DCU) CWDM rendszerekben nem használnak [5], ellentétben a DWDM rendszerekkel. Következésképp a csoportsebesség-diszperzió (group velocity dispersion, GVD) számottevő a CWDM rendszerekben és különböző módon hat az egyes csatornákra.

A modellben az 1. ábrán látható architektúrát vizsgáljuk. A cél lehető legnagyobb jelteljesítmény elérése a P pontban úgy, hogy a Q pontban a jel minősége még megfelelő legyen. Az 1 és 0 jelszintek teljesítményeit Gauss-eloszlásúnak tételezzük fel. Az eloszláshoz tartozó várható értéket és szórását μ -val és σ -val jelölve, a jel minőségét a vevő oldalon a Q-faktorral jellemezzük:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (1)$$

ahol a 0 és a 1 index rendre a 0 és 1 jelszintre utal.

1. ábra A vizsgált architektúra



A számításokhoz a gyakorlatban elterjedt ITU-T G.652 egymódusú szál numerikus adatait használjuk.

2.1. Az adólézerek zajának hatása

A modell a szálban fellépő fizikai hatások mellett magában foglalja az adólézer zajának a jel minőségét befolyásoló hatását is. Erősítők nem terjedtek el a CWDM rendszerekben [5], így ezek zaját nem vesszük számításba. Azonban számolni kell az adólézer relatív intenzitászájával (relative intensity noise, RIN), amely teljesítményfüggő és maximumának egy, a CWDM rendszereknél átlagosnak mondható értéket tekintünk, -120dB/Hz-et [6]. Egy [7]-ben bemutatott módszer alapján kiszámítható a RIN dB-ben megadott értékéből a jel intenzitásának dimenziótlan zajaránya:

$$\sigma = \sqrt{B_c \cdot 10^{RIN_{dB}/10}}, \quad (2)$$

ahol B_c a vevő elektromos sáv szélessége. Az 1 és 0 jelszint teljesítményének arányára az elterjedt 7,4 dB-t tekintve, továbbá feltételezve a RIN [1/Hz] $1/P^3$ -ös teljesítményfüggését [8], a két jelszint RIN miatti intenzitás-zaja egyszerűen számítható.

2.2. A szálban fellépő effektusok

A szálban való terjedéskor a GVD, az SRS és az SBS hatásait kell figyelembe vennünk. Az SBS hatása abban nyilvánul meg, hogy korlátozza az egyes optikai csatornák teljesítményét azáltal, hogy a Brillouin-küszöb fölött gyakorlatilag a teljes becsatolt teljesítmény visszaszóródik. Tekintve, hogy számos technológia létezik a Brillouin-küszöb növelésére, a számításokat egy széles teljesítménytartományban hajtjuk végre, 0 és 30 dBm között, ami mind a G. 652 szál Brillouin-küszöbe alatti, mind az afeletti tartomány egy részét magában foglalja.

2.2.1. A GVD hatása

A G.652 egymódusú szál, így módusdiszperzió nem lép fel a terjedéskor. A $D(\lambda)$ diszperziós paraméter az anyagi diszperzió és a hullámvezető diszperzió összege.

A szál végpontjában a mintavételezés a bitidők felénél történik. A GVD megváltoztatja a becsatolt jel alakját, aminek következtében a mintavételezett jelszint különbözni fog az eredetileg a szálba csatolt maximális jelszinttől. A jelalak változását leíró egyenlet [1] alapján:

$$U(z, T) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} U(0, \omega) \exp[(i/2)\beta_2(\omega)\omega^2 z - i\omega T] d\omega, \quad (3)$$

$$\text{ahol } U(z, T) = (1/\sqrt{P}) \exp(\alpha z/2) A(z, T) \quad (4)$$

a csillapodással normált burkoló, A pedig a valódi burkoló, z a szál kezdőpontjától mért távolság,

$$T = t - z/v_g \quad (5)$$

a burkolóval együtt mozgó koordináta-rendszerben mért idő, v_g a csoportsebesség, P a vizsgált csatornába csatolt teljesítmény, α a szál csillapítása, továbbá

$$U(0, \omega) = \int U(0, T) \exp(i\omega T) dT$$

a becsatolt jel Fourier-transzformáltja a $z=0$ pontban. $\beta_2(\omega)$, ami a terjedési együttható sorfejtésének 2. tagja, a G. 652. szál nyilvános [9] $D(\lambda)$ diszperziós paraméteréből számítható a

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D(\lambda) \quad (7)$$

összefüggéssel.

