

Maximális optikai jelszint meghatározása DWDM rendszerekben

MAZROA DÁNIEL, ZSIGMOND SZILÁRD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
mazroa@alpha.tmit.bme.hu, zsigmond@tmit.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: XPM, FWM, SRS, WDM, optikai jelszint, nemlinearitás

Az optikai összeköttetések kiépítésekor fontos, hogy az adóoldalon a lehető legnagyobb teljesítményt alkalmazzuk az átviteli távolság maximalizálása érdekében. Túl nagy optikai jelszintek alkalmazása esetén azonban nemlineáris hatások lépnek fel a szálban, amelyek a vett jel minőségét nagymértékben rontják. Az alkalmazott bitsebesség növelésével a nemlineáris hatások egyre dominánsabbakká válnak, ezért a bitsebesség további növeléséhez fontos ezek részletesebb vizsgálata. A nemlineáris hatásokra külön-külön már korábban készültek modellek. A cikk ezekből készült összefoglaló modellt mutat be, amely segítségével analitikus számításokkal meg lehet határozni a vevőoldalon a jel minőségét, Q-faktorát.

1. Bevezetés

A WDM rendszerekből felépített optikai hálózatokban közbülső OEO konverziós pontok nélküli, tisztán optikai útvonalak hosszát az optikai adatátvitel során fellépő fizikai hatások korlátozzák. Az optikai technológia utóbbi években tapasztalt ugrásszerű fejlődésének köszönhetően szinte minden fizikai hatás kompenzálható. Az egyetlen kivétel ez alól a zaj, mely keletkezését tekintve származhat az erősítőkből, lézradóból, csomópontokban az áthallásokból, illetve az optikai szálakban fellépő nemlineáris hatásokból. Természetesen léteznek különböző olyan technikák, amelyek csökkentik a zajok hatását, ilyen például különböző sávszűrők alkalmazása, de a teljes mértékű kompenzálása, törlése nem valósítható meg. A technológia fejlődésének következtében egyre alacsonyabb zajtényezőjű erősítők kerülnek forgalomba, a csomópontok áthallása is nagymértékben csökken, illetve az adólézerek zajszintje is igen alacsony lehet.

A nemlineáris hatások jelenségcsoportja az egyedüli, amely még mindig nagymértékben korlátozza az áthidalható távolságot. Ennek oka az, hogy bár léteznek alacsony nemlineáris indexű szálak, a jelenlegi hálózatokban alkalmazott szálak nemlinearitása jelentős. Ezért korlátozni kell a szálba csatolt jelszintet, ugyanakkor az optikailag áthidalható távolság növelésének érdekében célunk a lehető legnagyobb teljesítményt a szálba csatolni. Másrészt a bitsebesség növelésével is már egyre kisebb alkalmazott teljesítményértékeknél nemlineáris hatásokból származó jelminőségromlás lép fel. Ezen hatások 2,5 Gbit/s-nál elhanyagolhatóak, azonban figyelembe kell venni ahhoz, hogy az átviteli sebességet 10 vagy 40 Gbit/s-ra emelhesük.

Pillanatnyilag erre az egyetlen megoldás az adóteljesítmény oly módon való megválasztása, hogy a nemlinearitási küszöböt biztosan ne lépjük túl. Ennél sokkal kedvezőbb megoldás, ha leírásukra pontos modellt hozunk létre, melynek segítségével meghatározhatjuk, azt a teljesítménytartományt, amelyben még elfogadható

mértékben lépnek fel nemlinearitások, így maximalizálhatjuk az alkalmazható optikai szálak hosszát. További lehetőség a jelenleg alkalmazott, az amplitúdómodulációtól eltérő, más modulációs formák választása, például a fázis- vagy frekvenciamoduláció

A szálban fellépő nemlineáris hatások két mechanizmus folytán jönnek létre. Egy részük arra vezethető vissza, hogy az üveg törésmutatója a benne haladó fény intenzitásának nemlineáris függvénye. Ezeket hívjuk Kerr-nemlinearitásoknak [1].

\mathbf{P} , azaz a szálban terjedő fény polarizációvektora a következő:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots)$$

ahol \mathbf{E} a szálban terjedő fény térerősségvektora; ϵ_0 a vákuum dielektromos állandója; $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$, ... az anyag első-, másod-, és harmadrendű szuszceptibilitásai, melyek rendre két-, három illetve négyindexes tenzorok. Az első, lineáris tag írja le a közeg lineáris optikai tulajdonságait, mint például a csillapítást. A második tag nulla a SiO_2 -molekula szimmetriatulajdonságai miatt. Emiatt a legalacsonyabb rendű nemlineáris hatások a $\chi^{(3)}$ tenzor miatt jelennek meg. Az ennél magasabb rendű hatásokat elhanyagoljuk.

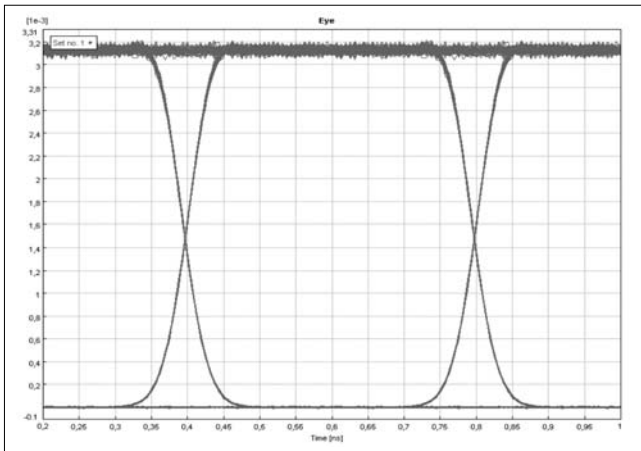
A nemlineáris hatások másik csoportja az inelasztikus szórás jelenségek, amikor a fény fotonjai kölcsönhatásba lépnek az optikai szál anyagának fonongerjesztéseivel és ezáltal egy energiaátadás jön létre.

A nemlineáris hatások, illetve az erősítők spontán emissziója által generált zajok teljesítménysűrűség spektrumát egyaránt Gauss-eloszlásúnak feltételezhetjük. Ebben az esetben ezeket a összeadhatjuk, így megkapjuk a rendszerben fellépő zaj eredő értékét, amivel már jól számolható a kimeneten kapott jelminőség.

