

Diszperzió hatásának és a harmonikusok viselkedésének vizsgálata optikai hálózatokban

GERHÁTNÉ UDVARY ESZTER, BERCELI TIBOR
BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
udvary@hvt.bme.hu, berceli@hvt.bme.hu,

HILT ATTILA
Nokia Siemens Networks Magyarország Kft, Network Planning and Optimization
attila.hilt@nsn.com

Lektorált

Kulcsszavak: intenzitásmoduláció, optikai szál, diszperzió, torzítás, félvezető optikai erősítő, mikrohullámú segédvívós átvitel

A jövő optikai hálózatainak építése során kritikus a diszperzió hatásának csökkentése. A szakirodalomban részletes leírást találhatunk a diszperzió alapmódusra gyakorolt hatásáról, ugyanakkor kevesen foglalkoznak a harmonikusok viselkedésének vizsgálatával. Cikkünk elméleti és kísérleti úton mutatja be az alap- és felharmonikusok változását az optikai átvitel során. A Félvezető Optikai Erősítő (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) chirp-jének, a kromatikus diszperzióknak és az optikai szál nemlineáris tulajdonságainak együttes hatását vizsgáltuk, amelyek segítségével megszüntethetők a rádiófrekvenciás jel optikai átvitelében bekövetkező minimumok. Ezzel a módszerrel egyenletesebbé tehető az átvitel és javíthatók az átvitt digitális jelek tulajdonságai (bithibaarány, szemábra). A telített SOA befolyásolja a felharmonikusok szintjét és viselkedését is.

1. Bevezetés

Egyre szélesebb körben alkalmaznak optikai kábeleket nagytávolságú és nagysebességű távközléshez és számítógép hálózatok építése során. Az üvegszál csillapítása a hagyományos rézvezetékekhez képest kicsi, olcsó és rendkívül nagy sáv szélességet biztosít. A tökéletes optikai szál kimenetén teljesen ugyanazt a jelformát kapnánk vissza, mint amit a bemeneten rákapcsolunk. A valóságban azonban az optikai kábel hosszától és egyéb paramétereitől függően a beadott jel torzul. Modern optikai szál esetében, a minimális csillapítást biztosító 1550 nm hullámhosszú optikai jel alkalmazásakor a maximális távolságot gyakran nem a csillapítás határozza meg, hanem a diszperzió.

Diszperzióknak nevezzük azt a jelenséget, amikor az optikai úton továbbított jel egyes komponensei eltérő sebességgel terjednek. Egymódusú szál alkalmazása esetén a fény közegbeli terjedési sebessége függ az optikai jel hullámhosszától. A közegben haladó fény nem egyetlen szigorúan meghatározott hullámhosszat tartalmaz, a különböző frekvenciájú komponensek pedig eltérő sebességgel terjednek, ezt hívjuk kromatikus diszperzióknak.

Az optikai átvitel során kritikus tényező az adatátviteli sebesség. Nagy adatsebesség eléréséhez az szükséges, hogy a biteket reprezentáló fényimpulzusok minél sűrűbben követhessék egymást. Ez csak akkor lehetséges, ha maguk az impulzusok rövidek. Diszperzió hatására az optikai impulzus a terjedés során kiszélesedik. Tehát a maximális sebességet az határozza meg, hogy milyen hosszú az a legrövidebb impulzus, amely a szálban történő terjedés után még nem szélesedik annyira ki, hogy átlapolódjon a következő impulzussal. A diszperzió hatása megfigyelhető a rádiófrekvenciás

(RF) jelek üvegszálon történő továbbításakor is. Adott optikai szálhossz és modulációs frekvencia esetén a diszperzió miatt a két oldalsáv ellentétes fázissal kerül a detektorra, ami a detektált elektromos jel szintjének csökkenéséhez vagy akár teljes kioltásához vezet.

Ismereteink szerint a probléma elméleti leírását elsőként az [1] könyvben közölték. A kísérleti igazolás eredménye elsőként a [2] cikkben került bemutatásra.

A diszperzió hatásának csökkentésére számos módszer található a szakirodalomban:

- speciális diszperziójú szálak alkalmazása felváltva, az egyes hosszakat úgy választva meg, hogy az ellentétes diszperziójú szálak ellensúlyozzák egymás hatását;
- a diszperzió várható mértékének ismeretében előtorzítják az impulzust;
- optikai egyoldalsávós (optical Single Side Band – SSB) modulációt alkalmaznak.
- chirped fiber gratings;
- elektroabszorpciós modulátor;
- optikai szál ön-fázismodulációja;
- kétmódusú lézer (dual mode laser);
- optikai spektrum tükrözése az összeköttetés közepén.

A diszperzió hatásának kézbe tartása különösen fontos hullámhossz-osztásos rendszerekben (Wavelength Division Multiplexed, WDM), ahol több optikai csatorna található.

Ebben a cikkben áttekintjük a diszperzió RF átvitelére gyakorolt hatását. Elméleti és kísérleti eredményekkel mutatjuk be az alap- és felharmonikusok viselkedését. Ismertetünk két diszperzió-kompenzációs módszert, végül megvizsgáljuk a diszperzió-kiegyenlítőként használt telített félvezető optikai erősítő (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) hatását a felharmonikusok szintjére is.

2. Kromatikus diszperzió

2.1. Mikrohullámú jelek optikai átvitele

Az optikai átvitel során használt intenzitásmoduláció (IM) az optikai spektrumban két oldalsávot hoz létre az optikai vivő körül (Double Side Band, DSB). Ahogy a jel terjed az optikai átviteli közegben, a kromatikus diszperzió miatt a két oldalsáv eltérő sebességgel halad, azaz fáziseltérés figyelhető meg a két oldalsáv között.

