

A polarizációs módusdiszperzió hatása az egymódusú optikai szálak AM sávszélességére

VESZELY GYULA

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
veszely@evt.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: polarizációs módusdiszperzió, egymódusú optikai szál AM sávszélessége

Megvizsgáltuk az első- és másodrendű polarizációs módusdiszperzió (PMD) hatását egymódusú optikai szálak AM sávszélességére. Megadtuk az átviteli karakterisztika általános formuláját. Azt találtuk, hogy a másodrendű PMD bizonyos esetekben sávszélességnövelő hatású, és hogy a másodrendű kromatikus diszperzió a PMD mellett elhanyagolható.

1. Bevezetés

A szerző korábban [1] már foglalkozott az egymódusú optikai szálak AM-sávszélességének meghatározásával. Figyelembe vette az optikai vivő vonalszélességét és elsőrendű diszperziós paraméter esetén analitikus, másodrendű esetén pedig numerikus eredményt adott az AM-sávszélességre. Jelen cikk célja, hogy a fenti eredményeket általánosítsa az első- és másodrendű polarizációs módusdiszperzió (PMD) figyelembevételével.

2. Az AM-amplitudó-karakterisztika meghatározása

A PMD alapfogalmait csak tömören ismertetjük, a részleteket illetően az irodalomra utalunk.

Az egymódusú optikai szál geometriai és mechanikai hatások következtében kettős törést mutat, azaz különböző polarizációjú hullámokra más-más a törésmutatója. A valódi szál kettős törése mind nagyságra, mind irányra nézve véletlenszerűen változik a szál hossza mentén. 1986-ban Poole és Wagner [2] megmutatták, hogy minden szálra létezik két olyan ortogonális polarizációjú állapot a szál bemenetén, amelyekre a megfelelő kimeneti polarizációs állapotok elsőrendben frekvenciafüggetlenek. Ezeket nevezzük fő polarizációs állapotoknak (Principal State of Polarization, PSP). Általában egy, a bemenetnél a fő állapottal egybeeső hullám terjedése közben különböző polarizációs állapotokon keresztül fejlődik (szemben egy polarizációt őrző szállal, melynek sajátmódusa változatlanul terjed). Ilyen módon a PSP a kettőstörésnek a szál teljes hosszára kiterjedő kollektív hatása és nem szükségképpen korrelál a lokális kettős töréssel. A két PSP terjed a legkisebb és legnagyobb csoportfutási idővel.

Másodrendű PMD-nél figyelembe kell venni a bemeneti és kimeneti tér kapcsolatát megadó Jones-mátrix frekvenciafüggését is. E függés leírására az irodalomban többféle modellt is bevezettek. Mi az Orlandini-Vincetti modellt [3] fogjuk használni, amely jól közelíti az egzaktnak tekinthető numerikus eredményeket az $\Omega < 2,5$ Trad/s tartományban (az időegység ps).

Eszerint a kimeneti térerősség:

$$\mathbf{E}_{out} = \left[A_1 E \left(t + \frac{p-a}{2} \right) + A_2 E \left(t + \frac{p+a}{2} \right) \right] \mathbf{v} + \left[A_3 E \left(t - \frac{p+a}{2} \right) + A_4 E \left(t - \frac{p-a}{2} \right) \right] \mathbf{v}^* \quad (1)$$

ahol $\mathbf{v} = [1-j]^T$;

a * konjugálást, T transzponálást jelent.

p a PSP Stokes-vektor frekvenciafüggését kifejező elfordulást meghatározó idődimenziójú mennyiség;

$$a = \sqrt{\Delta\tau^2 + p^2} \quad ,$$

ahol $\Delta\tau$ a két PSP futásiidő-különbsége (Differential Group Delay: DGD);

az A_i konstansok a p, a, $\Delta\tau$ és a $b = e_{ix} + j e_{iy}$ bemeneti polarizációs állapot által meghatározottak [3].