2. A Q-faktor

Az átvitel minőségének jellemzésére a bithibaarányt (BER) használják, azonban ennek pontos mérése a gy-

korlatban igen nehezen megvalósítható, ezért helyette általában a vele kölcsönösen egyértelmű kapcsolatban álló Q-faktort alkalmazzuk. A Q-faktor a vett jel szemábrájának (1. ábra) nyitottságát jellemzi.



1. ábra Szemábra

A szemábrát statisztikusan kiértékelve meghatározhatjuk az egyes, illetve nullás jelszint várható értékét és szórását, melyek ismeretében a Q-faktort a következőképpen definiáljuk:

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

ahol μ_0 és μ_1 a 0-s és a 1-es jelszint várható értéke, σ_0 és σ_1 pedig ezek szórásai. A modellalkotás során a nemlinearitások által okozott zavarokat olyan zajként vettük figyelembe, amely csak 1-es jelszint esetén lép fel. A Q-faktor számítása ebben az esetben:

$$Q = \mu_{SRS} \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_{0 ASE} + \sqrt{\sigma_{1 ASE}^2 + (\sigma_{XPM}^2 + \sigma_{FWM}^2 + \sigma_{SRS}^2)}},$$

ahol $\sigma_{0 ASE}$ és $\sigma_{1 ASE}$ az erősítők spontán emissziója által a 0-s és az 1-es jelszintben okozott zaj szórása; σ_{XPM} , σ_{FWM} , illetve σ_{SRS} a keresztfázis-moduláció, a négyhullám-keverés, illetve a stimulált Raman-szórás miatti szórás az 1-es jelszintben; μ_{SRS} pedig a stimulált Raman-szórás miatt kialakuló jelszint eredeti jelszintre normált értéke. A fizikai hatások leírását, illetve ezen mennyiségek számítását a 3. és 4. fejezetek tartalmazzák.

Az elfogadható bithibaarányt 10^{-14} -nek definiáltuk, ami $\sim 7,5$ -es Q-faktornak felel meg.

3. Az erősítők spontán emissziója (ASE)

Az optikai erősítők nemcsak az átvinni kívánt jelet erősítik, hanem zajt is visznek a rendszerbe, emellett a bemenetükre érkező zajt is tovább erősítik. Kis becsatolt teljesítmények esetén ezek a legfőbb zajforrások a szálban. Ez a zaj mind a 0-s, mind az 1-es jelszinten fellép. Számítását a következőképpen végezhetjük el [2]:

$$\begin{aligned} \sigma_{0 ASE}^2 &= \sigma_{sp-sp}^2, \\ \sigma_{1 ASE}^2 &= \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{sig-sp}^2, \end{aligned}$$

ahol σ_{sp-sp} a spontán emisszióból származó komponens, míg a σ_{sig-sp} a jel és a spontán emisszió kölcsönhatásából származó komponens.

$$\sigma_{sp-sp}^2 = R^2 \left(\frac{P_{ASE}}{B_o} \right)^2 \left(B_o - \frac{B_e}{2} \right) 2B_e,$$

$$\sigma_{sig-sp}^2 = 2R^2 P P_{ASE} 2 \frac{B_e}{B_o},$$

ahol R a vevő érzékenysége, B_o a rendszer optikai sáv szélessége, B_e a rendszer elektromos sáv szélessége, P a vevőoldali jelteljesítmény. P_{ASE} az erősítők spontán emissziója miatti zaj teljesítménye a vevő bemenetén [3]:

$$P_{ASE} = 2n_{sp} (G - 1) h \nu B_o,$$

ahol n_{sp} az erősítő spontán emissziós tényezője, G az erősítő erősítése és h a Planck-állandó, ν az optikai jel frekvenciája.

4. Nemlineáris hatások

Nemlineáris hatások okozta jelalak torzulások, ahogy a bevezetőben már említettük, függenek az optikai szálba csatolt teljesítménytől. Kompenzálásuk nem lehetséges, ezért az egyedüli lehetőség a jelszint korlátozása annak érdekében, hogy elkerüljük az általuk okozott torzításokat.

4.1. Önfázis-moduláció

Az optikai szál törésmutatója függ a szálba csatolt fény intenzitásától, így a jelszintváltozások esetén (nulla-egy, egy-nulla átmenetekenél) a törésmutató változik. A változás a jel fázisát megváltoztatja, ezáltal frekvenciaeltolódás jön létre, amely, hasonlóan a kromatikus diszperzióhoz, a jel spektrális szétkenődéséhez vezet. Ez a hatás diszperziókompenzáló elemekkel ellensúlyozható, ezért az alkalmazott modellben eltekintünk az önfázis-modulációtól.

4.2 Kereszfázis-moduláció

A keresztfázis-moduláció jelensége az önfázis-modulációhoz hasonló okok miatt lép fel. Az egyik csatorna által kiváltott törésmutató-változás az összes többi csatornára is hatással van. Ily módon egy adott csatornán haladó jelet az összes többi csatorna zavarja.

Ezt a zavarást zajként modellezhetjük, melynek szórásnégyzete az alábbi [4]:

$$\sigma_{XPM i}^2 = 4 P P_{XPM i} \frac{B_e}{B_o},$$

ahol $\sigma_{XPM i}^2$ az i -edik csatorna 1-es jelszintjében a keresztfázis-moduláció által okozott teljesítményingadozás szórásnégyzete, P az optikai szálba csatolt teljesítmény egy csatornára jutó értéke, B_e a vevő elektromos sáv szélessége, B_o a rendszer optikai sáv szélessége, $P_{XPM i}$ pedig a keresztfázis-moduláció által az i -edik csatorna 1-es jelszintjében okozott zaj teljesítménye, azaz:

$$P_{XPM\ i} = \sum_{j \neq i} P_{XPM\ ij}$$

ahol $P_{XPM\ ij}$ az i -edik csatornában a j -edik csatorna által okozott zaj teljesítménye:

$$P_{XPM\ ij} = \int_{-\pi B_o}^{\pi B_o} 4\gamma P e^{-\alpha L} P(\omega) e^{-j\omega L/v_{g1}} \frac{1}{a^2 + b^2} [a \sin(bL) - b \cos(bL) + b e^{-\alpha L}]$$

ahol γ a nemlineáris terjedési együttható, $P(\omega)$ az optikai jel spektrális sűrűségfüggvénye, L a szál hossza.