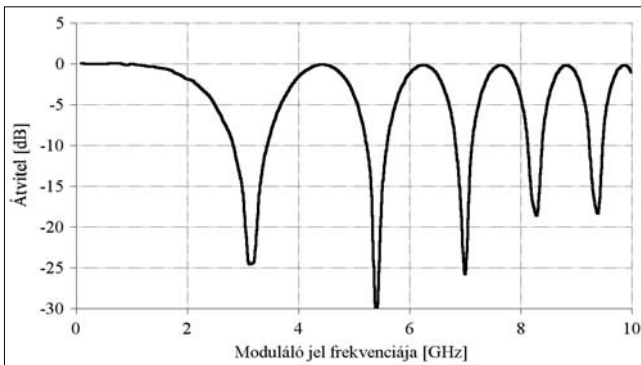
Az optikai összeköttetés frekvenciaátviteli függvénye, ha a lineáris veszteséget és az állandó késleltetést elhanyagoljuk:

$$H_{\text{link}}(f) = \cos\left(\frac{\lambda^2 \cdot D \cdot \pi \cdot f^2 \cdot L}{c}\right) \quad (1)$$

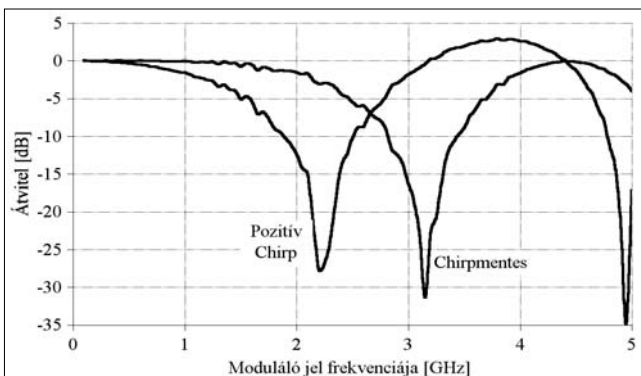
ahol D diszperziós együttható, L az optikai szál hossza, f a moduláló jel frekvenciája, c a fénysebesség vákuumban, λ a hullámhossz. Amint az (1) képletből látható, az átvitelben ismétlődő minimumok figyelhetők meg (1. ábra).

A chirp az optikai jel pillanatnyi frekvenciájának nemkívánatos változása. A modulációból származó nemkívánat fáziseltérésnek magyarul talán a „csipogás” a legtalálóbb megfelelője. A félvezető lézerek esetén jól ismert jelenség, hogy a töltéshordozó-sűrűség változása megváltoztatja az üreg adottságait, az aktív réteg törésmutatójának értékét, így módosítja a létrejövő módusok frekvenciáját. Közvetlen modulációt alkalmazva az optikai adó pozitív chirp-je [3] miatt a maximális szálhossz vagy a maximális rádiófrekvenciás sávzélesség kisebb (2. ábra).

1. ábra
Diszperzió hatása 400 km optikai szál esetén,
szimulációval nyert eredmény



2. ábra
Pozitív adó-chirp csökkenti a maximális sávzélességet,
szimulációval nyert eredmény



2.2. Alapsávi digitális jelek optikai átvitele

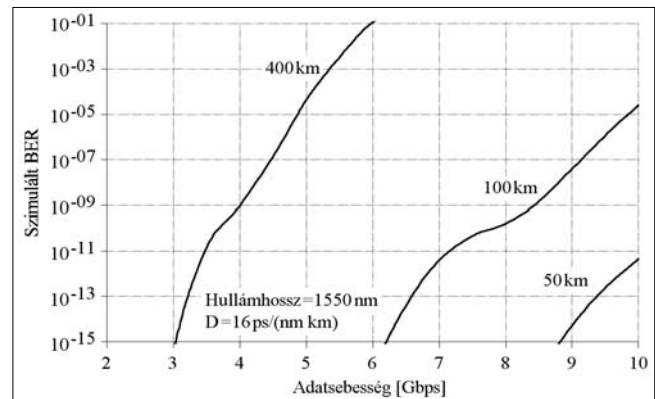
A diszperzió következtében fellépő átviteli minimumok jellemzésére az 1 dB-es (vagy 3 dB-es) csökkenést megadó sávzélességet szokták definiálni [4]:

$$B = \sqrt{\frac{c}{2 \cdot \lambda^2 \cdot D \cdot L}} \quad (2)$$

Ha a továbbítandó digitális jel sávzélessége kisebb, mint az így számolt sávzélesség, akkor az átvitelt csak az optikai jel-zaj viszony fogja korlátozni. Nagyobb adatsebességű átvitel esetén azonban a diszperzió hatását kompenzáló eszközre van szükség.

Diszperziólimitált rendszerben az alapsávi bithibaarány (Bit Error Rate, BER) romlik a szálhossz és az adatsebesség növelésekor. A gyakorlati rendszerekben a távolság, azaz az optikai szál hossza adott, tehát az alkalmazható modulációs sávzélességet meghatározza a kívánt BER értéke. A 3. ábra idealizált esetben mutatja a szimulált BER értékét az adatsebesség függvényében különböző szálhosszak esetén. Valódi rendszerekben természetesen nem csak a diszperzió hatása rontja az átvitel minőségét, hanem az optikai csillapítás, a nem ideális optikai detekció, az erősítő zaja is stb. A szemábrák és BER értékek a VPI Transmission Maker optikai szimulációs szoftver segítségével készültek [5].

3. ábra Bithibaarány az adatsebesség függvényében,
szimulációval nyert eredmény

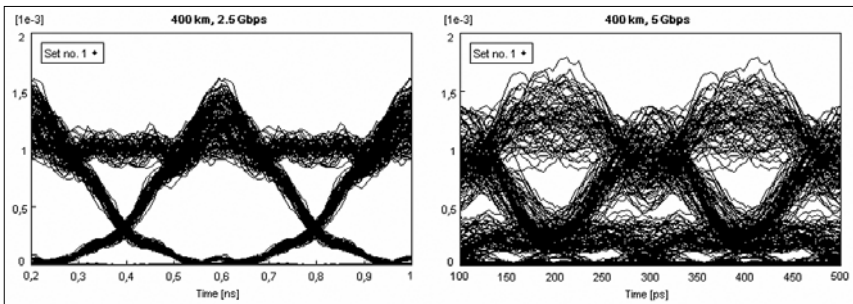


A 4. ábra az alapsávi szemábra romlását mutatja chirp mentes optikai adó esetén. 400 km optikai száznál az első levágási frekvencia 3,2 GHz-en lép fel. Tehát a bal oldalon látható 2,5 Gbit/s-os adatfolyam átvitelét még nem befolyásolja, a jobbra látható 5 Gbit/s-os adatfolyam átvitelét azonban már jelentősen rontja a diszperzió.