A számításhoz szükség van az $U(z, T)$ ismeretére. A CWDM rendszerek esetében elterjedt direkt modulációjú lézerek jelalakja jól közelíthető super-Gauss jelalakkal:

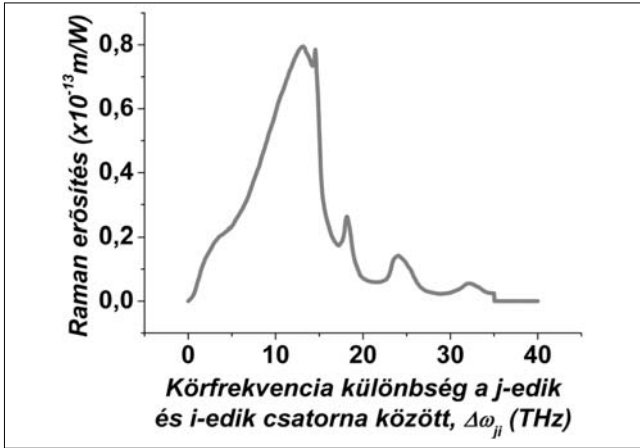
$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right], \quad (8)$$

ahol T_0 az $1/e$ intenzitású helyen mért félértékszélesség, C a lézer chirp-paramétere, ami a teljesítmény spektrális eloszlásának időbeli változására jellemző, m pedig a jelalak sarkosságát szabályozza. [10] alapján, rövid számolással az $m=3$ becslést adhatjuk, a chirp-paraméter értékét konkrét mérési eredmény alapján [11] pedig $C=-3,6$ -nek vesszük. Feltételezzük továbbá, hogy a chirp-paraméter nem függ a modulációs frekvenciától és az intenzitástól, ami jó közelítéssel igaz [12].

A jelalak módosulásának számításakor figyelembe kell venni, hogy a vevőoldalon kétféle bit érkezik, illetve a non-return-to-zero (NRZ) moduláció miatt az azt megelőző és azt követő bit is hatással lehet a vizsgált bit alakjára. Az egy bitidőnél távolabb lévő bitek hatását elhanyagoljuk. A 0 és az 1 vevőoldali jelszint esetében is 4-4 lehetséges bitsorozatot különböztetünk meg: 0 jelszintre a 000, 001, 100, 101 sorozatoknak egyformán $1/4$ a valószínűsége, 1 jelszintre pedig a 010, 011, 110, 111 sorozatok lehetségesek, szintén külön-külön valószínűséggel. Ezekkel számolva, NRZ modulációt szimulálva az önmagában a GVD hatását figyelembe vevő μ_{1GVD} és μ_{0GVD} jelszint várható értékek kiszámíthatók. Azzal a közelítéssel élünk, hogy a GVD a jelszint várható értékét befolyásolja, de a szórását változatlanul hagyja [13].

2.2.2. Az SRS hatása

Az SRS egy inelasztikus szórási jelenség, amelyben az egyes hullámhosszakhoz tartozó fotonok a hullámvezető molekuláin alacsonyabb energiájú, így alacsonyabb frekvenciájú fotonállapotokba szóródnak, miközben optikai fotonok keletkeznek. Az eredeti hullámot pumpáló hullámnak, a szórt hullámot Stokes-hullámnak nevezzük. Egy adott pumpáló – Stokes-hullámhosszpárt tekintve, ha a Stokes-hullámhosszon már vannak fotonok, akkor az SRS a Stokes hullámot erősítő folyamat [1]. Két CWDM csatornát tekintve pontosan ez a helyzet, hogyha a frekvenciáik különbsége a Raman-erősítési görbe (2. ábra) tartományába esik. A szálnak azon helyein történik szóródás, ahol az 1 jelszintjeik térben átfednek. Emiatt a pumpáló hullámból energia áramlik a Stokes-hullámba. A Stokes-hullám iránya SRS esetén a pumpáló hullámmal megegyező, így a vevőoldalon zajt eredményez a pumpáló és a Stokes-csatornákban, rontva a jel minőségét.