$$P(\omega) = \left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{1}{T_b} \left(T_b \frac{\sin(\omega T_b / 2)}{\omega T_b / 2}\right)^2$$

ahol T_b a bitidő.

$$b = \omega^2 D_i \lambda_i^2 / (4\pi c),$$

ahol D_i az i . csatorna diszperziós együtthatója és λ_i az i . csatorna hullámhossza.

$$a = \alpha - j\omega d_{ij},$$

ahol α a rendszer csillapítása, d_{ij} a szakirodalomban Walkoff-paraméterként definiált mennyiség:

$$d_{ij} \approx D_i (\lambda_i - \lambda_j).$$

4.3. Négyhullám-keverés

A négyhullám-keverés akkor lép fel, ha két vagy több WDM csatornán továbbítunk jelet. A négyhullám-keverés fellépésekor úgynevezett parazitajelek jönnek létre jól meghatározott frekvenciákon (2. ábra). Egyenes csatornakiosztású WDM hálózatokban e parazitajelek nagy hányada az általunk is használt hullámhossz sávokba esik, ezáltal azokon szűrhetetlen zajt képeznek.

A négyhullám-keverés által okozott zaj teljesítményét ($P_{FWM\ i}(L)$) és szórásnégyzetét (σ_{FWM}^2) a következőképpen számíthatjuk [5,6]:

$$\sigma_{FWM}^2 = 4PP_{FWM} \frac{B_e}{B_o} P_{FWM\ i}(L) = \sum_{\substack{j+k-l=i \\ j,k \neq l}} P_{jkl}(L),$$

ahol j, k, l a zajt okozó csatornák sorszámait, i az előbbi három által zavart csatorna sorszámait, L a szál hossza, P az optikai szál bemenetére csatolt teljesítmény egy csatornára jutó értéke,

$$P_{jkl}(L) = (d_{jkl} \xi_{pol} \gamma_i)^2 \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2 + 4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta_{jkl} L / 2)}{\alpha^2 + \Delta\beta_{jkl}^2} P^3 e^{-\alpha L}$$

$$\text{ahol } d_{jkl} = \begin{cases} 1 & j = k \\ 2 & j \neq k \end{cases}$$

ξ_{pol} a polarizációs együttható, jelen esetben (párhuzamos polarizációt feltételezve) 1, γ_i a nemlineáris terjedési együttható, α a csillapítás,

$$\Delta\beta_{jkl} =$$

$$\frac{2\pi\lambda_i^2}{c} |j-l||k-l| \Delta f^2 \left[D(\lambda_i) + \frac{\lambda_i^2}{2c} (j-l + |k-l|) \Delta f \frac{dD(\lambda_i)}{d\lambda} \right]$$

ahol c a fénysebesség vákuumban, Δf a szomszédos csatornák közötti frekvenciakülönbség, D a diszperziós együttható.

4.4. Stimulált Raman-szórás

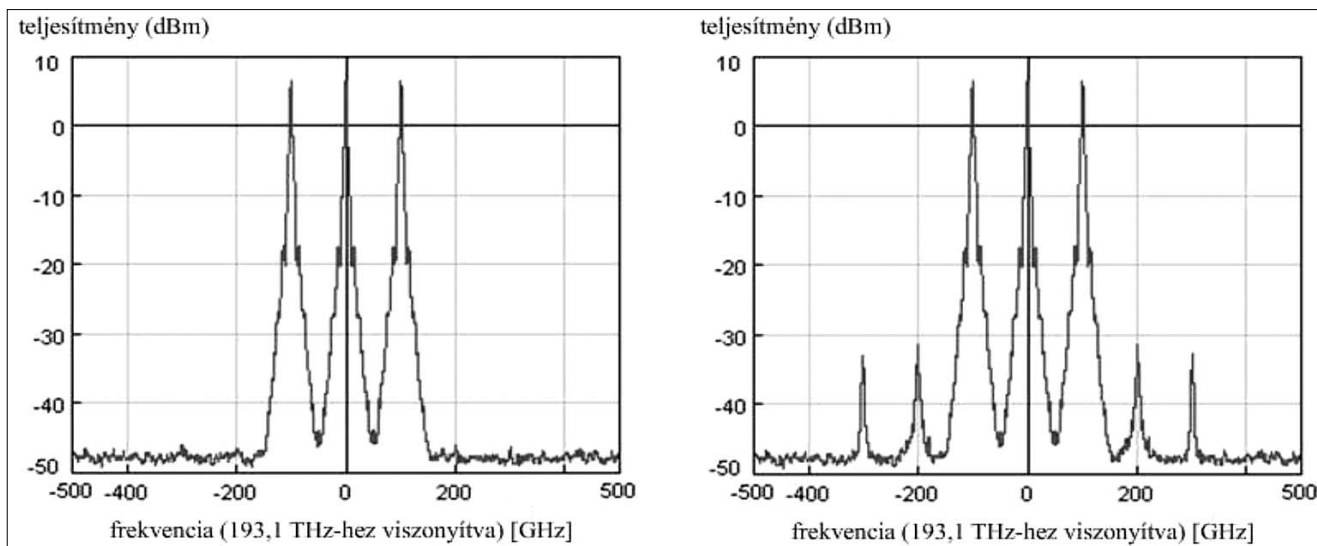
A stimulált Raman-szórás olyan nemlineáris hatás, melynek során a kisebb hullámhosszú csatornák felől sztochasztikus jelleggel energia adódik át a nagyobb hullámhosszú csatornáknak (3. ábra), melynek következtében a csatornák jelszintjei megváltoznak, illetve zajossá válnak. Ez a legkisebb hullámhosszú csatorna jelminőségét rontja a legnagyobb mértékben, mivel annak jelszintje csökken a legjelentősebben. A stimulált Raman-szórás miatti jelszint változást és szórást a következő formulákkal számíthatjuk [7]:

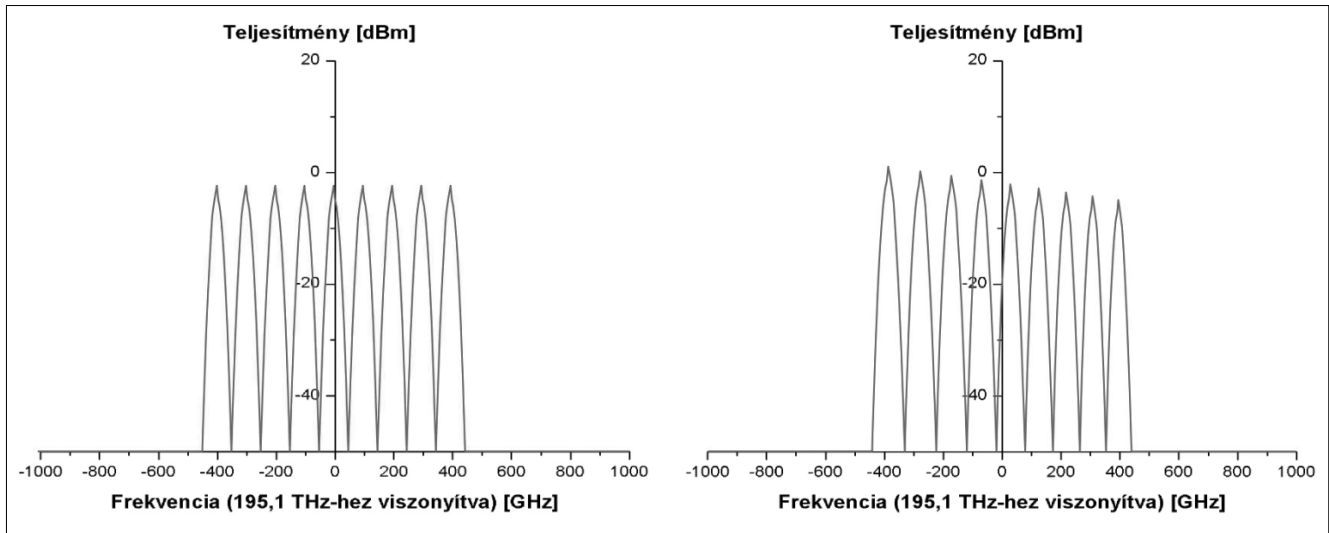
$$\mu_{SRS} = e^{\mu_x + \frac{\sigma_x^2}{2}},$$

$$\sigma_{SRS} = \mu_x^2 (e^{\sigma_x^2} - 1)$$

ahol μ_{SRS} a stimulált Raman-szórás miatt kialakuló jelszint eredetire normált értéke, σ_{SRS} a stimulált Raman-szórás által a csatorna jelében okozott zaj nagysága.

2. ábra A jel spektrumában a négyhullám-keverés miatt fellépő zavarok





3. ábra A jel spektrumának változása a stimulált Raman-szórás hatására

$$\sigma_x^2 = \sum_{j \neq i} \sigma_{xji}^2,$$

$$\mu_x = \sum_{j \neq i} \mu_{xji},$$

$$\sigma_{xji}^2 \approx \frac{1}{8\pi T_b} \int_{-\infty}^{\infty} |Q_{ji}(\omega)|^2 d\omega,$$

$$\mu_{xji} = \frac{Q_{ji}(0)}{2T_b},$$

ahol i és j a kölcsönható csatornák sorszámát jelöli, T_b a bitidő, $Q(\omega)$ a stimulált Raman-szórás miatt kialakuló jelszintváltozás Fourier-transzformáltja, amely NRZ kódolás alkalmazása esetén:

$$Q_{ji}(\omega) = K'(j-i)P_j(\omega) \sqrt{\frac{(1 - e^{-\alpha_j L})^2 + 4e^{-\alpha_j L} \sin^2\left(\omega d_{ji} \frac{L}{2}\right)}{\alpha_j^2 + (\omega d_{ji})^2}}$$

ahol $P_j(\omega)$ a j -edik csatorna jelének teljesítménysűrűség spektruma, és

$$K' = \frac{g_R' \Delta f}{2A_{eff}},$$

ahol g_R' a Raman-erősítés hullámhossz szerinti deriváltja, A_{eff} a szál effektív keresztmetszete. A többi paraméter megegyezik a korábbi pontokban definiáltakkal.

4.5. Stimulált Brillouin-szórás

A stimulált Brillouin-szórás a stimulált Raman-szórás-hoz hasonló, energiaátadással járó jelenség, azonban ez a továbbítandó jellel ellenétes irányba, az adó irányába hat. Hatása szintén kedvezőtlen, mivel az adólézerek jelét instabillá teszi, azonban megfelelő izolátorok alkalmazásával kompenzálható, ezért hatásával a modellben nem számoltunk.

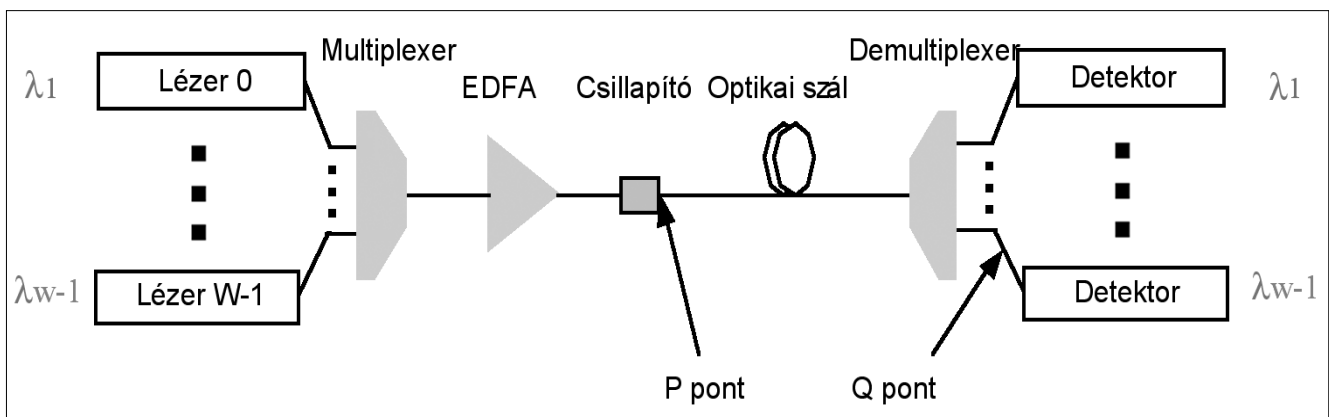
5. Eredmények

A vizsgálatokat a 4. ábra szerinti modellre végeztük el. Az alkalmazott optikai szál paraméterei az ITU-T G.652 ajánlásában előírtaknak feleltek meg.