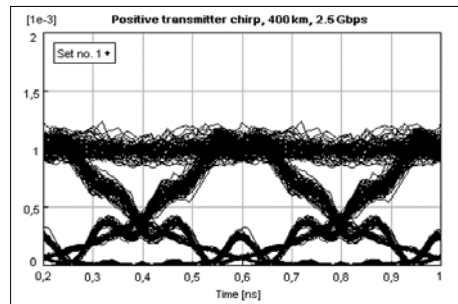
Az optikai adó chirp-jének hatása jól látható az 5. ábrán bemutatott szemábrán. A 2,5 Gbit/s-os alapsávi adatfolyam összes működési paramétere a 4. ábrán láthatóval megegyezik, de ebben az esetben az adó pozitív chirp-pel rendelkezik. A szemábra torzulása miatt a bithibaarány $BER = 10^{-25}$ -ről 10^{-11} -re romlik.

3. Az optikai szál nemlineáris hatásai

Optikai távközlő hálózatok vizsgálatánál az optikai szálak nemlineáris tulajdonságait el szoktuk hanyagolni. A lézerciódá által biztosított bemeneti optikai teljesítmény



4. ábra
2,5 ill. 5 Gbit/s-os szemábra az összeköttetés kimenetén, 400 km üvegszál és chirp-mentes adó esetén, szimulációval nyert eredmény



5. ábra
2,5 Gbit/s-os szemábra az összeköttetés kimenetén, 400 km üvegszál és pozitív chirp-pel rendelkező adó esetén, szimulációval nyert eredmény

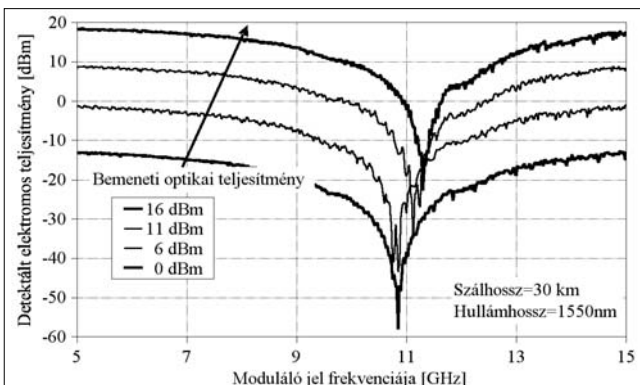
jelentős növelésekor azonban már a nemlineáris optikai jelenségeket is figyelembe kell vennünk. Az optikai teljesítményt növelve először az ön-fázismoduláció (Self-Phase Modulation, SPM) hatása jelentkezik. Ekkor a szálba belépő optikai jelen lévő intenzitásmoduláció következtében változik, illetve modulálódik a szálban a fény terjedési sebessége. Tehát a kilépő optikai jel nem csak intenzitás-, hanem fázismodulált is lesz. A jelenség úgy írható le, hogy az üvegszálnak módosítjuk az átviteli függvényét és a módosított átviteli függvényben figyelembe vesszük ezt a torzítási hatást is [6].

Az SPM hatására a rádiófrekvenciás átvitelben tapasztalható minimumok magasabb frekvenciákra tolnak (6. és 7. ábra). A mérési és szimulációs eredmények is azt támasztják alá, hogy az optikai szálban fellépő SPM alacsony optikai teljesítmények (<10 mW) esetén nem befolyásolja a diszperzió hatását.

4. Harmonikus viselkedés

Az intenzitásmodulációt és közvetlen detekciót (IM-DD) alkalmazó fénytávközlő rendszerek legegyszerűbb leírása teljesítményalapú. Itt elegendő az optikai adó teljesítményének, hatásfokának ismerete, az üvegszál fajlagos csillapításával és a vevő (fotodióda) érzékenységeivel számolni. A modell frekvenciafüggő, hiszen mind az optikai adó hatásfoka, mind pedig a fotodióda érzékenysége függ a moduláló mikrohullámú jel frekvenciájától. Jóllehet a legkorszerűbb eszközök sávszélessége

6. ábra
Mérési eredmény: L=30 km optikai szálhossz és négy különböző bemeneti optikai intenzitásérték esetén



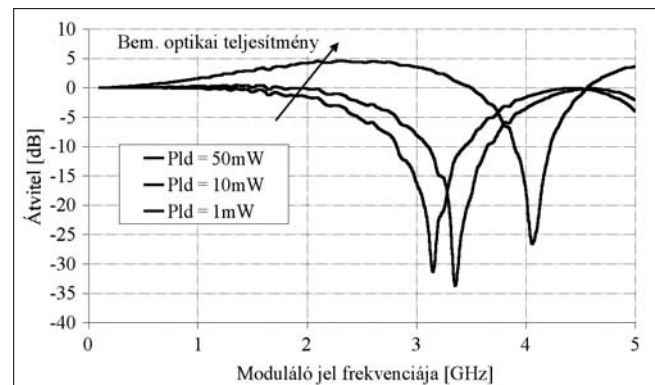
igen nagy (már 100 GHz fölötti) az átviteli sávszélesség értelemszerűen nem végtelen. A teljesítményelvű leírásban az üvegszál csak egy egyszerű csillapító, ami a mikrohullámú átvitel sávszélességét nem befolyásolja. A szakirodalom az IM-DD üvegszál rendszerek teljesítményelvű leírását igen bőven tárgyalja, diszperzió esetén ez a legegyszerűbb modell csak nagyon rövid összeköttetések, alacsony moduláló frekvenciák, illetve kis adatátviteli sebességek esetén alkalmazható.

4.1. Koherens modell

Koherens modell alkalmazásakor a jelenségek leírása nem az optikai jel a teljesítményének, hanem a jel térerősségének a vizsgálatán alapszik. Általános esetben a szál bemenetén megjelenő optikai $E_{opt}(\omega)$ mezőt számos spektrális vonallal kell leírni. Monomódusú lézert feltételezve, az optikai vivő körüli spektrális vonalak egymástól mért távolsága a moduláló mikrohullámú jel frekvenciájával egyezik meg.

Az optikai átvitel analízise során a bemeneti spektrumot általában három spektrális vonallal közelítik (optikai vivő, valamint alsó és felső oldalsáv), mert ez az egyszerűsítés jelentősen megkönnyíti a számítást. A vételi oldalra érkező optikai jel spektrális komponenseinek amplitúdóját és fázisát az optikai adó (LD vagy külső modulátor) és az optikai szál terjedési paraméterei határozzák meg. A koherens modell segítségével a mikrohullámú moduláló jel különböző harmonikusainak szintje is számolható [7].