A [3]-ban szereplő $E(t)$ függvényeket kissé általánosabban, az [1]-ben elmondottak szerint definiáljuk, hogy az optikai forrás véges vonalszélességét is számításba tudjuk venni:

$$E(t, \omega'') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega - \omega'') e^{-j\beta(\omega)z} e^{j\omega t} d\omega \quad , \quad (2)$$

ahol S a moduláló jel négyzetgyökének spektruma. Az (1) alapján a kimeneti jel a bemeneti jel négy különböző módon eltolt másolatának kombinációja. Ez mindig így van, ha a Jones-mátrix frekvenciafüggését trigonometrikus függvényekkel modellezzük, mert az inverz Fourier-transzformációnál az exponenciális szorzó időbeli eltolást jelent.

Az AM jel négyzetgyöke spektrumának kifejezését, valamint $\beta(\omega)$ sorfejtését másodfokig [1]-ben megadtuk. Ezekkel $E(t, \omega'')$ és a négy időbeli eltolt kiszámítható, majd az $I(t, \omega'') = \mathbf{E}_{out} \mathbf{E}_{out}^*$ függvény képezhető. Végül az átlagos jel az ugyancsak analitikusan kiértékelhető

$$\langle p(z, t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{aa}(\omega_0 - \omega'') I(t, \omega'') d\omega'' \quad (3)$$

formulából kapható, ahol a Φ_{aa} teljesítményspektrumot Lorentz-függvény szerintinek vesszük, w teljes félérték-szélességgel [1].

Jó adag trigonometria után az alábbi végeredményt nyerjük:

$$\begin{aligned}
 \langle p(z,t) \rangle = & 2APC_0C_1e^{-\frac{w\beta\Omega z}{2}} \cos \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \left[(e_{ix}^2 + e_{iy}^2) \left(\cos \frac{\Omega p}{2} \cos \frac{\Omega a}{2} + \frac{p}{a} \sin \frac{\Omega p}{2} \sin \frac{\Omega a}{2} \right) \cos \Omega t + \right. \\
 & \left. + (e_{ix}^2 - e_{iy}^2) \frac{\Delta\tau}{a} \left(\frac{p}{a} \sin \frac{\Omega p}{2} \cos \frac{\Omega a}{2} - \cos \frac{\Omega p}{2} \sin \frac{\Omega a}{2} \right) \sin \Omega t \right] - \\
 & - APC_0C_1 \sin \frac{\Omega p}{2} \times \\
 & \times \frac{\Delta\tau}{a} \frac{p}{a} (e_{ix}^2 - e_{iy}^2) \left[e^{-\frac{w}{2}|a+\beta\Omega z|} \cos \left(\frac{\Omega a}{2} + \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \right) + e^{-\frac{w}{2}|-a+\beta\Omega z|} \cos \left(-\frac{\Omega a}{2} + \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \right) \right] \sin \Omega t - \\
 & - 2APC_0C_1 \sin \frac{\Omega p}{2} \times \\
 & \times \frac{\Delta\tau}{a} e_{ix}e_{iy} \left[e^{-\frac{w}{2}|a+\beta\Omega z|} \cos \left(\frac{\Omega a}{2} + \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \right) - e^{-\frac{w}{2}|-a+\beta\Omega z|} \cos \left(-\frac{\Omega a}{2} + \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \right) \right] \cos \Omega t \quad (4)
 \end{aligned}$$

Az eredménynek néhány szembeeső sajátossága van:

a) Az $e_{ix}^2 - e_{iy}^2$ szorzótényező körpolarizációs bemenet esetén zérussá válik (lásd b kifejezését az (1) formula után), ilyenkor (4) jelentősen egyszerűsödik.

b) Az $e_{ix}e_{iy}$ szorzótényező lineáris polarizáció ($e_{iy} = 0$ vagy $e_{ix} = 0$) esetén zérussá válik, ami ugyancsak egyszerűsödést jelent.

c) A harmadik és negyedik sor kitevőjében megjelenik a $-a + \beta\Omega z$ különbség, ami a másodrendű PMD sáv szélességnövelő hatását mutatja. Az analóg jelenséget impulzusátvitel esetén (impulzuskompresszió) mind analitikusan, mind mérésrel már Poole is kimutatta [4].