Célunk az volt, hogy a lehető legnagyobb szálba csatolt teljesítményt (P-referenciapont) érjük el amellet, hogy a vevő oldalán, a szál kimenetén (Q-referenciapont) még elfogadható jelminőséget kapjunk. A különböző csatornák jelminősége is gyakran különböző, így ezért mindig a legrosszabb minőségű csatornát vettük alapul.

Az alkalmazott paraméterek felsorolását a következő oldalon, az 1. táblázatban olvashatják.

4. ábra Az alkalmazott modell



B_o	12,5 GHz	optikai sáv szélesség
B_e	7 GHz	elektromos sáv szélesség
T_b	100 ps	bitidő
S	0,085 ps / (nm ² km)	a diszperziós együttható meredeksége
D	17 ps / (nm km)	diszperziós együttható
λ_0	1550 nm	a legnagyobb használt hullámhossz
c	300.000 km/s	fénysebesség
L	80 km	a szál hossza
α	0,21 dB/km	csillapítási együttható
γ	1,18E-3 1/(Wm)	nemlineáris terjedési együttható
NF	4,5 dB	az erősítő zajtényezője
R	1	a vevő érzékenysége, responszivitása
g_R	7,482 · 10 ⁻²⁷ m / (WHz)	Raman-erősítés meredeksége
A_{eff}	80 μm ²	hatásos szálkeresztmetszet

1. táblázat A felhasznált paraméterek

5.1. A Q-faktor változása a becsatolt teljesítmény függvényében

A különböző fizikai hatások által létrehozott Q-faktor értékeket meghatározhatjuk a teljes becsatolt teljesítmény függvényében. Ezáltal következtethetünk arra, hogy különböző hálózatparaméterek esetén melyik hatás és milyen módon fogja az összeköttetést a legjobban korlátozni.

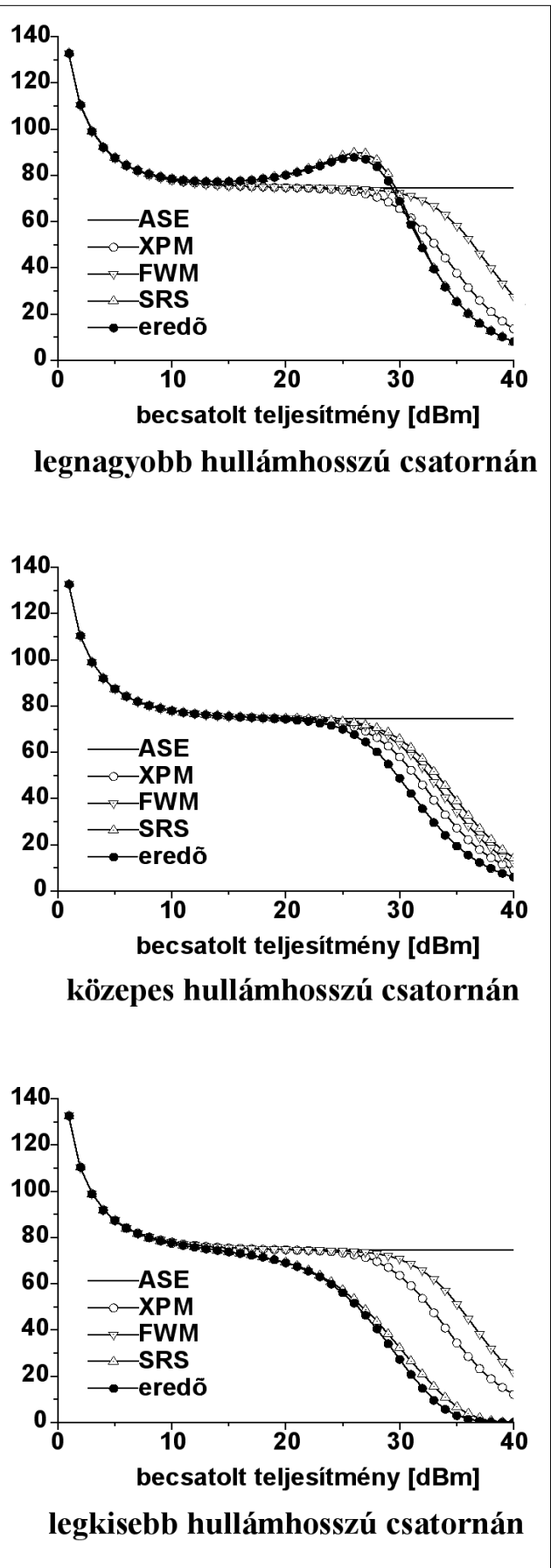
A következő pontok a modellel kapott eredményeket mutatják be egy 24 és egy 64 csatornás DWDM rendszerre 100, illetve 50 GHz-es csatornatávolság alkalmazása esetén.

