

Impulzusregenerálás az optikai tartományban

PAKSY GÉZA

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
paksy@tmit.bme.hu

Kulcsszavak: optikai távközlés, optikai hálózat, AON, 3R regenerálás

A digitális átviteltechnika egyik alapeljárása az impulzussorozatok regenerálása. Az elektronikus 3R regenerálást széles körben alkalmazzák az optikai SDH, WDM rendszerekben is. A tisztán optikai tartományi regenerálás azonban még nem jelent meg a gyakorlatban, bár számos előnyt jelentene alkalmazása, a Tisztán Optikai Hálózatok kialakításához pedig elengedhetetlenül szükséges. Cikkünkben áttekintjük a 2R és 3R típusú optikai regenerálási eljárások elméleti alapjait, a szükséges fotonikai eszközök működési elvét, és ismertetünk néhány gyakorlati megoldást.

1. Bevezetés

A digitális távközlési rendszerek kialakulásának kezdetén három olyan új jelkezelési eljárás fejlődött ki, melyek alkalmazása végül a digitális átviteltechnika teljes hatalomátvételéhez vezetett. Az első a beszédjelek digitalizálását lehetővé tevő impulzus kód moduláció (PCM), a második a digitális csatornák nyalábolását megvalósító időosztásos multiplexálás (TDM) és végül, de nem utolsósorban az impulzusregenerálás, mely alkalmazásával a nyaláboló PCM impulzussorozatot különféle közegeken át lehet vinni a szükséges távolságokra.

A digitális átvitel fő előnye az addig alkalmazott analóg FDM technikával szemben az, hogy a regenerátorok, vagy más elnevezéssel repeaterek megakadályozzák a vonal mentén a zajok akkumulációját, ismétlési szakaszonként teljes mértékben visszaállítják az adóimpulzusok jelformáját és ennek következtében a digitális átvitel minőségét nem a felhalmozódó zajok és torzítások határozzák meg, hanem a regenerálás hatékonysága, a bittévesztés mértéke.

Jelenleg az optikai SDH/Ethernet/WDM rendszerekben csak elektronikus regenerátorokat és analóg optikai erősítőket alkalmaznak. Felmerül a kérdés, hogy az eddig olyan sikeresen alkalmazott impulzusregenerálást meg lehet-e valósítani elektronika nélkül, azaz tisztán optikai eszközökkel? Ez ugyanis alapfeltétele lenne annak, hogy tetszőleges méretű és bonyolultságú tisztán optikai hálózatokat hozzunk létre. A kérdés megválaszolásához áttekintjük az impulzusregenerálás elvét, majd bemutatjuk a tisztán optikai tartományi regenerálás elméleti alapjait és várható gyakorlati megvalósítási lehetőségeit.

1.1. Az impulzusregenerálás elve

Az impulzusregenerálás a következő három lépésből áll:

a) *Erősítés és jelformálás (Reshaping)*, mely során az átviteli csatorna lineáris torzításai miatt fellépő szintcsökkenést és impulzustor-

zulást alkalmas erősítővel és jelformáló korrekterekkel megkíséreljük kompenzálni és a vételi jelalakot az eredeti, adó jelalakhoz hasonlóra visszaformálni. A csatorna additív zajainak és az jelátlapolódás (ISI) csökkentése érdekében azonban ez a jelalak nem az eredeti négy-szögimpulzus, hanem a Nyquist-feltételeket az adott alkalmazásban optimálisan kielégítő hullámforma.

b) *Az újraidőzítés (Retiming)*

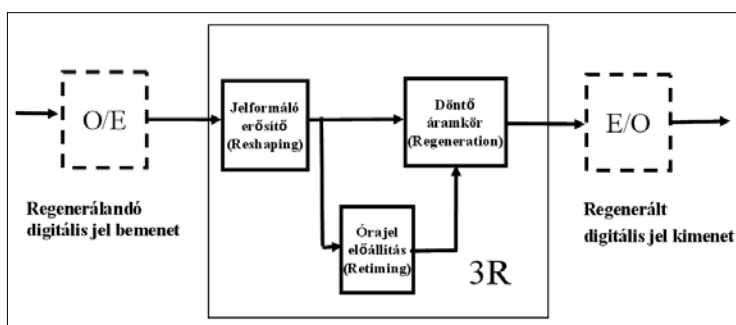
funkció feladata az adóban alkalmazott órajel kinyerése a vett impulzussorozatból. A vett jel teljesítményszűrűség-spektruma rendszerint nem tartalmaz diszkrét spektrális komponenszt az órajel frekvenciáján és ezért valamilyen nemlineáris jelkezelést kell alkalmazni, például a jel négyzetre emelését. A vételi órajelet a regenerált jelsorozat, az eredeti jelismétlődési frekvenciának megfelelő időzítésére (impulzusismétlődési idő, impulzusszélesség) használjuk fel.

c) *Az impulzus helyreállítása (Regeneration)*

történhet az adó órajelének ismerete nélkül. Ehhez egyszerű döntési szint túllépését detektáló komparátorokra van szükség, de ekkor a regenerált impulzusok szélessége a jeltorzulás mértékétől fog függeni. Alkalmazhatunk a visszaállított órajellel vezérelt döntőáramkört is, mely esetben a regenerált impulzus szélessége pontosan meg fog felelni az eredetinek.

A Reshaping–Retiming–Regeneration funkciókat röviden R betűvel rövidítjük. Szokás röviden 1R, 2R vagy

1. ábra
Az elektronikus jelregenerátorok funkcionális felépítése



3R regenerálásról beszélni, attól függően, hogy mely funkciók kombinációját alkalmazzuk, a következők szerint – 1R: *Reshaping*, 2R: *Reshaping+Regeneration*, 3R: *Reshaping+Retiming+Regeneration*.

A digitális regenerátorok elektronikus megvalósításának általános blokksemáját az 1. ábra mutatja. Optikai alkalmazás esetén a bemeneten optikai/elektromos (OE), a kimeneten elektromos/optikai (E/O) átalakítókat is el kell helyezni.

2. Az optikai tartományi jelregenerálás igénye

Az optikai távközlésben már a kezdetektől (~1980) lényegesen nagyobb átviteli sebességet és áthidalható távolságot valósítottak meg, mint az addig alkalmazott rézkábeles és mikrohullámú rendszerekkel. Ma az optikai technológia fejlődése következtében nagyságrendekkel túllépték a kezdeti képességeket, erősítés nélkül 100-200 kilométeres, analóg optikai erősítőláncokkal pedig több ezer kilométeres áthidalható távolságok és csatornánként 40 Gbit/s sebesség a mindennapi gyakorlat. A hullámhossz multiplexált (WDM) átvitel alkalmazásával egy szálon akár 2-3 terabit/s információátviteli kapacitás is elérhető.