A (4)-ből az amplitúdókarakterisztika úgy nyerhető, hogy kiszámítjuk a $\cos \Omega t$ és $\sin \Omega t$ együtthatóinak négyzetösszegéből vont négyzetgyököt, majd az eredményt Am -el osztjuk.

3. Elsőrendű PMD

Ebben az esetben a fő polarizációs állapot (PSP) frekvenciafüggésétől eltekintünk, ami azt jelenti, hogy $p=0$ és ennek következtében $a=\Delta\tau$. Ekkor az általános formula az alábbi alakra egyszerűsödik:

$$\langle p(z,t) \rangle = 2APC_0C_1e^{-\frac{w\beta\Omega z}{2}} \cos \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \left[e_{ix}^2 \cos \Omega \left(t + \frac{\Delta\tau}{2} \right) + e_{iy}^2 \cos \Omega \left(t - \frac{\Delta\tau}{2} \right) \right] \quad (5)$$

Látható, hogy a kétféle polarizáció futásiidő-különbsége miatt interferencia lép fel.

Ha csak egyféle polarizáció van jelen (e_{ix} vagy e_{iy} zérus), akkor a szögletes zárójelben lévő időfüggvény amplitúdója állandó, így az amplitúdókarakterisztikát nem befolyásolja.

A moduláló frekvenciára vonatkozó amplitúdókarakterisztika:

$$H(\Omega) = \frac{\langle p(z) \rangle}{Am} \quad (6)$$

$$= \frac{2PC_0C_1}{m} e^{-\frac{w\beta\Omega z}{2}} \left| \cos \frac{\beta\Omega^2 z}{2} \sqrt{e_{ix}^4 + e_{iy}^4 + 2e_{ix}^2e_{iy}^2 \cos \Omega \Delta\tau} \right|$$

A korábban látott karakterisztika [1] a PMD hatására a négyzetgyökkel bővült, ami zérus kromatikus diszperzió ($\beta=0$) esetén meghatározza a sáv szélességet. Ha nem lép fel PMD, akkor $\Delta\tau = 0$ és a négyzetgyök $e_{ix}^2 + e_{iy}^2$ -et ad, a sáv szélesség végtelen. Ha $\Delta\tau \neq 0$, a négyzetgyök értéke $(e_{ix}^2 + e_{iy}^2)$ és $(e_{ix}^2 - e_{iy}^2)$, azaz $e_{ix}^2 + e_{iy}^2 = 1$ esetén 1 és $2e_{ix}^2 - 1$ között ingadozik.

Ez az ingadozó görbe általában a sáv szélességet meghatározó 1/2 magasságú vonal felett halad, kivéve, ha $0,5 < e_{ix} < \sqrt{3}/2$, (a hozzá tartozó e_{iy} a normálási feltételből számítható).

Eszerint a sáv szélesség

$$\Omega = \begin{cases} \infty & \text{ha } e_{ix} < 0,5 \text{ vagy } e_{ix} > \sqrt{3}/2 \\ = \frac{1}{\Delta\tau} \arccos \frac{1/4 - e_{ix}^4 - e_{iy}^4}{2e_{ix}^2e_{iy}^2} & \text{ha } 0,5 < e_{ix} < \sqrt{3}/2 \end{cases} \quad e_{ix}^2 + e_{iy}^2 = 1. \quad (7)$$

A $\Delta\tau$ csoportfutási idő különbség (DGD) statisztikus jellemző, aminek maximális névleges értékét a tényleges érték csak előírtan kicsi valószínűséggel haladja meg. A $\Delta\tau$ csoportfutási idő különbség a kábelhossz négyzetgyökével arányos, az arányossági tényező a PMD_Q együttható, amit mi a rövidség okán c -vel jelölünk:

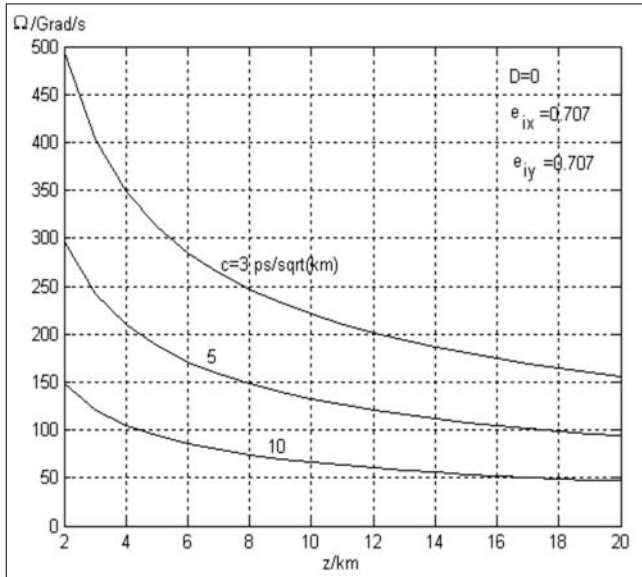
$$\Delta\tau = PMD_Q \sqrt{z} = c\sqrt{z}.$$

Bár a c együttható maga is kábelhossz-függő, mi az egyszerűség kedvéért a teljes kábelhosszra azonos értékkel számoltunk.

$e_{ix} = e_{iy} = 1/\sqrt{2}$ esetén (körpolarizáció) a (6) formula az alábbi eredményt adja:

$$\Omega = \frac{2\pi}{3} \frac{1}{c\sqrt{z}}$$

Az 1. ábrán ezt a sávzélességet tüntettük fel háromféle c paraméter esetén.

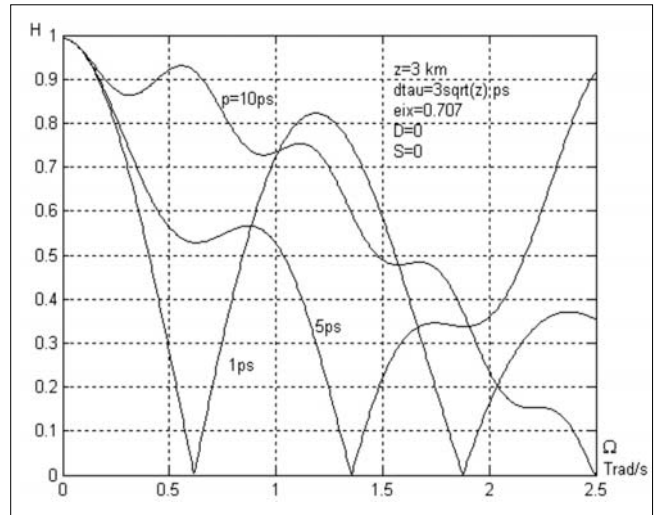
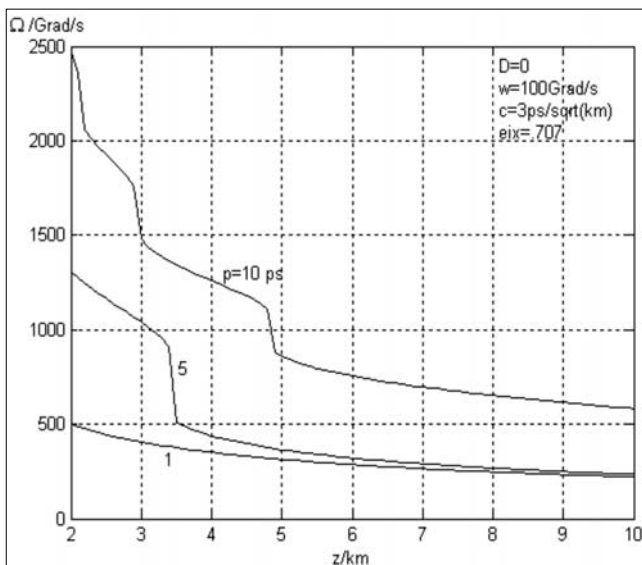