5.1.1. 64 csatornás DWDM rendszer 100 GHz-es csatornatávolság alkalmazásával

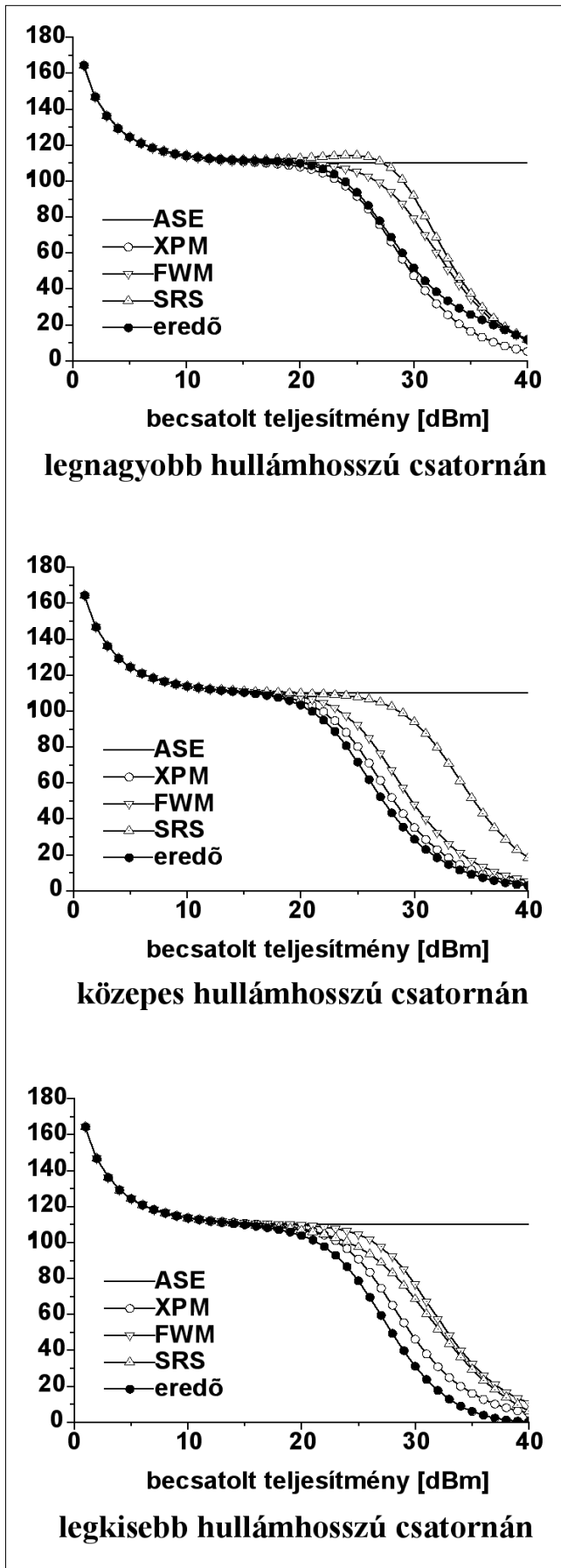
Az 5. ábra mutatja a Q-faktor nagyságát, lebontva az egyes fizikai hatásokra, 64 csatornás rendszerekben 100 GHz-es csatornatávolságot alkalmazva. Az erősítők spontán emissziója a gyakorlatban alkalmazott teljesítményértékeknél közel konstans értéket vesz fel. A nemlineáris hatások esetén az ettől való eltérést vizsgáltuk, azaz a többi görbe az erősítők spontán emissziója és az adott nemlineáris hatás által együttesen létrehozott Q-faktor értékét mutatja.

Az ábráról jól látható, hogy létezik egy teljesítménytartomány, ahol a Q-faktor javulni kezd a stimulált Raman-szórás hatására. Ez a kisebb hullámhosszú csatornák pumpáló hatásának tudható be, ami által a jelszint nő. Nagyobb teljesítményértékek alkalmazása esetén a jel minősége ismét romlani kezd, amely annak köszönhető, hogy a jelhez ekkor már jelentős zaj is hozzáadódik.

A legnagyobb hullámhosszúságú csatornán tapasztalható jelszint növekedéssel párhuzamosan azonban a legkisebb hullámhosszúságú csatorna jelszintje nagyban csökken, emiatt ebben az esetben a legrosszabb minőségű csatorna a legkisebb hullámhosszúak közül kerül ki. Emellett a keresztfázis-moduláció is nagy szerepet játszik a jelminőség romlásában. A középső csatornákon kissé nagyobb mértékben lép fel, ami annak köszönhető, hogy elsősorban az egymáshoz közeli csa-



5. ábra A Q-faktor 64 csatornás rendszerben 100 GHz-es csatornatávolság esetén



6. ábra
A Q-faktor 24 csatornás rendszerben 100 GHz-es csatornatávolság esetén

tornák között alakul ki és a szélső csatornák kevesebb szomszédal rendelkeznek.

A négyhullám-keverés kevésbé fontos szerepet játszik, mint az előző két effektus. Itt is megfigyelhető, hogy a keresztfázis-modulációhoz hasonlóan a középső csatornákon kissé nagyobb mértékben lép fel. Ebben az esetben ez nem a szomszédok számával van összefüggésben, hanem azzal, hogy több parazitajel esik erre a tartományra, mint a szélsőkre.

5.1.2. 24 csatornás DWDM rendszer 100 GHz-es csatornatávolság alkalmazásával

A 6. ábrán egy 24 csatornás rendszerre látható a Q-faktor nagysága az egyes fizikai hatásokra lebontva 100 GHz-es csatornatávolság mellett.

A kisebb csatornaszám alkalmazása miatt a stimulált Raman-szórás hatása ebben az esetben kisebb mértékben lép fel, mint az előzőben, bár ugyanazok a jelenségek figyelhetők meg, mint a 64 csatornás rendszernél.

A négyhullám-keverés és a keresztfázis-moduláció most is nagyobb mértékben lép fel a középső csatornákon, mint a szélsőkön. Ebben az esetben a keresztfázis-moduláció dominál, ennek köszönhető, hogy a legrosszabb jelminőség most a középső csatornákon alakul ki.

5.1.3. 64 csatornás DWDM rendszer 50 GHz-es csatornatávolság alkalmazásával

A 7. ábrán látható a Q-faktor nagysága az egyes fizikai hatásokra lebontva egy 64 csatornás rendszerben 50 GHz-es csatornatávolság alkalmazása esetén.