Az optikai átvitel jelenlegi képességei tehát látszólag minden eddigi és jövőbeni információátviteli igényt ki tudnak elégíteni. A szélessávú szolgáltatások rohamos terjedése azonban hatalmas sávszélesség- és kapcsolókapacitás-igényt generált, főként az IP/DWDM maghálózatokban. A hálózat központi IP útvonalválasztói elérték a Tbit/s kapcsolási kapacitásokat, mert az IP útvonalválasztóknak nem csak a hagyományos Internet forgalmat kell kiszolgálniuk, hanem a konvergált újgenerációs szélessávú szolgáltatásokat is. Ehhez nagy átviteli kapacitások mellett olyan hibavédett hálózatokra van szükség, ahol a hálózati meghibásodások hatását nagyon rövid idő alatt útvonal átirányítással kell kiküszöbölni.

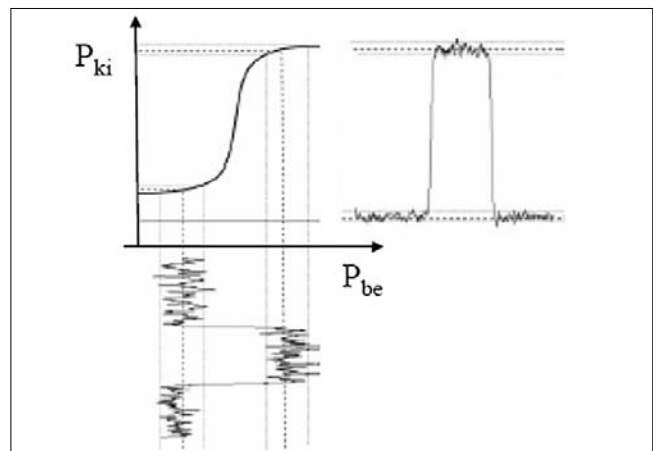
Ma már egyre nyilvánvalóbbá válik, hogy ennek a kettős feladatnak a korrekt ellátására a jelenlegi elektronikus IP útvonalválasztók hatalmas méreteik, jelentős teljesítményfelvételük és magas hődisszipációk miatt a jövőben nem lesznek alkalmasak. Kézenfekvő a gondolat, hogy az IP útvonalválasztók terhelésének csökkentése érdekében a lényegesen nagyobb sávszélességet kezelni képes optikai hálózatra kell áttérni a legnagyobb sávszélességet igénylő szolgálatokat, mert ilyen módon le lehet csökkenteni nemcsak a szükséges IP kapcsolókapacitásokat, de a távoli pontok között az IP csomópontok közötti hopok számát is. Ezzel jelentős beruházási és üzemeltetési költségeket lehet megtakarítani.

Ez a gondolat alapozta meg az „Tisztán Optikai Hálózatok” (*All Optical Network, AON*) kutatás-fejlesztését. Az AON hálózatokban, mint azt az elnevezésből is kitűnik, az információátvitel minden művelete az optikai tartományban hajtodik végre. A 10 Gbit/s-tól nagyobb sebességnél azonban az optikai szál fizikai paraméterei már

rövidebb távolságokon is (>50 km) jelentősen befolyásolják az optikai jelalakot. A kromatikus- és a polarizációs diszperzió hatásait egyre költségesebb kompenzálni, ezért a 3R regenerálás alkalmazása indokoltá válik. A 40 Gbit/s sebességű, O-E-O átalakítással dolgozó regenerátorok megvalósíthatósága az elektronikai eszközök határfrekvenciái miatt túlságosan költségesek. 40 Gbit/s-nál nagyobb sebességű soros jelátvitelt már csak fotonikai elveken alapuló eszközökkel lehet megvalósítani. Az AON hálózatra való áttéréshez tehát az tisztán optikai regenerátorok alkalmazása is elengedhetetlen.

3. Az optikai szintű impulzusregenerálás elve

Az optikai jelregenerálás alapelve lényegében megegyezik az 1.1. szakaszban ismertetett elektronikus impulzusregenerálás elvével, azzal a különbséggel, hogy az „R” funkciók fizikai megvalósítása csak sajátos optikai/fotonikai eszközökkel, vagy azok kombinációjával lehetséges. Ha egy optikai impulzus regenerátort egy „fekete doboznak” tekintünk, akkor ennek a doboznak a 2. ábra szerinti nemlineáris optikai transzfer karakterisztikával kell rendelkeznie, amely ideális esetben egy lépésfüggvény, a valóságban egy véges meredekségű átmeneti függvény. Minél meredekebb a karakterisztika, annál hatékonyabb a regenerálás és a zajelnyomás.

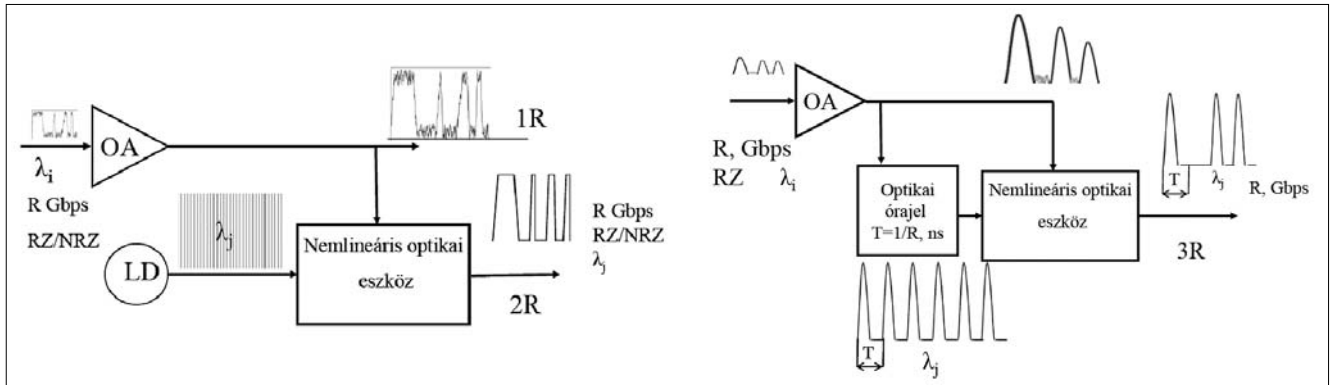


2. ábra

Az optikai regenerálás elve és transzfer függvénye

Az ábra jól mutatja, hogy ha egy zajos, torzult bemeneti impulzussal vezérlünk alkalmas transzferkarakteristikájú eszközt, akkor kimeneti impulzusnak nemcsak a jelformája közelíti az eredetit, hanem a zajokat is elnyomja.