1. ábra AM modulációs sávzélesség elsőrendű PMD és zérus kromatikus diszperzió esetén

4. Másodrendű PMD

Hogy a PMD hatása markánsan jelentkezzen, zérus kromatikus diszperzió ($D=0$) esetén határozzuk meg a sávzélességet (lásd a 2. ábra görbéit). Megjegyzendő, hogy az amplitúdókarakteristika rendkívül kacskaringós menete miatt a gyökkereső könnyen eltéved és az eredmények az amplitúdókarakteristikával történő állandó összehasonlítást igényelnek. Meglepő, hogy várakozásunkkal ellentétben nagyobb p -hez nagyobb sávzélesség tartozik. Ennek magyarázatát a 3. ábra adja.

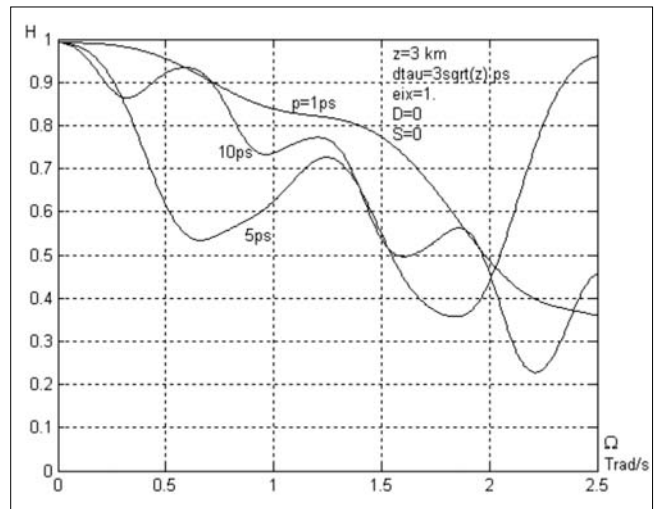
2. ábra AM sávzélesség másodrendű PMD esetén



3. ábra AM átviteli karakterisztika
Magyarázatot ad arra a paradoxonra, hogy a PSP gyorsabb elfordulása (nagyobb p) miatt okoz sávzélesség-növekedést. A nagyobb p az $\Omega/2$ argumentumú trigonometrikus függvények szaporább változását okozza, ami szuperponálódik a futási idő különbség által létrehozott „állóhullám” görbére, megakadályozva annak zérusra csökkenését ($w=100$ Grad/s).

A 4. ábra a 3. ábra adataival készült, csak itt lineáris a polarizáció. Ezért nem jelentkezik az interferencia miatti „állóhullám”, és a legkisebb p -hez tartozik a legnagyobb sávzélesség. Sávzélességet nemcsak a meghatározás nehézsége miatt nem érdemes számolni, hanem azért sem, mert az átvitelről a teljes karakterisztika többet mond.

4. ábra
Ugyanaz, mint a 3. ábra, csak itt lineáris a polarizáció ($w=100$ Grad/s)



5. Másodrendű PMD és másodrendű kromatikus diszperzió

Ha a $\beta(\omega)$ sorfejtésében elmegyünk a harmadfokú tagig, a (3) integrál csak numerikusan értékelhető ki. A számításokban az $S=0,056$ ps/km/nm² másodrendű diszperziós paramétert használtuk.

Az eredmények szinte vonalvastagságon belül egyeztek az $S=0$ esetén nyertekkel. Így kijelenthetjük, hogy a PMD mellett a másodrendű kromatikus diszperzió elhanyagolható.

A szerzőről

Veszely Gyula a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszékének egyetemi tanára, a műszaki tudomány doktora, az URSI MNB és a Híradástechnika szerkesztőbizottságának tagja. Egy szakkönyv és mintegy 60 publikáció szerzője. Fő kutatási területei az optikai szálak elmélete és a nanoelektronika.