2. ábra A Raman-erősítés spektruma

Tekintsünk két csatornát, melyek hullámhossza igen közel van egymáshoz! Két ilyen csatorna közti, SRS miatti áthallást a [14]-ben közölt modell részletesen tárgyalja, és ez a modell alkalmazható DWDM rendszerek esetében, ahol a csatornaköz nagyságrendileg 1 nm. CWDM rendszerek esetében ezt a modellt módosítani kell a jóval nagyobb, 20 nm-es csatornaköz miatt. A modellben az SRS miatti áthallást leíró integrál a csatornaközt egy $g_R \Delta f_{ji}$ tényezővel veszi figyelembe, ahol j a Stokes-csatorna sorszám, i a pumpáló csatornáié, Δf_{ji} a Stokes- és a pumpáló csatorna frekvenciájának különbsége, g_R pedig a Raman-erősítés meredeksége $\Delta\omega_{ji}=0$ közelében, $\Delta\omega_{ji}$ a körfrekvenciák különbsége. A modell $g_R \Delta f_{ji}$ tényezőjét $g_R(j,i)$ -vel kell helyettesíteni, ami a Raman-erősítés értéke $\Delta\omega_{ji}$ -nél.

A 2. ábra az 1550 nm pumpáló hullámhossz melletti Raman-spektrumot mutatja az ITU-T G. 652. egymódusú szálban. Az erősítés mértéke a pumpáló hullámhosszal fordítottan arányos [1].

[14]-ben az SRS okozta teljesítménycsökkenést a pumpáló csatornában a szál egy pontján egy Gauss-eloszlású $x(z,t)$ valószínűségi változó jellemzi, ahol z jelöli a szál kezdőpontjától mért távolságot, t pedig az idő. A jelalakot NRZ modulációjú négyesjellel közelítve x várható értéke és szórása, μ_x és σ_x meghatározható [14]. Ebben az esetben z a szál hossza.

A 2-nél több csatornás probléma kezelésére azzal a közelítéssel élünk, hogy a csatornák közötti kölcsönhatás úgy kezelhető, hogy a csatornákat pumpáló – Stokes – csatornák összes lehetséges kombinációjának tekintjük. Jelentse μ_{xji} és σ_{xji} a j -edik és i -edik csatorna kölcsönhatása miatti μ_x és σ_x értéket. Az i -edik csatorna jelteljesítményének változását a többi csatorna hatásának felösszegzésével kapjuk:

$$\mu_{xi} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^W \mu_{xji} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^W \mu_{xij} \quad (9)$$

$$\sigma_{xi}^2 = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^W \sigma_{xji}^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^W \sigma_{xij}^2 \quad (10)$$

W az összes csatorna számát jelenti. (9)-ben pozitív előjellel szerepelnek azok a tagok, amelyek az i -edik csa-

tornából történő kiszóródást írják le, negatívvá pedig azok, amelyek az ide való beszóródást. (10) azzal a feltevéssel írható, hogy a csatornák közti kölcsönhatásokat leíró valószínűségi változók függetlenek.

(9) és (10) felhasználásával az SRS hatása az 1. jelszint várható értékére és zajára, μ_{1SRS} és σ_{1SRS} minden csatornára külön-külön meghatározható [14].

3. A Q-faktor meghatározása

A Q-faktorokat minden csatornára külön-külön meghatározzuk. Egy csatorna Q-faktora arra jellemző, hogy a GVD, az SRS és a RIN együttes hatása hogyan befolyásolja a jel minőségét egy adott szálhosszúságnál, a becsatolt teljesítmény függvényében. A kiszámításakor azzal a közelítéssel élünk, hogy a GVD és az SRS egymástól függetlenül hat a jelre. A modellben minden csatornába azonos becsatolt teljesítményt tekintünk, a szál csillapítását pedig a jelszintek $e^{-\alpha L}$ -lel való szorzásával vesszük figyelembe, ahol α a szál csillapítása a csatorna hullámhosszán, L pedig a szál hosszúsága.