Az optikai regenerátort alkotó elemek nyilvánvalóan eltérnek az elektronikus regenerátorokétól, mert az elektronikus áramköri eszközöknek nincsenek közvetlen optikai ekvivalensei. Az optikai regenerátor létrehozásához tehát keresni kell olyan optikai eszközöket, melyek önmagukban vagy több ilyen eszköz kombinációjával képesek létrehozni a 2. ábra szerinti átviteli függvényt. Az ilyen optikai eszközökön alapuló optikai regenerátorok



3. ábra Az optikai 2 és 3R regenerátorok blokk-sémája

elvi blokk-sémáit a fenti, 3. ábra mutatja be, melyen nyomon követhetjük az 1R, 2R és 3R optikai regenerátorok elvi működését:

- Az 1R regenerálás nem más, mint egy lineáris erősítés, esetleg kiegészítve analóg diszperzió-kompensáló eszközökkel. Az erősített jel alakja függ az átviteli útvonal torzításaitól és az akkumulálódott zajtól.
- 2R regenerálás esetén a helyi fényforrás λ_j hullámhosszú folytonos jelét a beérkező, felerősített λ_i ($i \neq j$) hullámhosszú regenerálandó optikai jel kapcsolja az adatimpulzus-szekvenciának megfelelően a kimenetre. A regeneráció egyúttal $\lambda_i \rightarrow \lambda_j$ hullámhossz konverzióval is jár. A regenerált optikai impulzusok szélessége függ a vonali torzításoktól és a nemlineáris eszköz transzfer karakterisztikájától.
- 3R regenerátor abban különbözik a 2R regenerátortól, hogy helyi optikai forrást rászinkronizáljuk a regenerálandó adójelre és annak ismétlődési frekvenciájával (órajelével) azonos frekvenciával modulált fényimpulzus sorozatot vezetünk át az optikai „kapu áramkörön”.

Az elmúlt évtizedben rendkívül széleskörű kutatás folyt és folyik jelenleg is a 2R és 3R regenerátorok lehetséges megvalósíthatóságának témakörében. A publikált eredmények alapján a következőkben bemutatunk néhány olyan megoldást, amelyek a gyakorlati alkalmazhatósággal kecsegtetnek.

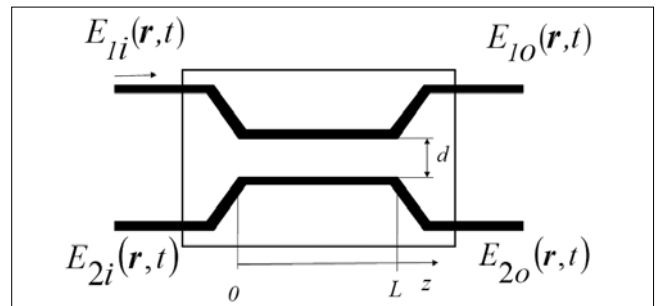
Az optikai regenerátorokat alkalmazási területük szempontjából két nagy csoportra oszthatjuk: (1) egyhullámhosszas regenerátorok, (2) többhullámhosszas (WDM) regenerátorok. Míg az (1) csoportba tartozó regenerátorok egy adott üzemi hullámhosszra készülnek, addig a többhullámhosszas (WDM) regenerátorok a párhuzamosan működő WDM csatornák eltérő hullámhosszú optikai jeleit közösen regenerálják.

4. Az optikai jelregenerálás fotonikai alapeszközei

Az optikai jelregenerálás megvalósításának érdemi tárgyalása előtt át kell tekintenünk az alkalmazott optikai elemeket [1]. Az elemek ismertetésébe csak olyan mélységig megyünk bele, amely feltétlenül szükséges a teljes rendszer megértéséhez.

4.1. Optikai iránycsatolók

Az optikai iránycsatoló két egymástól d távolságban futó, L hosszúságú két optikai hullámvezető, melyek elektromágneses tere csatolásba kerül (4. ábra).



4. ábra Az optikai iránycsatoló felépítése

Két párhuzamos, csatolt optikai tápvonalban terjedő elektromágneses tér változását a z tengely mentén a Helmholtz-egyenlet írja le:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + n^2 k_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0 \quad (1)$$

ahol $\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)$ az $E(\mathbf{r}, t)$ villamos erőter Fourier transzformáltja, $k_0 = \omega/c$, és n a törésmutató az x, y síkban. A csatolt módusok elmélete azt feltételezi, hogy az (1) egyenlet közelítő megoldása az alábbi:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) \approx \mathbf{e} [\bar{A}_1(z, \omega) F_1(x, y) + \bar{A}_2(z, \omega) F_2(x, y)] e^{j\beta z} \quad (2)$$

ahol \mathbf{e} az optikai mező polarizációs iránya, a β pedig a terjedési tényező. Az $F_m(x, y)$, az m -edik, ($m=1, 2$), optikai hullámvezetőben terjedő alpmódus, abban az esetben, ha nem lenne csatolás a két hullámvezető között. Az $A_m(z, \beta)$ a módusok amplitúdója a z tengely mentén. Ahhoz, hogy meghatározhassuk az $A_1(z, \beta)$ és $A_2(z, \beta)$ fényintenzitás változását a z -tengely mentén, a (2) egyenletet integrálni kell az egész $x-y$ síkra. Ha ezek után visszatérünk az időtartományba azzal a feltétellezéssel, hogy állandó teljesítményű, szinuszhullámú fényt adunk a bemenetekre, valamint elhanyagoljuk a tápvonalak csillapítását, diszperzióját és nonlinearitását, akkor megkapjuk a kimenetek és a bemenetek közötti alábbi kapcsolatot mátrixos formában:

$$\begin{bmatrix} A_1(L) \\ A_2(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa L) & j \sin(\kappa L) \\ j(\kappa L) & \cos(\kappa L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(0) \\ A_2(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Vezessük be a $\rho = \cos^2(\kappa L)$ változót és jelöljük az iránycsatoló transzfer mátrixát \mathbf{T} -vel, mely az alábbi lesz:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sqrt{\rho} & j\sqrt{1-\rho} \\ j\sqrt{1-\rho} & \sqrt{\rho} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Az iránycsatoló átvitelét tehát két tényező határozza meg: a κ csatolási tényező, melynek értéke függ a két tápvonal d távolságától, a tápvonalak keresztmetszeti méreteitől, a törésmutatóktól és az áthaladó fény hullámhosszától. A csatolás mértékét másrészt befolyásolja az L csatolási hossz is.