7. ábra
Szimulációval nyert eredmény: L=400 km optikai szálhossz és három különböző bemeneti optikai intenzitásérték esetén



Szinuszos moduláció hatására a lézerdióda kimenetén megjelenő optikai jel elektromágneses hullám leírásai móddal a következő lesz:

$$E(t) = E_0 \sqrt{1 + m \cos(\omega_{RF} t)} e^{j[\omega_{opt} t + \beta \cos(\omega_{RF} t + \theta) + \phi(t)]} \quad (3)$$

ahol β a frekvencia modulációs (FM) index, $\Phi(t)$ a fáziszaj, θ pedig a fáziskésés az AM és FM között. Ez tipikusan 0 és $-\pi/2$ közötti. Általában ez a képlet a következőképpen egyszerűsíthető [8]:

$$E(t) = E_0 \sqrt{1 + m \cos(\omega_{RF} t)} e^{j[\omega_{opt} t + \beta \sin[\omega_{RF} t + \theta_a(\omega_{RF}, I_0)]]} \quad (4)$$

ahol θ_a a fáziskésés $\pi/2$ -höz képest, pontos értéke függ a frekvenciától és az optikai teljesítménytől.

Mach-Zehnder külső modulátor alkalmazása esetén az optikai jel:

$$E(t) = \frac{E_0}{2} (\cos(\omega_0 t + \gamma_1 \pi + \alpha_1 \pi \cos \omega_{RF1} t) + \cos(\omega_0 t + \gamma_2 \pi + \alpha_2 \pi \cos(\omega_{RF2} t + \theta_{RF}))) \quad (5)$$

θ_{RF} a modulátor két ágára jutó moduláló jel közti fáziskülönbség, γ_i és α_i a normalizált DC és RF feszültség. Fourier-transzformálással megkapjuk a frekvenciatartománybeli leírást. A kimeneti optikai mező az üvegszál végén:

$$E_{opt,out}(\omega_{opt}) = E_{opt,in}(\omega_{opt}) A(L) e^{-j\beta(\omega_{opt})L} \quad (6)$$

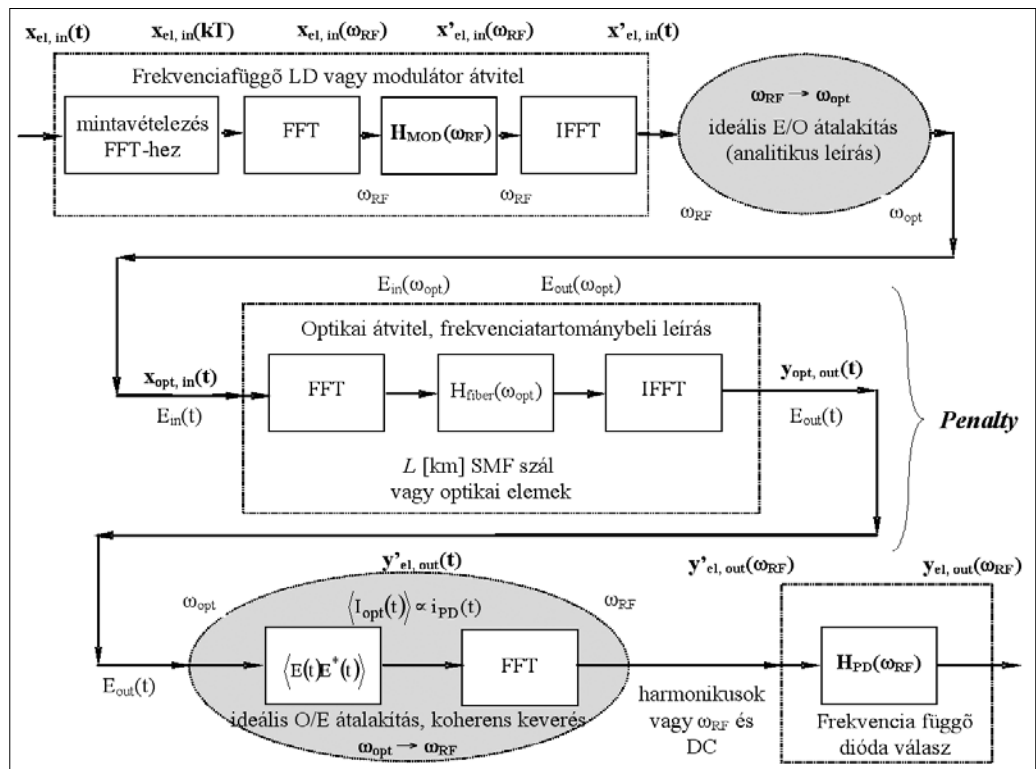
L az optikai szál hossza, $\beta(\omega)$ a terjedési tényező.

Inverz Fourier-transzformáció segítségével megkapjuk a kimeneti optikai mező időtartománybeli leírását. Az optikai elektromos átalakítást fotodetektor (PD) végzi. A működés elvéből következően az ideális fotodetektor árama arányos az optikai intenzitással [9]:

$$i_{PD}(t) = R_{PD} \langle E(t) E^*(t) \rangle \quad (7)$$

Az egyenletben a $\langle \rangle$ pár optikai perióduson keresztül végzett időbeli átlagolást jelöl. Erre azért van szükség, mert a fotodetektor nem tudja követni az optikai vivőfrekvencia gyors változását, csak az elektromos moduláció miatti burkoló változását detektálja. Az alkalmazott számítási modell folyamatábrája a 8. ábrán látható [10].

8. ábra
A számítások során használt koherens modell leírása



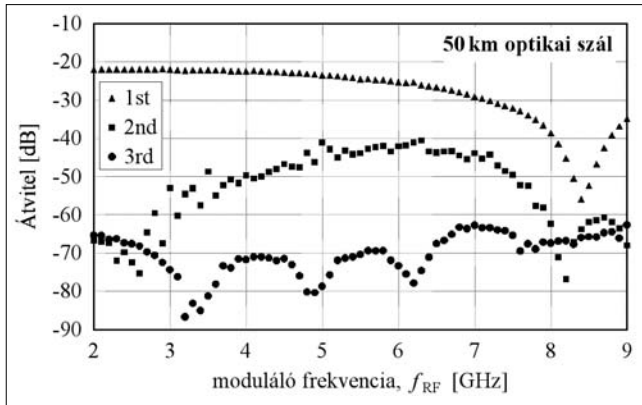
4.2. Elméleti és mérési eredmények

Az elméleti összefüggések igazolására laboratóriumi méréseket végeztünk. A gyakorlati munka során a kimeneti jel alap-, másod- és harmadrendű felharmonikusának teljesítményét vizsgáltuk. A szükséges optikai teljesítményű és hullámhosszú jelet egy hangolható lézerrész biztosította. Az intenzitásmodulált optikai jelet PD alakította vissza elektromos információvá. A mérési összeállítást számítógép vezérelte, így biztosítva a paraméterek pontos beállítását és a mért értékek feldolgozását, tárolását [11].