Ahogy a következő képletekből világosan látszik, ebben a modellben a csillapítás nem befolyásolja a Q-faktort, az exponenciális tényező kiesik.

$$Q_{tot} = \frac{\mu_{1SRS} \mu_{1GVD} e^{-\alpha L} - \mu_{0GVD} e^{-\alpha L}}{\sqrt{\sigma_{1RIN}^2 + \sigma_{1SRS}^2 e^{-\alpha L} + \sigma_{0RIN}^2 e^{-\alpha L}}} = \frac{\mu_{1SRS} \mu_{1GVD} - \mu_{0GVD}}{\sqrt{\sigma_{1RIN}^2 + \sigma_{1SRS}^2 + \sigma_{0RIN}^2}} \quad (11)$$

Megjegyezzük, hogy ettől függetlenül a vevőérzékenység korlátozza a vevőbe érkező minimális teljesítményt, tehát egy, a vevőt is figyelembe vevő modellben számolni kell a csillapítással.

Bevezetjük a Q_{SRS} mennyiséget az SRS hatásának más hatásoktól független jellemzésére:

$$Q_{SRS} = \frac{\mu_{1SRS}}{\sigma_{1SRS}} \quad (12)$$

Hasonlóan a GVD és a RIN jellemzésére:

$$Q_{GVD,RIN} = \frac{\mu_{1GVD} - \mu_{0GVD}}{\sigma_{1RIN} + \sigma_{0RIN}} \quad (13)$$

(12)-ben felhasználtuk, hogy az SRS csak az 1. jelszintre hat, (13)-ban pedig azt, hogy a GVD nem befolyásolja a jelszintek szórását, míg a RIN csak a jelszintek szórását módosítja.

4. Számítási eredmények

A következőkben közöljük a modelltől kapott számítási eredményeket a Q-faktorokra. A számításokat elvégeztük a 8 legmagasabb hullámhosszon működő CWDM rendszerre és a mind a 18 hullámhosszt magába foglaló rendszerre is. Mindkét esetben 3-féle szálhosszúságot állítottunk be és ezeken vizsgáltuk a vevőoldali Q-faktor értékét a becsatolt teljesítmény függvényében.

Bitsebesség	2,5 Gbit/s
A 8-csatornás CWDM rendszer hullámhossztartománya	1470 nm – 1610 nm
A 18-csatornás CWDM rendszer hullámhossztartománya	1270 nm – 1610 nm
Csatornaköz	20 nm
A fénysebesség vákuumban	299792458 m/s
Effektív szálkeresztmetszet	80 μm^2
A maximális RIN 0 dBm-nél	-120 dB/Hz
A vevő optikai sávszélessége	10 GHz
A vevő elektromos sávszélessége (B_c)	1,75 GHz
Szálhossz (L)	60 km, 100 km, 140 km
Az adólézer chirp paramétere (C)	-3,6
A szuper-Gauss jel sarkosság paramétere (m)	3
Elnyomási csillapítás (P_1/P_0)	7,4 dB
A szál diszperziós paramétere $D(\lambda)$	A szál specifikációja [9]
Raman-erősítés (g_R)	2. ábra

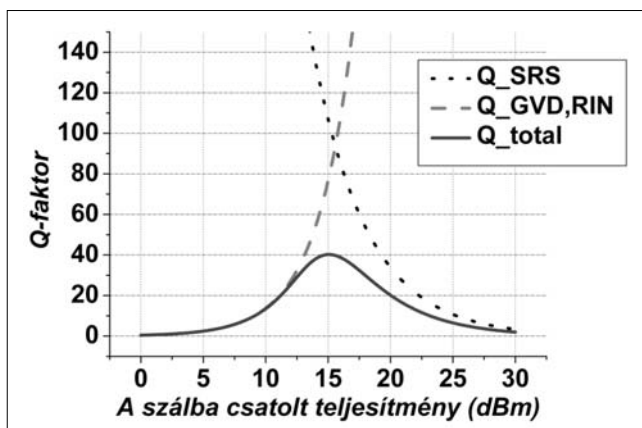
1. táblázat
A számításhoz használt hálózati paraméterek

Az eredmények kiértékelésekor a jel minőségét akkor tekintjük megfelelőnek, ha a vevőoldalon $Q \geq 14$ minden csatornára. A választást az a becslés indokolja, hogy mivel a jel $Q \geq 7$ esetben megfelelő minőségű, ha a vizsgált fizikai hatások lerontják a Q-faktort 14-ig, a hálózatban fellépő egyéb hatások sem tudják már 7 alá rontani. Ennek megfelelően az optimális teljesítményt úgy értelmezzük, mint azt a legnagyobb teljesítményt, amelyen még minden csatornában $Q \geq 14$ a vevő oldalon. A teljesítményre leginkább érzékeny csatornának azt nevezzük, amelyre ekkor $Q=14$.