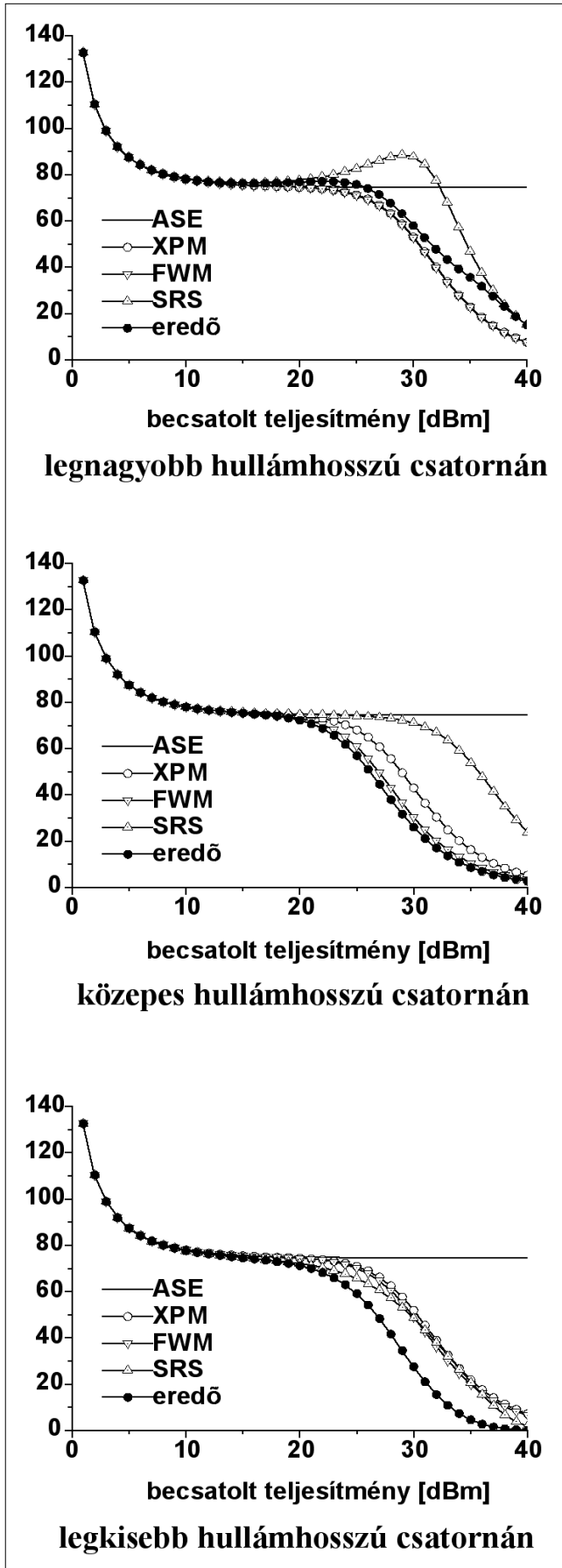
A csatornatávolság csökkenésével a stimulált Raman-szórás hatása csökken, azonban a legkisebb hullámhosszúságú csatornán így is jelentős jelminőség romlást okoz. A négyhullám-keverés és a keresztfázis-moduláció hasonló mértékben rontják a jelet. A középső csatornákon ismét nagyobb mértékben lépnek fel.

5.1.4. 24 csatornás DWDM rendszer 50 GHz-es csatornatávolság alkalmazásával

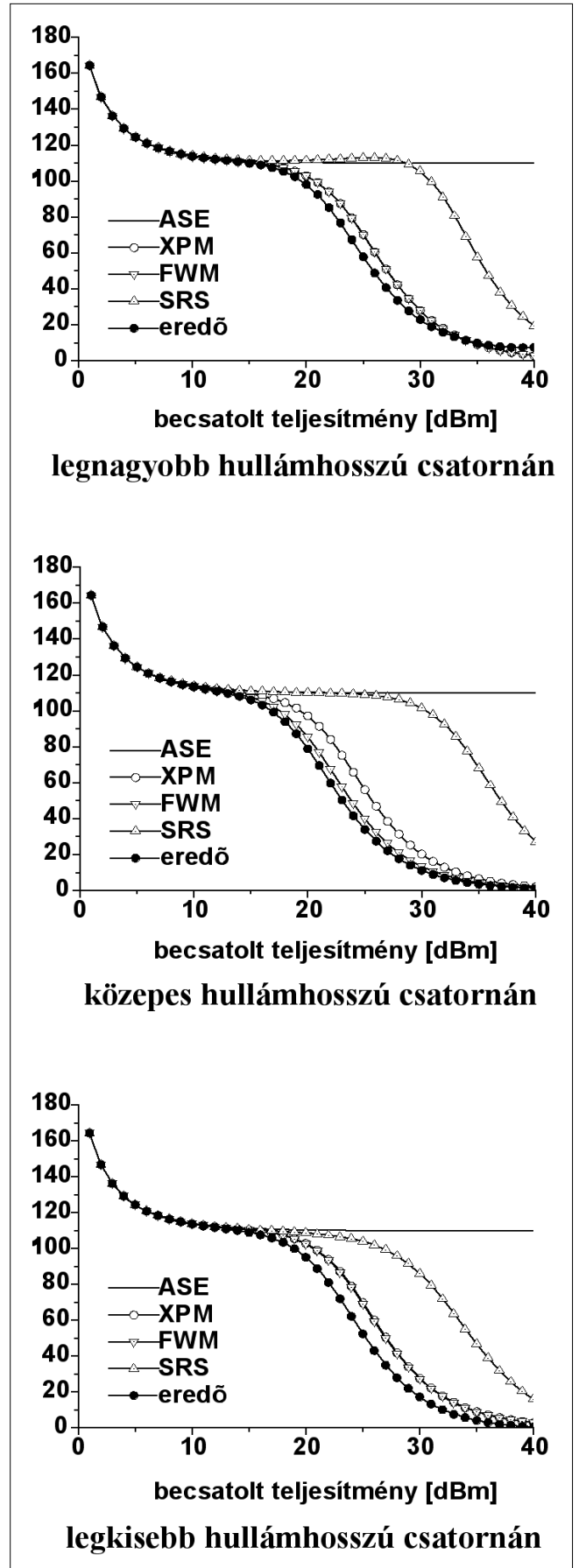
A 8. ábra 24 csatornás rendszerben mutatja a Q-faktor nagyságát 50 GHz-es csatornatávolság mellett.

Az 50 GHz csatornatávolság és kisebb csatornaszám alkalmazása esetén a stimulált Raman-szórás hatása már nagy mértékben csökken. Egyértelműen a keresztfázis-moduláció és a négyhullám-keverés dominál. Emiatt a legrosszabb minőségű csatorna itt a közepes hullámhosszúak közül kerül ki.