A mérések során különböző hosszúságú üvegszálakat vizsgáltuk. A következő oldali 9. és 10. ábrák 50 km hosszú összeköttetés esetén mutatják a számított és mért jelszinteket. A számítás során figyelembe vettük, hogy a mérésekben használt elektromos jelforrás nem ideális, azaz kimeneti jele kis mértékben felharmonikusokat is tartalmazott. Ennek megfelelően a bemeneti elektromos jelet három spektrális összetevővel írtuk le (az alap-, a második- és harmadik felharmonikkal). További vizsgálatok során figyelembe lehet venni az optikai forrás és a modulátor közti polarizációs állapot változást, a polarizációs diszperziót, illetve a mérés körülményeit (hőmérséklet, páratartalom stb.). Fontos hangsúlyozni, hogy a mikrohullámú jel IM-DD átvitele során – a diszperzió miatt – még akkor is keletkeznek felharmonikusok, ha a mikrohullámmal modulált optikai jelforrás ideális.

5. Diszperziókompenzáció SOA segítségével

SOA esetében a chirp hatására bekövetkező törésmutató-változás az erősítőben terjedő optikai jel sebességének változását okozza. Amennyiben az erősítőbe be-



9. ábra Alapmódus, második- és harmadik felharmonikus mért szintje a moduláló frekvencia függvényében, L=50 km, mért eredmény

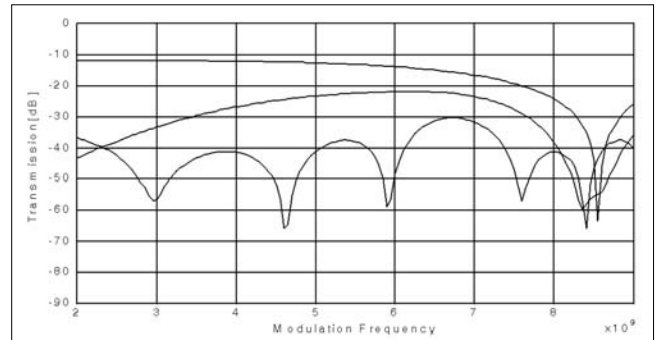
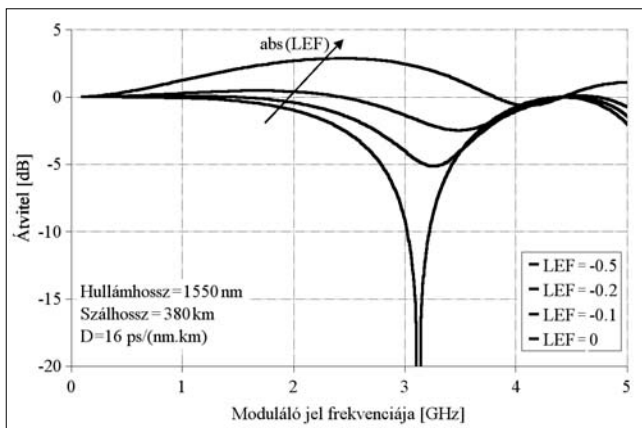
lépő optikai jel intenzitás- modulált, akkor a töltéshordozó-sűrűség változása miatt a törésmutató valós és képzetes része is változik, aminek következtében a kilépő jel fázisa is változni fog. Tehát a kilépő optikai jelen nem csak amplitúdó- (AM), hanem fázismoduláció (PM) is megjelenik.

A jelenség leírására a chirp paramétert (Linewidth Enhancement Factor, LEF; Henry faktor; α -faktor) használjuk, amely azt mutatja meg, hogy egy adott amplitúdó-moduláció mekkora fázismodulációt eredményez. Az eredeti definíció szerint ez nem más, mint a törésmutató valós és képzetes részének hányadosa. [12]

Az irodalomban található mérési eredmények azt mutatják, hogy a LEF értéke nem állandó, hanem az előfeszítő áram, a hullámhossz és a bemeneti optikai teljesítmény függvényében változik. A SOA hosszában végbemenő teljes fázisváltozás kiszámításához figyelembe kell venni a LEF hosszanti változását. Ehhez az eszközt számos rövid szakaszra kell osztani, amelyen belül a működési paraméterek már állandónak tekinthetők. A teljes amplitúdó és fázismoduláció értékét pedig az egyes szekciókban fellépő hatások összegzésével kapjuk.

Telítetlen esetben a LEF értéke GaAs és GalnAsP hagyományosan használt félvezető anyagoknál 2 és 7 között van. Mindez kvantumvölgyes struktúráknál 1,5 és

11. ábra Mikrohullámú optikai összeköttetés átvitelének számítása különböző SOA chirp paraméterek esetén



10. ábra Alapmódus, második- és harmadik felharmonikus számított szintje a moduláló frekvencia függvényében, L=50 km. (push-pull MZM, $\alpha=0.5$, $\alpha=0.4$, $Af2/Af1=0.07$, $Af3/Af1=0.05$, $D=17ps/km/nm$)

2 közötti értékű [13]. Ha a bemeneti optikai teljesítmény növekszik, akkor csökken az aktív rétegben található töltéshordozók száma. Telítéses esetben a tényleges LEF értéke a telítésmentes LEF (LEF_{unsat}) segítségével számítható:

$$LEF = LEF_{unsat} \cdot \frac{dG}{dP_{out}} = LEF_{unsat} \cdot \frac{dG/dP_{in}}{1 + (dP_{out}/dP_{in})} \quad (8)$$

ahol G az optikai erősítés, P_{in} és P_{out} pedig a be- és kimeneti átlagos optikai teljesítmény.