Irodalom

- [1] Veszely Gy.,
„Hírközlési üvegszálak amplitúdómodulációs sávzélességéről”,
Híradástechnika, Vol. 62., 2007/6,
pp.10–13.
- [2] C.D. Poole, R.E. Wagner,
„Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers”,
Electronics Letters, Vol. 22., 1986,
pp.1029–1030.
- [3] A. Orlandini, L. Vincetti,
„A simple and useful model for Jones matrix to evaluate higher order polarization-mode dispersion effects”,
IEEE Photonics Technology Letters,
Vol. 13., 2001,
pp.1176–1178.
- [4] C.D. Poole, C.R. Giles,
„Polarization-dependent pulse compression and broadening due to polarization dispersion in dispersion-shifted fiber”,
Opt. Letters, Vol. 13., 1988,
pp.155–157.

Hírek

A politikai konszenzus egyelőre várat magára hazánkban, de az elektronikai ipar olyan nagyágyúi, mint az Intel vagy az Ericsson közös nevezőre jutottak abban, hogyan válhatna Magyarország az ágazat központjává. A világgazdaság mintegy harmadában közreműködő terület képviselői nemrég erről is szót ejtettek az idén **Budapesten rendezett EWME (European Workshop on Microelectronics Education) konferencián**. A most 7. alkalommal megrendezett EWME az egyik különösen kritikusnak számító területtel, a mikroelektronikai képzéssel foglalkozik. Az ágazat fejlesztéssel foglalkozó szereplői már több éve vizsgálják a letelepedés lehetőségét a kelet-európai régióban, mindezt idáig kevés kézzelfogható eredménnyel. A fejlesztéshez nélkülözhetetlen tervezőeszközöket szállító két meghatározó cégóriás, a Cadence és a Mentor Graphics is Kelet-Európában keres olyan letelepedési lehetőséget, amely során részben a kormányzat közreműködésével támogatná és fejlesztené a helyi hi-tech és mikroelektronikai ipart. Az ilyen meghatározó vállalatok szerepvállalása jelentősen elősegíti egyéb elektronikai cégek megjelenését, illetve a helyi mikroelektronikai ipar fejlődését.

A Siemens új kompetenciaközpontja „kiválóságközpontként” szolgál majd minden Siemens Enterprise Communicationst érintő műszaki kérdés és megoldás tekintetében Magyarországon és világszínvonalú infrastruktúrájával július 1-jétől áll a partnerek rendelkezésére. Új piacra lépési stratégiája keretében a Siemens Enterprise Communications a magyar kommunikációs szolgáltatások piacának magasabb szintű kiszolgálása érdekében szélesíteni kívánja indirekt értékesítési csatornáit. A magasabb szintű kiszolgálás, amely koncentráltabb, indirekt értékesítési szervezetenél rendelkezésre áll, valamint az egyedi ügyféligényeket kielégítő különleges Siemens szerviz-kompetenciaközpont szolgáltatásai valamennyi ügyfél számára kedvező változást jelentenek. Az új kompetenciaközpont munkatársi gárdája a Siemens szervizrészlegének dolgozóiból áll össze és hozzáfér a Siemens Enterprise Communications teljes tudásbázisához, így az ügyfelek legösszetettebb műszaki kérdéseire is megtalálja a választ.

A nagyteljesítményű számítástechnikával kapcsolatos trendeket kutató TOP500 projekt szerint a világ legnagyobb szuperszámítógépes Linux-rendszereinek esetében a **SUSE Linux Enterprise** rendszert használják a legtöbben. A világon működő 50 legnagyobb szuperszámítógép 40%-án ez fut, köztük a 3 legnagyobbon: a Lawrence Livermore National Laboratory IBM eServer Blue Gene, a Juelich Research Center IBM eServer BlueGene/P és a New Mexico Computing Applications Center SGI Altix 8200 rendszerein is. A nyílt forráskódnak és az alacsony hardverköltiségeknek köszönhetően a Novell és partnerei nagy teljesítményt igénylő számítási funkciókat tesznek elérhetővé a nagyvállalatok és a közepes méretű szervezetek számára a különböző iparágak, köztük a gépipar, a kutatás és a tudomány területén.