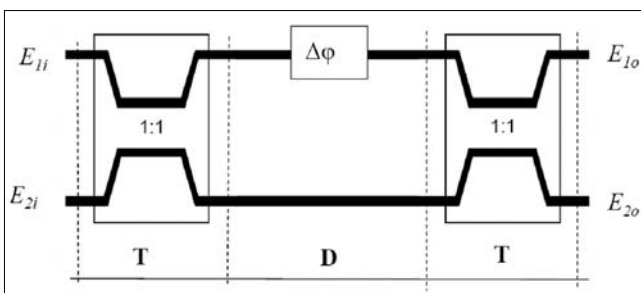
Ha az 1. bemenetre $P_{1i} = |A_i|^2$ teljesítményű fényt adunk és az osztásarányt 50-50 százalékosra, azaz szimmetrikusra választjuk, akkor a kimeneti megjelenő fényt teljesítmények az 1. és a 2. kimeneti kapun:

$$\begin{aligned} P_{1o} &= P_{1i} \cos^2(\kappa L) \\ P_{2o} &= P_{1i} \sin^2(\kappa L) \end{aligned} \quad (5)$$

Végeredményben tehát az iránycsatoló két kimenetén megjelenő fény teljesítményének összege mindig egyenlő a bemenetre adott fény teljesítményével és a két kimenet között mindig $\pi/2$ fáziskülönbség van. Az optikai iránycsatoló nem csupán egyszerű teljesítményosztó, hanem, mint azt a későbbiekben látni fogjuk, több optikai alapstruktúra építőeleme is lehet. Megvalósítása lehetséges két párhuzamos optikai szál magjainak d távolságú közelítésével L hosszban, de lehetséges műanyag vagy szilícium lapkára integrált fényvezető szalagtápvonalakkal is.

4.2. Mach-Zehnder interferométerek

A száloptikában alkalmazott Mach-Zehnder interferométer (MZI) felépítése nem más, mint két egymásután elhelyezett iránycsatoló, amelyek között a legegyszerűbb esetben L_1 és L_2 hosszúságú optikai szálak vagy tápvonalak vannak, ezek képezik az interferométer két „karját” (5. ábra).



5. ábra Mach-Zehnder interferométer

Az MZI optikai átvitelét a két kar optikai tulajdonságai, terjedési jellemzői határozzák meg. Szimmetrikusnak nevezzük az MZI-t, ha a két sorbakapcsolt iránycsatoló osztásaránya azonos. Határozzuk meg ebben az esetben MZI transzfer mátrixát, azzal a feltételezéssel, hogy az MZI-t felépítő elemek csillapítás- és diszperziómentesek, valamint a nemlineáris hatásokat is elhanyagoljuk. A szimmetria feltétele, hogy a csatolási tényezők egyezzenek meg, azaz $\rho_1 = \rho_2 = 1/2$. Az 5. ábra szerinti elrendezésben legyen a két kar közötti fáziseltérés $\Delta\phi$.

A teljes rendszerre vonatkozó \mathbf{T}_{MZI} transzfermátrixot a három összetevő transzfermátrixának szorzataként írhatjuk fel:

$$\mathbf{T}_{MZI} = \mathbf{T} \mathbf{D} \mathbf{T} \quad (6)$$

ahol \mathbf{T} az iránycsatolók, \mathbf{D} a karok alkotta $\Delta\phi$ fázistolást létrehozó négypólus transzfermátrixa:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} e^{-j\Delta\phi} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ha elvégezzük a mátrixszorzást, akkor az MZI kimenetén kapott optikai jel teljesítményére az alábbi összefüggéseket kapjuk:

$$\begin{aligned} P_{1out} &= I/2 P_{1in} [1 - \cos \Delta\phi] \\ P_{2out} &= I/2 P_{1in} [1 + \cos \Delta\phi] \end{aligned} \quad (8)$$

Látható, hogy az átvitelt a $\Delta\phi$ fáziskülönbség határozza meg. Kiegyensúlyozott esetben $\Delta\phi = 0$, tehát a 2. kimenetre, $\Delta\phi = \pi$ esetén pedig az 1. kimenetre jut minden teljesítmény.

Ezt a jelenséget jól ki lehet használni optikai kapcsoló vagy modulátor készítésére úgy, hogy a $\Delta\phi$ fáziskülönbség mértékét vezérelhetővé tesszük.

4.3. Nagy nemlinearitású optikai szálak

Mint azt a 3. szakaszban bemutattuk, az optikai regeneráláshoz nemlineáris transzfer-karakteristikára van szükség. Nemlineáris eszköz lehet például az ilyen célokra kifejlesztett nagy nemlinearitású optikai szál (*Highly Non-Linear Optical Fiber, HNLF*) is. A mag és a köpeny törésmutatója és az effektív magkeresztmetszet megfelelő megválasztásával elérhető, hogy normál optikai szálaknál több nagyságrenddel nagyobb nemlineáris tényezőjű optikai szálakat állítsanak elő. Újabban mikrostrukturált fotonikus kristályszalakat is (*Photonic Crystal Fiber, PCF*) is alkalmaznak nemlineáris jelkezelési célokra.

Az optikai szál nemlinearitásán azt értjük, hogy a β terjedési tényező teljesítményfüggővé válik, azaz $\beta = \beta + \gamma P$ összefüggés szerint változik. A γ a nemlineáris tényező, melynek értéke $1,5 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ határok között változik az optikai szál effektív keresztmetszete és a hullámhossz függvényében. A β terjedési tényező γP nemlineáris tagja Φ_{NL} fázistolást hoz létre, melyet a β - β terjedési tényező különbség L szálhosszra vett integráljával számolhatunk ki: $\Phi_{NL} = \gamma P_{in} L_{eff}$.

Az optikai szál nemlinearitásának számos hatása van az optikai szálon haladó optikai jelekre. A részletes tárgyalás helyett az alábbiakban a jelregenerálás szempontjából érdekes hatásokat foglaljuk össze:

a) *Önfázis-moduláció (Self-phase Modulation, SPM)* esetén, ha a P_{in} teljesítmény időben változik, például a moduláció miatt, akkor a Φ_{NL} nemlineáris fázistolás is időfüggő lesz és ennek következtében $\delta\omega(t) = d\Phi_{NL}/dt$ mértékű frekvenciaeltolás jön létre a jel spektrumában. Ez kiszélesíti a jel spektrumát és ennek következtében a moduláció hullámformája is változni fog, azaz a jel saját magát modulálja.

b) *Kereszfázis-moduláció (Cross-phase Modulation, XPM)* esetén a vizsgált λ_j hullámhosszú jellel azonos optikai szálban akár több, λ_j -től eltérő hullámhosszú, P_m

teljesítményű optikai jelek is haladhatnak. Ezeknek a j -edik jelre gyakorolt hatásuk következtében fellépő nemlineáris fáztololás mértéke:

$$\Phi_j^{NL} = \gamma L_{eff} \left(P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m \right) \quad (9)$$

ahol az első tag az SPM a második tag pedig a keresztfázis modulációért felelős. A 2-es szorzótényező azt mutatja, hogy az XPM hatása kétszer erősebb, mint az SPM-é. A HNLFF-ek alkalmazását az nehezíti, hogy fáztololás létrehozásához jelentős optikai teljesítmény és több tíz méter hosszú szál szükséges.