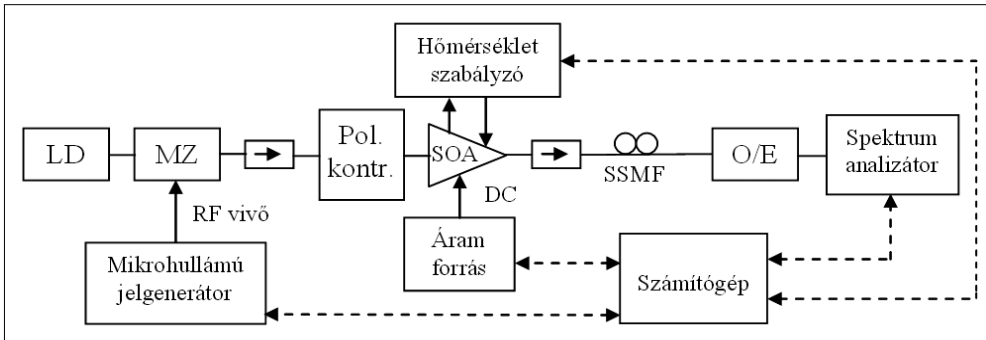
Fényforrások és telítetlen SOA esetén pozitív a LEF értéke, a telítési tartományban azonban negatív lesz [13]. Telített SOA esetén a negatív LEF ellensúlyozni tudja az optikai adó pozitív chirp-jének hatását. Ezzel a módszerrel növelni lehet az optikai összeköttetés hosszát, illetve az alkalmazható sáv szélességét. A negatív LEF befolyásolja a két oldalsáv szintjét is, ezzel aszimmetrikussá teszi az optikai spektrumot [14]. Az erősítő optikai erősítése az elektromos jel erősítését is biztosítja [15]. Ugyanakkor a SOA természetesen zajt is ad a rendszerhez.

SOA-t tartalmazó optikai átvitel esetén az átviteli függvény:

$$H_{SOA+link}(f) = \cos\left(\frac{\lambda^2 \cdot D \cdot \pi \cdot f^2 \cdot L}{c}\right) - LEF \cdot \sin\left(\frac{\lambda^2 \cdot D \cdot \pi \cdot f^2 \cdot L}{c}\right) + j \cdot LEF \cdot \frac{f_c}{f} \cdot \sin\left(\frac{\lambda^2 \cdot D \cdot \pi \cdot f^2 \cdot L}{c}\right) \quad (9)$$

A 11. ábra a megadott képlet alapján számított átviteli függvényt adja meg különböző SOA chirp értékek esetén 400 km optikai összeköttetésre. A számítások során 0 dBm bemeneti optikai teljesítményt vettünk figyelembe, hogy a szál nemlinearitása ne befolyásolja az átvitelt.

Az elméleti összefüggések igazolására laboratóriumi méréseket végeztünk különböző hosszúságú optikai szálakon (12. ábra). A hőfokstabilizált SOA működésének tesztelésére az eszközt különböző munkapontokban feszítettük elő. A rendelkezésre álló SOA pola-



reit is. Amennyiben a segédvivő frekvenciája egy átviteli minimum közelében van, akkor a szemábra becsukódik, az összeköttetés szétesik. Optimalizált SOA kompenzátor esetén a szemábra kinyílik és javul az átvitel bithibaaránya is (14. ábra).

12. ábra Egyszerűsített mérési elrendezés

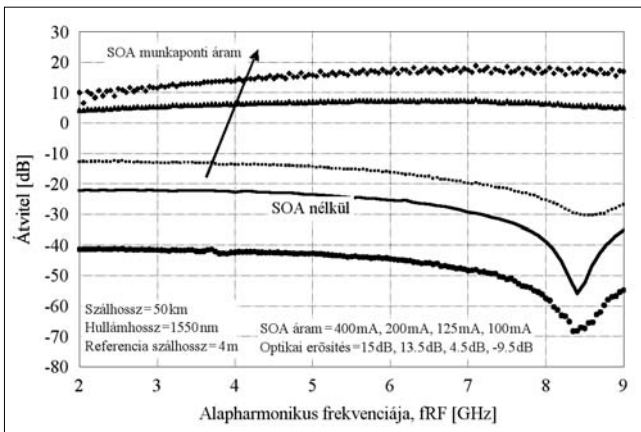
rizáció-függését a bemeneti optikai jel polarizációs állapotának optimalizálásával (egy polarizáció-szabályzó segítségével) szüntettük meg. Az optikai reflexiók hatását optikai izolátorokkal küszöböltük ki. A szükséges optikai teljesítményű és hullámhosszú jelet hangolható lézerrészegység biztosította. Az intenzitásmodulált optikai jelet fotodetektor alakította elektromos információvá.

A rendszer átvitelét különböző paraméterek esetén mértük (13. ábra). Ahogy növekszik az eszköz előfeszítő árama (ezáltal az optikai erősítés), az átviteli völgyek mélysége csökken és magasabb frekvenciák irányába tolódik.

Az optikai hálózatokban a rádiófrekvenciás vivőn digitális modulációs tartalom is található. A bemutatott technika javítja a továbbított digitális információ paraméte-

13. ábra

Mért rádiófrekvenciás átvitel (a back-to-back optikai átvitelre normalizálva), különböző SOA munkapontoknál



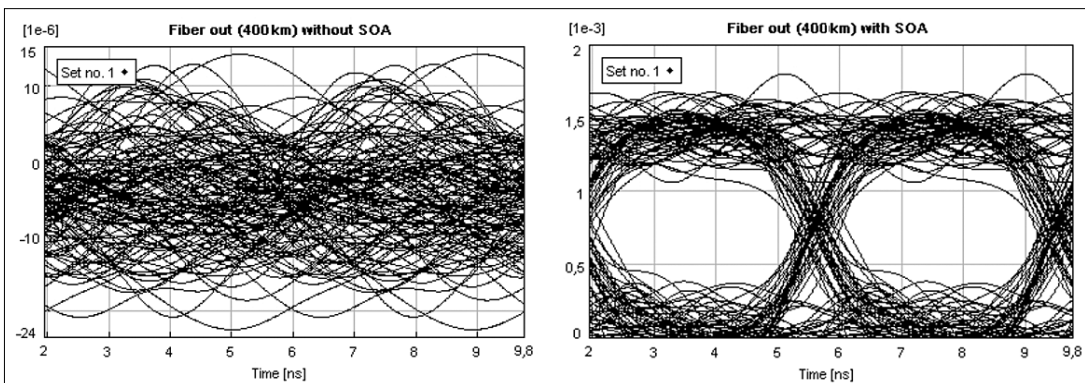
6. SOA hatása a harmonikusokra

A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a SOA alkalmazása befolyásolja a harmonikusok viselkedését is (15. ábra). A másodrendű felharmonikusok átvitelében megmaradnak a minimumpontok, de frekvenciában eltolódnak. Ugyanakkor a harmadrendű felharmonikus frekvenciamenete egyenletesebb lesz.