Az 1. táblázat tartalmazza a számításokhoz használt paramétereket.

A 3. ábra mutatja a Q_{tot} , $Q_{GVD,RIN}$ és a Q_{SRS} általános viselkedését a becsatolt teljesítmény függvényében a 8-csatornás rendszer 1470 nm-es csatornájában, L szálhosszúság mellett.

3. ábra
A Q-faktorok függése a szálba csatolt teljesítménytől



A 3. ábráról leolvasható, hogy a növekvő teljesítmény növekvő $Q_{GVD,RIN}$ értéket eredményez, mivel a RIN $1/P^3$ -ös teljesítményfüggése miatt a σ_{1RIN} és σ_{0RIN} értékek csökkennek, miközben a GVD hatása nem függ a teljesítménytől, csak a szálhossztól és a csatorna hullámhosszától. Elég nagy becsatolt teljesítményre az SRS hatása válik jelentőssé, csökkentve a Q-faktort. Összevetve, minden konfigurációnál a Q-faktoroknak maximuma van csatornánként más-más teljesítmény-nél.

A 4. ábra mutatja a Q-faktorok teljesítményfüggését 8- és 18-csatornás rendszerekben, 60, 100 és 140 km-es szálhossz mellett. A 8-csatornás rendszereknél 3 különböző csatorna Q-faktorait mutatjuk be, a 18-csatornás rendszereknél pedig 4 különböző csatornát, beleértve minden ábrán a teljesítményre leginkább érzékeny csatorna Q-faktor görbéjét.

A 8-csatornás rendszerek esetében a teljesítményre legérzékenyebb csatorna hullámhossza viszonylag alacsony, ellentétben a 18-csatornás rendszerek ugyanezen hullámhosszával. A különböző csatornák Q-faktorainak maximumaihoz tartozó becsatolt teljesítmények csatornánként változnak ugyanazon szálhosszúság mellett is, de minden esetben 15 dBm közelében vannak. Ezt az eltérést a GVD és az SRS hullámhosszfüggése okozza.

A 18-csatornás rendszerek esetében a teljesítményre leginkább érzékeny csatorna hullámhossza a közepes hullámhossztartományban van. A legnagyobb Q-faktorhoz tartozó becsatolt teljesítmények itt is különböznek csatornánként, de átlagosan magasabb az értékük, 20 dBm közelében vannak.