4.4. Félvezetős optikai erősítők

A félvezetős optikai erősítő (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) nem más, mint egy küszöbszint alatt működő Fabry-Perot (FP) félvezető lézer. Az FP lézerstruktúrában a tükröző síkok reflexióját olyan kis értékre választják meg, hogy önfenntartó lézerhatás ne jöjjön létre, de optikai erősítés igen.

A SOA egyik előnye, hogy az optikai jel erősítéséhez szükséges energiát a félvezetőn átfolyó elektromos áramból biztosítja, szemben a száloptikai erősítőkkel (EDFA, Raman), amelyekhez pumpáló fényforrás szükséges. További előnye, hogy integrálható, néhány mm-es chipen megvalósítható. Kisjelű erősítése 30 dB körül van, de nagytávolságú optikai rendszerekben lineáris erősítőként az EDFA-hoz képesti nagyobb zaja és rosszabb linearitási tulajdonságai és polarizációérzékenysége miatt ez idáig nem alkalmazták, optikai jelátalakító, jelregenerálási alkalmazásokban azonban jól használható.

A SOA-kban fellépő harmadrendű nemlinearitás abból ered, hogy az aktív réteg törésmutatója változik a töltéshordozók sűrűségével. A γ nemlineáris tényezője hét nagyságrenddel nagyobb, mint az optikai szálaké ($n_2 \approx 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{W}$). A SOA-kban a domináns nemlineáris hatások – hasonlóan az optikai szálakhoz – az ön- és keresztfázis-modulációt (SPM, XPM), a keresztterősítés-modulációt (XGM) valamint a négyhullám-keverés (FWM). Az SOA-k felhasználását optikai jelregenerátorokban a cikk további részében mutatjuk be.

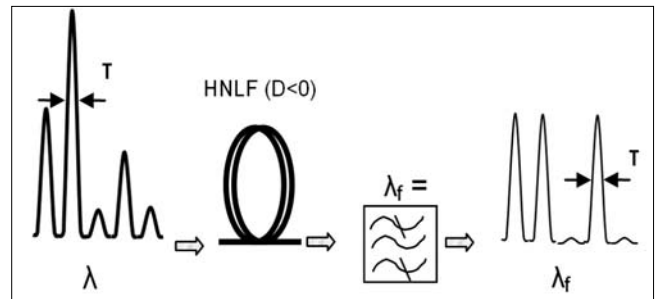
5. Egy hullámhosszas optikai regenerátorok

2R és 3R típusú egyhullámhosszas optikai regenerátorok számos változatát dolgozták ki és publikálták az elmúlt 5-10 évben.

A megoldások többsége XGM vagy XPM hatások kihasználásával oldja meg a feladatot. Ehhez a jelen cikkben nem ismertetett fotonikai eszközöket is alkalmaztak, mint például elektroabszorpciós modulátort (EAM), a Sagnac interferométer különféle módosított változatait (NOLM, TOAD) [2,3]. A cikk terjedelmi korlátai miatt azonban csak a legígéretesebb változatokat ragadtuk ki, kissé részletesebben ismertetve az alkalmazott elemeket és az ezekkel megvalósított regenerátorok működését.

5.1. 2R regenerálás az SPM hatás kihasználásával

2R regenerálást létre lehet hozni megfelelő hosszúságú HNLFF felhasználásával. A regenerátor működése a nagy optikai teljesítmény hatására létrejövő önfázis-moduláción (SPM) alapszik. Egy negatív diszperziójú HNLFF-fel be lehet állítani a regenerált impulzussorozat névleges impulzusszélességét (T) és intenzitását (6. ábra). A nemlinearitás a spektrumban $\Delta\lambda_{SHIFT}$ hullámhosszeltolódást hoz létre, ezért a HNLFF-et egy $\lambda_0 + \Delta\lambda_{SHIFT}$ optikai frekvenciára hangolt sávszűrőnek kell követnie. Az összeállítás nagyon meredek regenerátor karakterisztikát produkál és érdekessége, hogy extrém nagy sebességekre (>160 Gbit/s) is alkalmas, mert az SPM-et létrehozó, anyagi jellemzőktől függő, az optikai szál teljesítményfüggő törésmutató változását leíró Kerr-effektus időállandója az femtoszekundumos (0,001 ps) tartományba esik. Laboratóriumi kísérletekben már 640 Gbit/s sebességű optikai jelek regenerálására alkalmas összeállítást is publikáltak [4].



6. ábra SPM-en alapuló 2R regenerátor

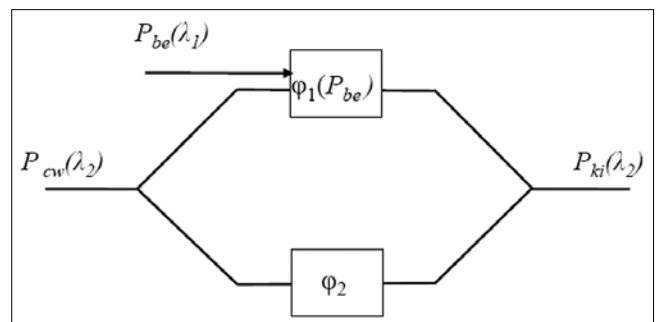
Hasonló módon, de alacsonyabb teljesítményekkel ki lehet használni a SOA nemlineáris karakterisztikáját SPM alapú regenerálásra. A beeső fényimpulzus megváltoztatja a vezetési sáv törésmutatóját, és ennek hatására telítésbe megy az erősítő. A fellépő SPM az optikai szálhoz hasonló módon kiszélesíti és a vörös felé tolja a spektrumot. Ennek pozitív hatása az, hogy az eltolott frekvenciára hangolt szűrő elnyomja az eredeti jel „0” értékeire szuperponálódott zajokat.