Összességében elmondható, hogy nagy csatornaszám és nagy csatornatávolság alkalmazása esetén a jel minőségét a stimulált Raman-szórás rontja a legnagyobb mértékben és a legrosszabb minőségű jel a legkisebb hullámhosszúságú csatornákon várható. Kis csatornaszám, illetve csatornatávolság alkalmazása esetén pedig a keresztfázis-moduláció és a négyhullám-ke-



7. ábra
A Q-faktor 64 csatornás rendszerben 50 GHz-es csatornatávolság esetén



8. ábra
A Q-faktor 24 csatornás rendszerben 50 GHz-es csatornatávolság esetén

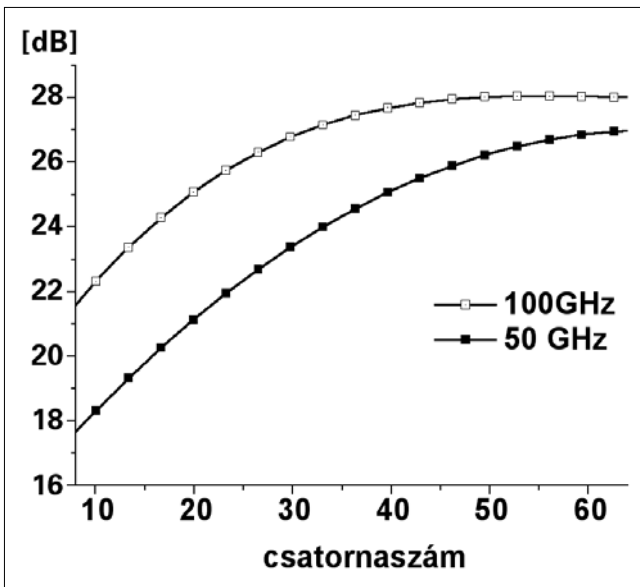
verés miatt a középső csatornák minősége a legrosszabb. Köztes esetben mindhárom jelenség hatása hasonló nagyságrendű, ezért a rendszer pontos ismerete nélkül nem állapíthatjuk meg, hogy hova esnek a legrosszabb minőségű csatornák.

Amit minden esetben valószínűsíthetünk az, hogy a legrosszabb minőségű csatorna minden a középső, illetve a legkisebb hullámhosszúságúak közül kerül ki, de hogy pontosan melyik, azt csak számítással tudjuk meghatározni.

5.2. A maximálisan becsatolható teljesítmény a csatornaszám függvényében

A vizsgálatokat úgy is elvégezhetjük, hogy adott csatornaszámok esetén meghatározzuk a még elfogadható jelminőséghez tartozó összes becsatolt teljesítményszintet. Az elfogadható jelminőséget az erősítők spontán emissziója által kijelölt Q-faktor szinthez viszonyított -3 dB-es letörésnél definiáltuk.

Így olyan görbét kapunk, amely a maximális becsatolható teljesítmény nagyságát adja meg az alkalmazott csatornaszám függvényében. A 9. ábra mutatja ezt a görbét 100 GHz-es, illetve 50 GHz-es csatornatávolság alkalmazása esetén.



9. ábra
A maximális becsatolható teljesítmény az alkalmazott csatornaszám függvényében 100 GHz-es, illetve 50 GHz-es csatornatávolságnál

Mindkét csatornatávolság esetén megfigyelhető, hogy a maximális becsatolható teljesítmény az alkalmazott csatornaszám növelésével egyre kisebb mértékben nő. 100 GHz-es csatornakiosztásnál 60 csatorna fölött kis mértékű csökkenést is tapasztalhatunk, ami az előző pontok eredményei alapján a stimulált Raman-szórással lehet magyarázni. Mindazonáltal a szokásosan használt 24-80 csatornaszámok esetén 100 GHz-es csatornatávolság alkalmazásával mindig nagyobb adóteljesítményszintet engedhetünk, mint 50 GHz-es csatornatávolság esetén.

6. Összegzés

A modellel kapott eredmények nagyon hasznosak a nemlineáris hatások alapos vizsgálatához, de emellett az iparban kamatoztatható gyakorlati hasznuk is jelentős. Ugyanezeket az adatokat meg lehet határozni bármely optikai rendszerre. Ennek segítségével egy új rendszer kiépítésekor, vagy egy már meglévő csatornaszámának változtatásakor egyszerűen meghatározható az ideális bemeneti teljesítmény. Így maximalizálhatjuk, az áthidalható távolságot, csökkenthetjük az erősítők számát, vagy kevésbé érzékeny vevőket alkalmazhatunk.

Megjegyzés

A cikkben bemutatott eredmények a 2007. évi Egyetemi és az Országos Tudományos Diákköri Konferencián (TDK, OTDK) első helyezést értek el.

Irodalom

- [1] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics Academic, Boston, 1989.
- [2] R. Ramaswami, K. Sivarajan, Optical Networks: A Practical Perspective, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1998.
- [3] Ashwin Gumaste, Tony Antony, DWDM Network Designs and Engineering Solutions, WDM Network Design-1, Cisco press, <http://www.enterprisenetworksandservers.com/cp/art.php?1587050749>
- [4] A. Cartaxo, „Impact of modulation frequency on cross-phase modulation effect in intensity modulation-direct detection WDM systems,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10., pp.1268–1270., September 1998.
- [5] A. R. Chraplyvy, „Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities,” J. Lightwave Technol., Vol. 8., pp.1548–1557., October 1990.
- [6] W. Zeiler, F. D. Pasquale, P. Bayvel, J. E. Midwinter, „Modeling of four-wave mixing and gain peaking in amplified WDM optical communication systems and networks,” J. Lightwave Technol., Vol. 14., pp.1933–1942., September 1996.
- [7] K.-P. Ho, „Statistical properties of stimulated Raman crosstalk in WDM systems,” J. Lightwave Technol., Vol. 18., pp.915–921., July 2000.
- [8] Mazroa Dániel, „Optimális jelszint meghatározása optikai szálakban” TDK dolgozat. BME Villamosmérnöki és Inform. Kar, Hálózattervezés és menedzsment szekció, 2006. november 17.