A 12. ábrán bemutatott mérési elrendezéssel lehetőség van a felharmonikusok vizsgálatára is. A 16. ábra a felharmonikusok szintjét mutatja különböző SOA munkapontok esetén. Ahogy az előfeszítő áram (tehát az optikai erősítés) növekszik, a másodrendű felharmonikus frekvenciamentének jellege nem változik, csak az optikai erősítés hatására nő a jelszint. Ugyanakkor a harmadrendű termék szintje is növekszik az optikai erősítés növekedésének megfelelően és a minimumhelyek is magasabb frekvenciákra tolódnak.

7. Összefoglalás

A diszperzió miatti minőségromlás a jövő teljesen optikai hálózatainak egyik fontos kérdése. Ebben a cikkben nagyfrekvenciás (mikro- és milliméterhullámú) jelek optikai átvitele esetén vizsgáltuk a harmonikusok diszperzió miatti torzulását. A bemutatott általános modell alkalmazásával számítható a diszperzió hatása az alapharmonikusra. A modell továbbfejlesztésével a felharmonikusok szintje is meghatározható. A másod- és harmadrendű felharmonikus szintjének változását elméleti és kísérleti úton vizsgáltuk. A harmonikusok szintjének frekvenciamentét bemutató mérések igazolták az elméleti eredményeket.



14. ábra Szimulált szemábra, 400 km optikai szál, segédvivő frekvenciája: 3,2 GHz, modulációs sávszélesség: 512 MHz, SOA kompenzátor nélkül és kompenzátorral

A bemutatott eredményekből jól látszik, hogy nem csak az alapharmonikusnak, hanem a másod- és harmadrendű felharmonikusnak is minimum és maximum-helyei vannak a frekvencia függvényében.

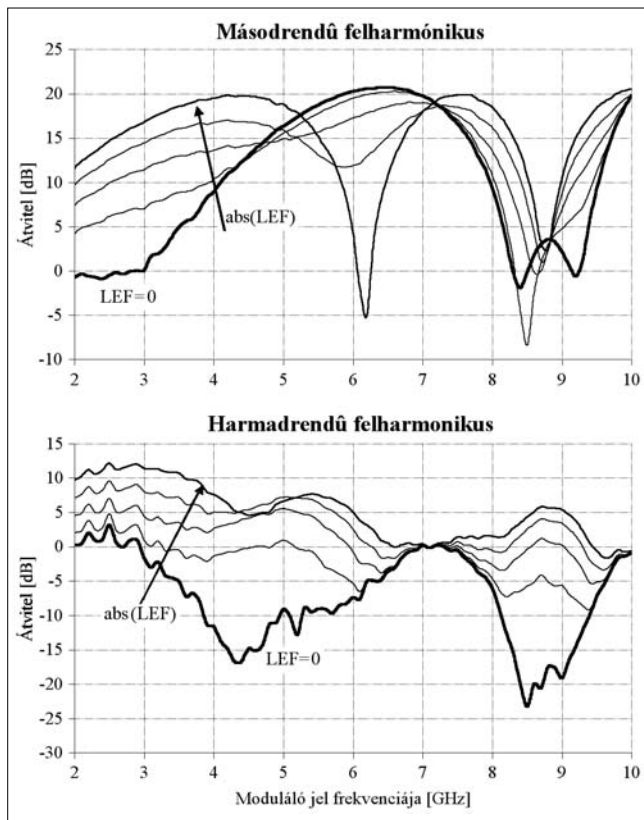
Javaslatot tettünk a bemutatott átviteli minimumok csökkentésére és az átvitel egyenletesebbé tételére. Megvizsgáltuk a diszperzió, a szál nemlinearitásának és a SOA negatív chirp-jének együttes hatását. Az elméleti és mérési eredmények azt mutatják, hogy a minimumpontok frekvenciája magasabb tartományba tolható, illetve SOA alkalmazásával az alapharmonikus átviteléből teljesen eltüntethetők. Végeredményképpen az optikai úton továbbított digitális információ tulajdonságai (szemábra, bithibaarány) javulnak.

A szerzőkről

Gerhátiné Udvary Eszter 1997-ben szerzett villamosmérnöki diplomát a BME Mikrohullámú Híradástechnika Tanszékén. 2000-tól egyetemi tanársegédként dolgozik. Kutatási eredményeit több, mint 40 publikációban (hazai és nemzetközi folyóiratokban, konferencia-kiadványokban) jelentette meg. 1999-ben elnyerte a NOKIA MICROCROLL'99 fiatal kutatói különdíját, 2002-ben Young Scientist Award keretében vett részt az URSI General Assembly konferencián elhangzott előadásáért. Tagja az Optical Society of America (OSA), az Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Microwave Theory and Techniques Society (MTT) és Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) szervezeteknek, illetve a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesületnek (HTE).