5.2. 2R/3R regenerálás

Mach-Zehnder interferométer felhasználásával

Ha a 7. ábra szerinti elrendezésben egy MZI-ben a $\Delta\phi$ fáztololás létrehozásához egy nemlineáris eszközt helyezünk, akkor kihasználva annak vezérelhető nem-

7. ábra A Mach-Zehnder interferométer alapú optikai regenerátor



lineáris fáziskarakterisztikáját, a 2. ábrán már bemutatott transzferkarakterisztikájú optikai elrendezéshez jutunk. Az MZI karjában lévő nemlineáris eszköz túlvezérléséhez a regenerálandó $P_{be}(\lambda_1)$ teljesítményű optikai adatjelet használjuk. Az MZI közös bemenetére pedig egy helyi forrásból származó modulálatlan, konstans teljesítményű, folytonos $P_{cw}(\lambda_2)$ teljesítményű optikai jelet vezetünk. Ekkor 2R regenerálást és egyúttal $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ hullámhossz konverziót hajtunk végre. Ha a bemenetre a regenerálandó adatjelre szinkronizált optikai órajelet vezetünk, akkor 3R regenerálás jön létre.

Az optikai összeállítás működése tehát az alábbi.

A MZI kimenetén az optikai jel teljesítménye az (5) alapján:

$$P_{ki}(\lambda_2) \approx 1/2 P_{cw}(\lambda_2) [1 - \cos(\varphi_1(P_{be}(\lambda_1)) - \varphi_2)] \quad (10)$$

Ha a regenerálandó impulzus értéke „0”, azaz $P_{be}(\lambda_1) \approx 0$ (csak zaj van) és $\varphi_1 \approx \varphi_2$, akkor $P_{ki}(\lambda_2) = 0$, azaz a regenerált adat értéke: „0” és az elrendezés elnyomja a bemeneti zajt is. Az „1” impulzus esetén a regenerálandó $P_{be}(\lambda_1)$ adatjel túlvezérli az optikai eszközt, a $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ értékű lesz. Az (10) transzfer függvénynek megfelelően $P_{ki}(\lambda_2) = P_{cw}(\lambda_2)$, azaz a logikai „1” értéknek megfelelően konstans intenzitású, zajmentes optikai impulzust kapunk a kimeneten.

Ha nemlineáris elemként SOA-át alkalmazunk, akkor a 7. ábra szerinti elrendezés egy kis módosításával a gyakorlatban nagyon jól használható optikai regenerátor elrendezéshez jutunk. A 8. ábra egy olyan elrendezést mutat, amely az MZI minkét karjában egy-egy SOA van. Erre a félvezetős optikai erősítők a regenerálandó impulzusok impulzusidejénél lényegesen hosszabb feléledési ideje miatt van szükség.

A SOA fázis-karakterisztikájának időfüggvénye az alábbi:

$$\varphi(\tau) \approx -\frac{1}{2} \beta_c \ln G(\tau) \quad (11)$$

ahol $G(\tau)$ az erősítés időfüggvénye, ha a bemenetere keskeny impulzust adunk. A feléledési idő tipikus értéke ~16 ps, ami 40 Gbit/s sebességű RZ impulzus esetén már nagyobb a jel impulzus idejénél.

Az optikai regenerátor működési mechanizmusa az következő: ha a regenerálandó λ_1 hullámhosszú adatjel pillanatnyi értéke „0” (csak zaj van), akkor az erősítők lineáris üzemmódban működnek, az MZI egyensúlyban van és a kimeneten nem jelenik meg optikai jel. Ha azonban a regenerálandó adatjel „1” értékű, akkor a SOA1 túlvezérlése következtében fellépő XPM hatására π fázistolás jön létre és az MZI közös bemenetére adott $P_{cw}(\lambda_2)$ órajelet megjelenik a kimeneten. A SOA1 a telítésből a regenerálandó impulzus idejéhez képest lényegesen nagyobb feléledési idővel tér vissza az eredeti kisjelű erősítésre, aminek következtében a kimeneti impulzus lefutási ideje jelentősen megnövekedne.

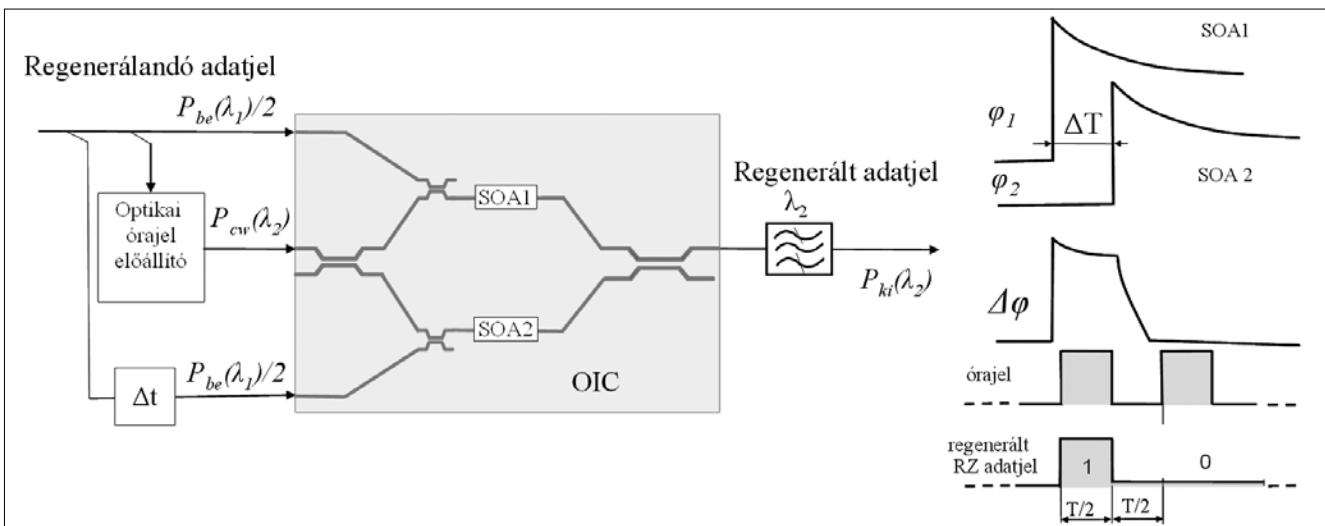
Ezt kivédendő az MZI másik ágába elhelyezett SOA2 erősítőre $\Delta t \geq T/2$ késleltetéssel rávezetjük az regenerálandó adatjelet, mely ellenfázisban ismét egyensúlyba hozza az MZI-t. Ezzel gyakorlatilag egy $\Delta t \geq T/2$ időtartamú optikai kapuzójelet hoztunk létre. 2R regenerálás esetén ez lesz a kimeneti impulzus szélessége, 3R regenerálás esetén pedig a kapuzási idő alatt a szinkronizált optikai órajelet $T/2$ szélességű félperiódusa jelenik meg, ami az RZ kódolású jel „1” impulzusát jelenti. Ezzel az eljárással sikeresen kompenzáltuk a SOA-k lassabb működését [6,7].