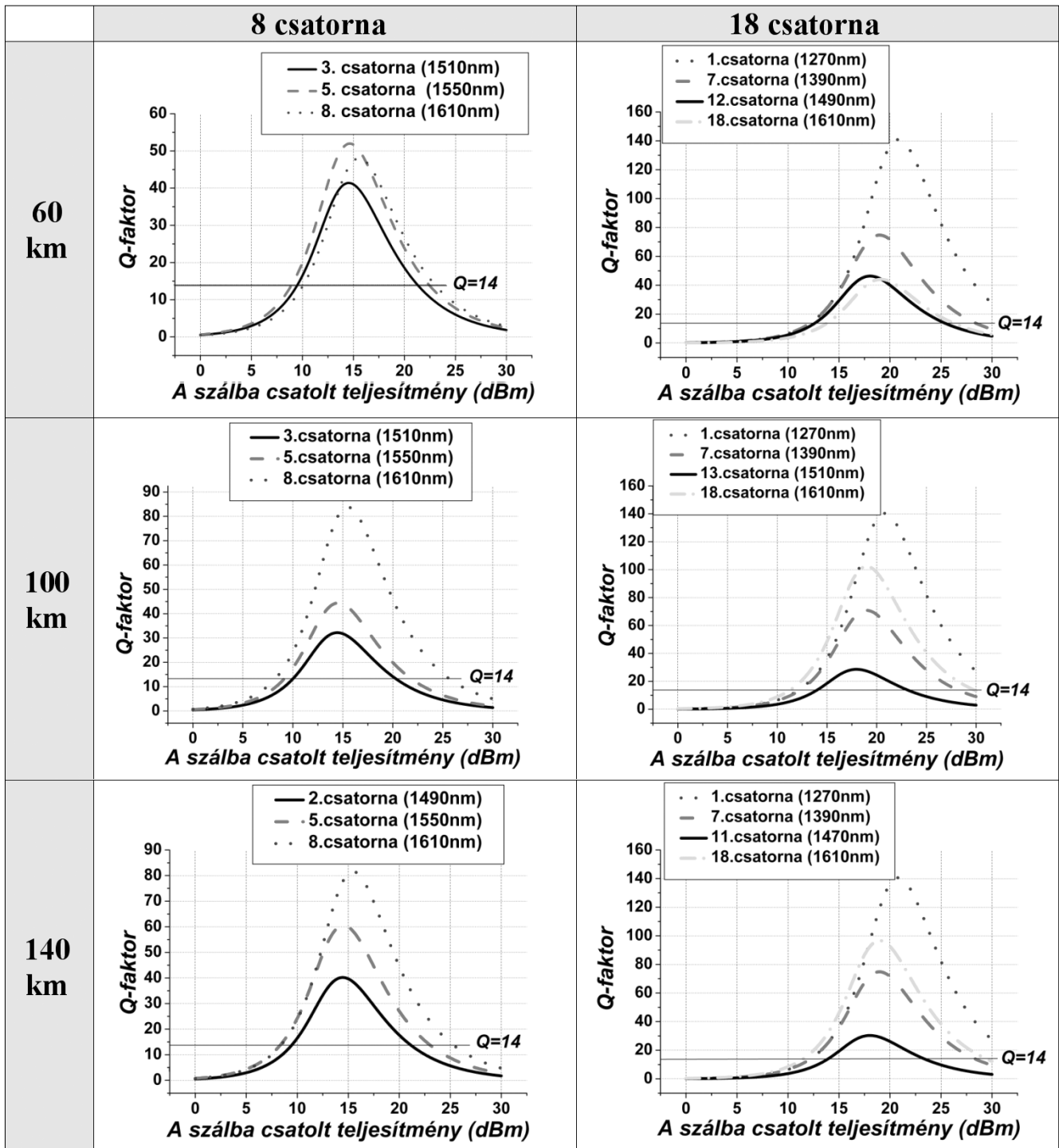
	60 km	100 km	140 km
8 csatorna	21,2 dBm	20,0 dBm	21,0 dBm
18 csatorna	25,3 dBm	25,1 dBm	26,3 dBm

2. táblázat
Optimális becsatolt teljesítmények

Az optimális teljesítményt úgy értelmeztük, mint azt a legnagyobb teljesítményt, amelynél még minden csatornára $Q \geq 14$. A 2. táblázatban tüntettük fel ezeket az értékeket a különböző beállított paraméterek mellett.

A 18-csatornás esetben számított optimális teljesítmények számottevően nagyobbak, mint 8 csatorna esetén, ami egyenes következménye a nagyobb csatornaszámnak. Azonban az optimális teljesítmények nem egyenesen arányosak a csatornaszámmal, ennek oka, hogy a növekvő csatornaszámmal a csatornák közti kölcsönhatás is erősödik.

Végül egy érdekes kérdésre is választ adhatunk: „Lehet egy jel minősége jobb 140 km után, mint 100 km után?” – Igen, ez lehetséges, ahogy a 4. ábra és a 2. táblázat alapján látható. Mind a Q-faktor értékek, mind az optimális jelteljesítmények magasabbak a 140 km-es szálhossz esetében, mint a 100 km-es szálhossznál, 8- és 18-csatornás esetben is.



4. ábra

A Q-faktor a szálba csatolt teljesítmény függvényében, különböző hálózati paraméterek esetén

A megoldás kulcsa a szuper-Gauss jelalak diszperziója. Ez a jelalak a GVD hatására nem csak kiszélesedik, hanem csúcsok és völgyek jelennek meg benne [15]. Megfelelő szálhosszúságnál, például 140 km-nél, egy diszperzió miatti csúcs jelentkezik a szál végpontjában, jelentősen javítva a jel minőségét.