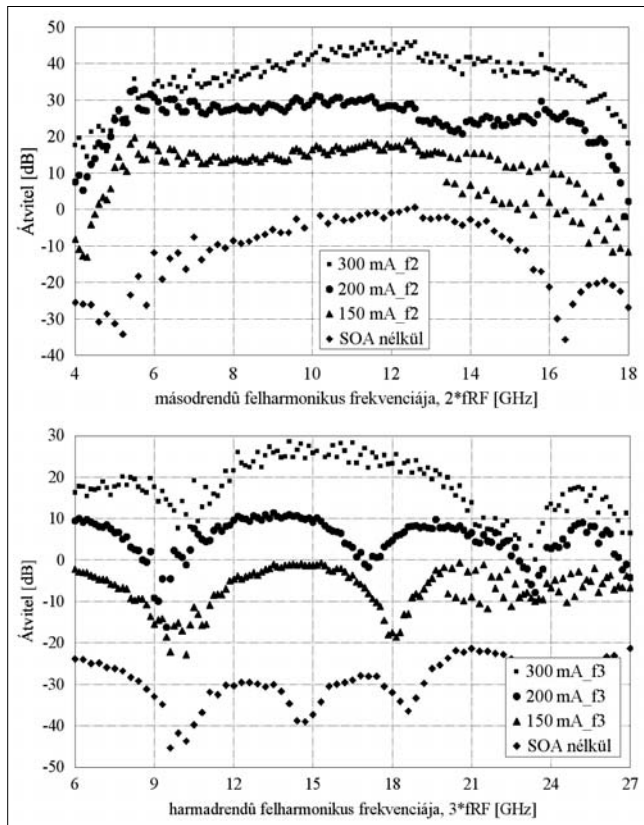
Berceli Tibor egyetemi tanulmányai elvégzése után aspiráns lett, majd a „Kisvesztésű hullámvezetők” című kandidátusi disszertációjának megvédése alapján 1955-ben megkapta a műszaki tudomány kandidátusa címet. Ettől az időponttól kezdve a Távközlési Kutató Intézetben dolgozott, először mint kutatási csoportvezető, majd osztályvezetői, később főosztályvezetői minőségben. 1965-ben megszerezte a műszaki tudomány doktora fokozatot. Kutatási területe 3 évtizeden át a mikrohullámú aktív áramkörök (keverők, oszcillátorok, erősítők stb.) volt. Eredményeivel hozzájárult a nagytávolságú, nagykapacitású mikrohullámú rádió-összeköttetések kifejlesztéséhez és gyártásához. Az utóbbi két évtizedben a mikrohullámú fotonika területén végez kutatásokat. 1962 óta oktat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen, először mint másodállású adjunktus, majd címzetes egyetemi tanárként, jelenleg pedig egyetemi magántanárként. Vendégprofesszor volt a Drexel Egyetemen Philadelphióban, a Hamburg-i, Osaka-i, Grenoble-i, Helsinki és Sydney-i Egyetemen. Tudományos eredményeit 146 nemzetközi publikációban, 6 könyvben és 26 szabadalomban tette közzé. Munkásságát kitüntetésekkel is elismerték, 1980-ban Állami Díjat kapott. 2000-től négy éven át Széchenyi professzori ösztöndíjban részesült.

Hilt Attila a BME-n végzett villamosmérnökneként 1990-ben. 1999-ig a Távközlési Kutató Intézetben mikrohullámú és optikai berendezések, rendszerek fejlesztésében vett részt. Számos távközlő berendezés hazai típusvizsgálatát, minősítését végezte el. Budapesten, valamint az Institut National Polytechnique de Grenoble Egyetemen folytatott doktori tanulmányokat. Oklevelét Franciaországban 1999-ben, PhD. fokozatát 2000-ben Magyarországon szerezte meg. 2000-től a Nokia Hungary Kft. hálózattervezője, 2007-ig hálózat-tervezési csoportvezető. Számos európai TETRA, GSM, EDGE és UMTS hálózat kiépítésében vett részt. 2007 óta a Nokia Siemens Networks hálózatok központ- és átviteltechnikai-tervezésének vezetője a régióban. A HTE és a Magyar Mérnöki Kamara tagja. Optikai és mikrohullámú rendszerek témakörében 71 cikk és több mint 100 rendszerterv, jegyzőkönyv és kutatási jelentés társszerzője.



15. ábra Szimulált eredmény, L=50 km optikai szálhossz, különböző SOA LEF esetén

16. ábra Mért eredmény, másod és harmadrendű felharmonikusok szintje, L=50 km optikai szálhossz, különböző SOA munkapontok esetén



Irodalom

- [1] W. van Etten, J. van der Plaats, "Fundamentals of Optical Fiber Communications", Prentice Hall Int., pp.62–68., 1991.
- [2] H. Schmuck, "Comparison of optical millimetre-wave system concepts with regard to chromatic dispersion", *Elect. Letters*, Vol. 31, No. 21, pp.1848–1849., October 1995.
- [3] F. Koyama, K. Iga, "Frequency Chirping in External Modulators", *IEEE JLT*
- [4] B. Wedding et al: "10-Gb/s optical transmission up to 253 km via standard single-mode fiber", *IEEE JLT*, Vol. 12, No. 10, pp.1720–1727., October 1994.
- [5] VPI Transmission maker/VPI component maker, user's manual, May 2007.
- [6] Z. Várallyay et al: "Soliton propagation of microwave modulated signal through single-mode optical fiber", *Acta Physica Hungarica B) QE*, Akadémiai Kiadó, Vol. 23, No. 3-4, pp.175–186., November 2005.
- [7] A. Hilt, E. Udvary, T. Bercei, "Harmonic distortion in dispersive fiber-optical transmission of microwave signals", *MWP'2003*, IEEE, Budapest, pp.151–154., September 2003.
- [8] A. Hilt, "Transmission et traitement optiques des signaux dans les systemes de télécommunications hertziens", (doktori értekezés), Grenoble, Franciaország, 1999.
- [9] A. Hilt et al: "General approach to chromatic dispersion analysis of microwave optical link architectures", *COMITE'99*, Pardubice, Csehország, pp.177–180., October 1999.
- [10] A. Hilt, T. Bercei, I. Frigyes, E. Udvary, T. Marozsák: "Fiber-dispersion compensation techniques in optical/wireless systems", *MIKON'2002*, Vol. 1, pp.25–36., Gdansk, Lengyel., May 2002.
- [11] HP VEE, Hewlett-Packard's visual engineering environment
- [12] L. Occhi et al: "Phase modeling based on the α factor in bulk semiconductor optical amplifiers", *IEEE JQE*, pp.788–797., 2003.
- [13] T. Watanabe et al: "Transmission performance of chirp-controlled signal by using semiconductor optical amplifier", *IEEE JLT*, pp.1069–1077., August 2000.
- [14] Sang-Yun Lee et al: "Reduction of chrom. dispersion effects and linearization of dual-drive MZ Modulator by using semiconductor optical amplifier in analog optical links" *ECOC'2002*, Koppenhága, Dánia, September 2002.
- [15] J. Marti et al: "Experimental reduction of dispersion-induced effects in microwave optical links SOA boosters", *IEEE PTL*, Vol. 13, No. 9, pp.999–1001., September 2001.