Az MZI-SOA elrendezés nagy előnye, hogy alkalmas optikai integrálásra. A fotonikus integrált áramkörti technológiával a 8. ábra beszűkített területén látható MZI optikai „integrált áramkör” (OIC), mely különféle változatban, a lézerdiodákhoz hasonló tokozásban kapható [11].

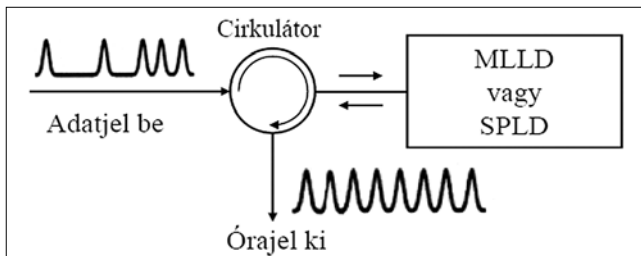
5.3. Optikai órajelet előállítási módszerek

A 3R funkciók közül az időzítőjel előállítása (retiming) az elektronikus tartományban is kritikus feladat. Jellegzően fáziscsatolt hurkokkal (PLL) vagy nemlinearitásokat is tartalmazó rezonáns körökkel állítják elő a bemeneti adatjelből az órajelet. Az optikai rendszerekben is 40 Gbit/s-ig lehetséges az elektronikus megoldás, fellette azonban már a szilíciumalapú félvezető eszközök határfrekvenciái erős korlátokat szabnak.

8. ábra Mach-Zehnder interferométer alapú optikai regenerátor gyakorlati megvalósítása



A tisztán optikai órajel előállítására speciális optoelektronikai eszközök szükségesek. Számos kutatási eredményt publikáltak ezen a területen, ezek közül a 9. ábra szerinti elrendezést vizsgálták a legtöbben. E szerint az optikai adatjelet egy optikai cirkulátoron keresztül beinjektáljuk egy speciális lézereszközbe, mely generálja az órajelt és visszatükrözi a kimenetére. A cirkulátor kimenetén rendelkezésre áll a 8. ábra $P_{cw}(\lambda_2)$ jele.



9. ábra Az optikai órajel előállítás elve

Jelenleg két speciális lézereszköz áll rendelkezésre, mely képes egy, a beinjektált fényhullám burkolójára fázisban csatolt, annak impulzusismétlődési frekvenciájával azonos frekvenciával modulált fényhullámot létrehozni.

- A móduscsatolt lézer

(Mode-Locked Laser Diode, MLLD)

olyan háromszekciós lézer struktúra, mely egy abszorbeáló, egy erősítő és egy DBR (Distributed Bragg-reflector) lézerrészből áll. A szabadonfutó lézer frekvenciáját az adatátviteli sebesség közelébe kell beállítani. Az aktív rétegbe injektált, adatjellel modulált fény hatására az adatjel ismétlődési frekvenciájára hangolódik. Hátránya, hogy a móduscsatolási frekvenciát a lézer üregmérete határozza meg, ezért hangolása nehézkes [9].

- Az önpulzáló lézerek

(Self-Pulsating Laser Diode, SPLD)

szintén több szegmensből álló DFB (Distributed Feedback) lézerstruktúra, mely a MLLD-hez hasonlóan az aktív rétegbe injektált adatjelre húz rá. Előnye, hogy frekvenciája elektronikusan hangolható, ezért széles sebességtartományban képes működni. A laboratóriumi kísérletek gyors működést mutattak ki, ezért potenciális jelölt lehet a több száz Gbit/s-os alkalmazásoknál [8].

6. Több-hullámhosszas (WDM) regenerátorok

A jelenleg üzemelő optikai rendszerek többsége sok független optikai csatornát összenyaláboló hullámhosszmultiplexálású WDM rendszer [10]. Ha az optikai jel minősége (hibaarány, jel/zaj viszony vagy Q-faktor) eléri egy megadott korlátot, akkor minden egyes hullámhosszra külön-külön OEO konverziós elektronikus regenerátort (transzpondert) kell alkalmazni.

Ha az előzőekben ismertetett egyhullámhosszas optikai regenerátorokat alkalmaznánk, a helyzet csak annyiban változna, hogy a költséges, nagy energiafogyasztású elektronikus regenerátorok helyébe, kisméretű, kis

energiafogyasztású optikai regenerátorok lépnének. Bár már ez is számos szempontból jelentős üzemeltetési-, költség- és helymegtakarítást jelentene, a kutatók erőfeszítése arra irányul, hogy az összes WDM csatornát egy eszközzel képesek legyenek regenerálni. A jelenleg ismert WDM regenerátorok működési alapelvei az előzőekben ismertetett nemlineáris hatások alkalmazásán alapszanak, azzal a megszorítással, hogy a nemlineáris eljárások nem okozhatnak a WDM csatornák között áthallást, zajt.

Az alábbiakban tudományos publikációk alapján, a teljesség igénye nélkül, felsorolunk néhány laboratóriumi körülmények között megvalósított 2R típusú WDM regenerálási lehetőséget. Terjedelmi okok miatt ezek ismertetésére nem térünk ki.

- 2R regenerálás HNLF-fel, az SPM hatás kihasználásával;
- 3R WDM regenerátor EAM szinkron modulációval;
- regenerálás WDM/OTDM konverzióval.