5. Összefoglalás

A cikkben olyan modellt ismertettünk, ami figyelembe veszi a CWDM rendszerekben fellépő fizikai hatásokat,

ezek függését a beállított hálózati paramétereiktől, és így számszerűen jellemzi a vevő oldalon a jel minőségét. Megadja az egyes csatornák Q-faktorát különböző hálózati paraméterek mellett, a becsatolt teljesítmény függvényében. A meghatározott Q-faktor értékek alapján megadtuk a szálba csatolt optimális jelteljesítményt különböző hálózati paraméterek esetén.

A kapott eredmények hasznosak a hatékonyabb hálózattervezés szempontjából, vagy a már meglévő CWDM hálózatok teljesítmény ellátásának újrakalkulálásában.

A szerzőkről

Szabó Áron a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem negyed-éves mérnök-fizikus hallgatója. Kutatási területe a Távközlési és Médiainformaticai Tanszékkel együttműködésben az optikai hálózatokban fellépő fizikai hatások számítása, valamint a szállítókészítők számítógépes modellezése és távközlési alkalmazásai.

Zsigmond Szilárd a BME Távközlési és Médiainformaticai Tanszékének munkatársa. Kutatási területe az optikai hálózatok fizikai hatásainak számolása, az optikai hálózatokban történő útvonalválasztás. Számos nemzetközi és hazai projekt résztvevője, mint például COST 291; NoE e-Photon/ONe and NoE e-Photon/ONe+; CELTIC PROMISE; NKFP.

Irodalom

- [1] Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", (3rd ed.), Academic Press, 2001.
- [2] VPI Transmission Maker User's Manual, VPI Photonics, 1996-2007. <http://www.vpiphotonics.com/>
- [3] Adding/Splitting Nodes With Limited Glass Using CWDM Technologies, Central FL SCTE Chapter Pres., November 2006.
- [4] Zsigmond Szilárd, "Polarizációs Módus Diszperzió és kompenzációs lehetőségei WDM hálózatokban", Híradástechnika, Vol. LXI., 2006/2, pp.11–16.
- [5] Nagy Sándor, Szatmári Jenő, "CWDM rendszerek az optikai hálózatokban", Híradástechnika, Vol. LXII., 2007/6, pp.43–51.
- [6] Finisar Product Specification: Multi-rate CWDM Pluggable SFP Transceiver, FWDM-1621-7D-xx, Finisar Co., Rev. F., September 2005.
- [7] "Impact of Transmitter RIN on Optical Link Performance", Maxim High-Frequency/Fiber Communications Group, Application Note: HFAN-9.1.0 Rev 0, October 2004.
- [8] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", New York, Wiley, 1995.
- [9] Drew Perkins, "Dispersion and Skew" IEEE HSSG Interim, September 2006.
- [10] Appointech INC – 2,5 Gbit/s CWDM laser diode modul, October 2005. <http://www.appointech.com/downloads.html>
- [11] Aragon Photonics Labs Whitepaper, (WP001_0100_0307), 2007. http://www.aragonphotonics.com/docs/gc_fichas/doc/56FIPSprxy.pdf
- [12] A. Villafranca, et al., "Linewidth Enhancement Factor of Semiconductor Lasers: Results from Round-Robin Measurements in COST 288" in CLEO07, Baltimore, USA, May 2007.
- [13] Bing Xie, Yong Liang Guan, Jian Chen, Chao Lu, "Improvement of dispersion tolerance using wavelength-interleaving and forward error correction". IEEE School, Nanyang Technological University, Singapore, July 2006.
- [14] Keang Po Ho, "Statistical Properties of Stimulated Raman Crosstalk in WDM Systems", Journal of Lightwave Technology, Vol.18, No. 7, pp.915–921., July 2000.
- [15] Guangqiong Xia, Zhengmao Wu, Jianwei Wu, "Effect of Fiber Chromatic Dispersion on Incident Super-Gaussian Pulse Transmission in Single-Mode Fibers", pp.116–120., July 2005.