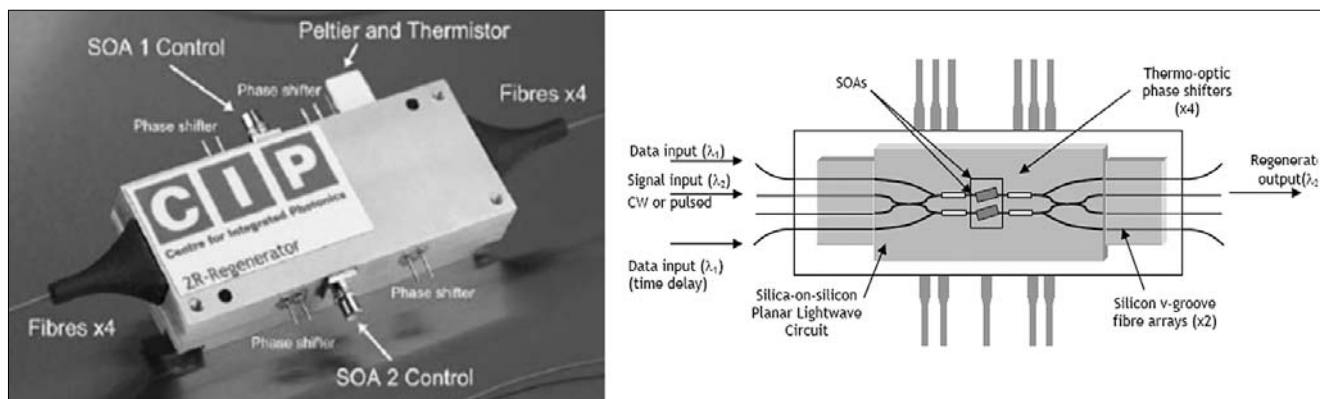
A WDM regenerátorok kutatása még kezdeti fázisban van, de a biztató eredmények azt ígérik, hogy hosszabb távon megoldhatók lesznek a még fennálló problémák. A WDM technológiának azonban erős versenytársakkal kell szembenézni a jövőben. Az optikai szintű csomagkapcsolás (OPS/OPS) valamint az optikai időosztásos multiplexálás (OTDM) a 100 Gbit/s-nál nagyobb sebességeken igen előnyös tulajdonságokat mutatnak mind flexibilitás mind skálázhatósági szempontból. Ezért nem biztos, hogy egy optikai hálózatban igény merül fel 40-80 WDM csatorna szimultán regenerálására. Szükség lehet azonban egy korlátozott 4-8 optikai csatornát regenerálni tudó regenerátorra, ha a GMPLS rendszerekben megvalósul az optikai sávok egyidejű útvonal irányítása.

7. Optikai regenerátorok elérhetősége és várható alkalmazási területei

Az optikai regenerátorok kutatás-fejlesztése már egy olyan színvonalat ért el, hogy néhány fotonikára szakosodott kis cég, kutatóintézet felvette kereskedelmi választékába a 10-40 Gbit/s sebességű 2R vagy 3R optikai regenerátorokat. Példaképp a CIP Technologies cég az 5.2. szakaszban ismertetett elven működő MZI alapú 2R regenerátorának tokozását és blokk-sémáját mutatjuk be (10. ábra) [11].

A bemutatott példa azt mutatja, hogy az optikai regenerátorok széleskörű alkalmazása néhány év távlatában reális alternatíva. Ezért érdemes áttekinteni, hogy melyek lesznek jellemző hálózati alkalmazási területeik:

- Nagytávolságú (>1000 km) földfelszíni és tengeralatti rendszerekben tetszőleges hosszúságú optikai összeköttetések létrehozására.
- Sok optikai kapcsolót tartalmazó ROADM és OXC berendezésekből felépített AON hálózatokban.
- Az optikai csomagkapcsolású hálózatok mindkét fajtájában, az Optical Burst Switching (OBS) és Optical Packet Switching (OPS) rendszerekben



10. ábra A CIP cég 40 Gbit/s sebességű 2R optikai regenerátora és annak blokk-sémája (72x30x10 mm)

az optikai jelfeldolgozás okozta csillapítások és torzítások kompenzálására.

- Az optikai időosztásos rendszerekben (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) ≥ 160 Gbit/s esetén.

8. Összefoglalás

Az optikai tartományi impulzusregenerálás biztató kutatási eredményei és egyes cégek által megvalósított integrált optikai impulzusregenerátorok paraméterei biztató eredményeket mutatnak és reményt adnak a jövőbeni gyakorlati alkalmazáshoz. Az optikai regenerátorok alkalmazása elő fogja segíteni a komplex, nagykiterjedésű teljesen optikai hálózatok kialakulását és ezzel további lépés tehető a mainál nagyságrendekkel nagyobb felhasználói sáv szélességet biztosító szélessávú kommunikáció irányába.

A szerzőről

Paksy Géza 1966-ban szerzett villamosmérnöki diplomát a Budapesti Műszaki Egyetemen. Azóta a digitális hírközlés területén végez kutató-fejlesztő munkát. Kezdetben a Távközlési Kutató Intézetben, majd a Telefongyárban és a PKI Távközlésfejlesztési Intézetben dolgozott. Kezdetben PCM, majd később optikai távközlési berendezések és hálózatok kutatás-fejlesztési feladatainak kidolgozásában vett részt. Jelenleg a Budapesti Műszaki Egyetemen Távközlési és Média-informatikai Tanszékén nagysebességű fotonikai hálózatok és berendezések a kutatási területe. A HTE tagja, részt vesz a „Híradástechnika” szerkesztőbizottságának munkájában és elnyerte a Puskás Tivadar-díjat is.

Irodalom

- [1] G.P. Agrawal, Lightwave Technology: Components and Devices. Wiley Interscience, 2004.
- [2] Li Ho et al., A Study on the Wavelength Conversion and All-Optical 3R Regeneration Using Cross-Absorption Modulation in a Bulk Electroabsorption Modulator, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 24., No.8., August 2006, pp.3035–3044.
- [3] A. Bogoni et al., All-Optical Regeneration and Demultiplexing for 160 Gbit/s Transmission System Using a NOLM Based Three-Stage Scheme. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Elect., Vol. 10., No.12., Jan./Feb. 2004, pp.192–196.
- [4] P.V. Mamysev, All-Optical Data Regeneration Based on Self-Phase Modulation, European Conf. on Optical Communications 2008, (ECOC '2008), pp.475–476.
- [5] Watanabe, Optical Signal Processing Using Nonlinear Fibers. Optical and Fiber Communications Reports 3, Springer Science, 2005, pp.1–24.
- [6] J. Slovak, C. Bornholdt, B. Sartorius, “All-Optical 3R Regenerator for Asynchronous Data Packets at 40 Gb/s,” In Proc. of European Conf. on Optical Communication (ECOC '2004), Stockholm, Sweden, pp.388–389.
- [7] Zuquink Zhu et al., High Performance Optical 3R Regenerator for Scalable Fiber Transmission System Applications, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 25., No.2., February 2007, pp.504–511.
- [8] P. Rees, P. McEvoy et al., A Theoretical Analysis of Optical Clock Extraction Using a Self-Pulsating Laser Diode, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 35., No.2., February 1999., pp.221–227.
- [9] Shin Arahira, Yog Ogawa, Cavity-Resonant Behaviors of All-Optical Synchronization and Clock Recovery in Passively Mode-Locked Laser Diodes, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 44., No.5., May 2008, pp.410–423.
- [10] Kaminow, Optical Fiber Telecommunications Volume IVA, Chapter 15: All-Optical Regeneration: Principles and WDM Implementations. Elsevier Science, 2002.
- [11] CIP Technologies, UK, 40 Gbit/s 2R Optical Regenerator, Type: 40G-2R-ORP http://www.ciphotonics.com/PDFs_Jan08/40G_2R_ORP_F.pdf