

Dvofrekvenčni optični merilni vir za merjenje nelinearnega koeficienta optičnega vlakna

Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar
Fakulteta za elektrotehniko
Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si
<http://antena.fe.uni-lj.si/~lok>

Dual-frequency optical measurement source for characterisation of fiber nonlinear coefficient

In this paper the new simple measurement source for characterisation of fiber Kerr non-linearity by phenomenon of Four-Wave Mixing (FWM) is presented. Simple dual-frequency optical measurement source uses one externally modulated laser only, eliminates polarisation adjustment and enables high optical measurement power. The frequency spacing is precisely set by modulation signal and no adjustment is required during the measurement because there is no drifting. The temperature stabilization of laser and active Mach-Zehnder modulator (MZM) bias control enables long-term stability and good measurement repeatability. Novel measurement scheme is becoming simple and well applicable to field measurement.

1. Uvod

Pogoji za nastanek optičnih nelinearnih pojavov so neprimerno ugodnejši v enorodovnem optičnem vlaknu kot v surovi snovi, ker sta gostota optične moči in interakcijska dolžina v primeru vlakna neprimerno večji. Natančno poznavanje nelinearnih pojavov je pomembno pri načrtovanju vse optičnih sistemov in naprav, s čimer imamo možnost, da se jim izognemo, jih odpravimo ali jih celo koristno izrabimo. Škodljive in koristne posledice nelinearnosti lahko ovrednotimo samo, če je nelinearnost optičnega vlakna natančno podana. Iz tega razloga je potrebno imeti natančno, preprosto in poceni merilno napravo. Optična nelinearnost se podaja z nelinearnim koeficientom (angl. non-linear coefficient – NLC), ki je določen kot razmerje med koeficientom nelinearnega lomnega količnika in efektivno površino jedra optičnega vlakna.

NLC optičnega vlakna je mogoče meriti z uporabo številnih merilnih vezav, ki uporabljajo merilne tehnike osnovane na Kerrovi skupini optičnih nelinearnih pojavov. Le-ti so: lastna fazna modulacija (angl. Self-Phase Modulation - SPM), križna fazna modulacija (angl. Cross-Phase Modulation - XPM), štirivalovno mešanje (angl. Four Wave Mixing -

FWM) in parametrično ojačenje (angl. Parametric Gain - PG). Uporabljajo se raznovrstne izvedbe merilnih virov, ki generirajo različne oblike optičnega merilnega signala. Le-ta je lahko nemoduliran (angl. Continuous Wave - CW) ali impulzni signal ene valovne dolžine ali signal, v katerem je prisotnih več valovnih dolžin.

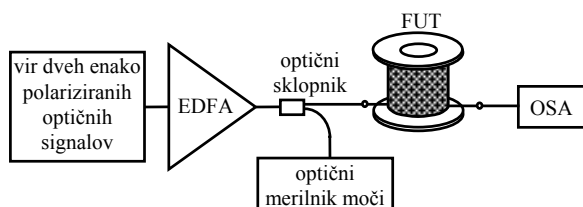
Merilne vezave za določevanje NLC razdelimo v interferometrične in neinterferometrične [1]. Delovanje prvih temelji na interferometriški detekciji fazne razlike, ki sta jo povzročila SPM ali XPM v merjenem vlaknu (angl. Fiber Under Test – FUT). Slednje pa so osnovane na direktnem opazovanju ene od štirih posledic Kerrovih nelinearnosti. Pri tem so ostali nelinearni pojavi moteči in iz tega razloga nezaželeni. Zato je potrebno pri meritvi upoštevati njihovo prisotnost in ovrednotiti njihov prispevek.

V zadnjem času je zaradi praktičnosti velike pozornosti deležna neinterferometrična merilna metoda na osnovi FWM, ki je predmet tega članka.

2. Zasnova merilnika NLC enorodovnega optičnega vlakna na osnovi FWM

Merilna naprava za merjenje NLC enorodovnega optičnega vlakna, ki deluje po principu FWM, je zgrajena kot prikazuje slika 1. Merilna metoda temelji na delno degeneriranem primeru FWM, kar pomeni, da imamo dva vstopna optična signala. Z namenom, da bomo mešalne produkte lažje določili, morata biti vstopna signala visoke optične moči. Zato ju v optičnem vlakenskem ojačevalniku z dopiranim erbijem (angl. Erbium Doped Fibre Amplifier – EDFA) ojačimo. Po ojačenju dvofrekvenčni optični signal sklopimo v FUT. Polarizaciji obeh komponent sta običajno s pomočjo polarizatorja nastavljeni tako, da sta linearni in paralelni druga glede na drugo. Pri prehodu skozi FUT nastanejo FWM produkti. Velikost nastalih mešalnih produktov se izmeri s pomočjo optičnega spektralnega analizatorja (angl. Optical spectrum analyser – OSA), katerega ločljivost mora biti manjša kot je frekvenčni razmik Δf med vhodnima

optičnima signaloma, ki izhajata iz vira dveh enako polariziranih optičnih signalov. OSA omogoča meritev razmerja optičnih moči med črpalnim signalom in optično harmonsko komponento, ki je generirana s pomočjo FWM. FWM metoda je pri optičnih vlaknih z veliko disperzijo neučinkovita, če komponenti dvofrekvenčnega signala nista dovolj frekvenčno blizu in stabilni.

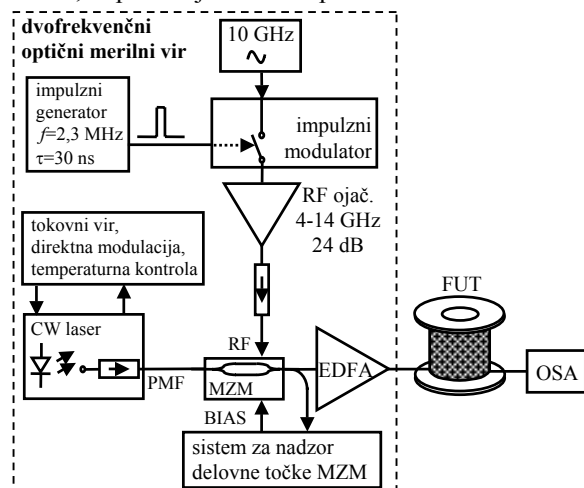


Slika 1: Vezalni načrt merilne naprave za določanje NLC optičnega vlakna z metodo FWM

Kot vir dveh enako polariziranih optičnih signalov se lahko uporablja dva ločena laserja [2], [3]. Vendar je tako zasnovan optični vir polarizacijsko odvisen in potrebuje vsaj en nastavljiv kontroler polarizacije za doseganje maksimalne učinkovitosti FWM. Frekvenčni razmik Δf je pri tovrstnih merilnih izvorih velikokrat deležen sprememb zaradi lezenja enega ali drugega laserja. Zaradi nemoduliranega in neimpulznega načina delovanja ima merilni izvor majhne izhodne mešalne produkte, zaradi česar ima tovrstna merilna metoda velike pogreške oziroma potrebuje veliko ojačenje signalov, kar znatno podraži merilno napravo.

3. Novo zasnovani merilni vir merilnika NLC na osnovi FWM

Novo zasnovani optični merilni vir [4] za merjenje NLC optičnega vlakna z metodo FWM je prikazan na sliki 2, ki prikazuje elektro-optični vezalni načrt.



Slika 2: Vezava sestavnih delov in naprav v merilni vir za merjenje NLC optičnega vlakna z metodo FWM

Tovrstni merilni vir tvorijo električni, optični in elektro-optični sestavni deli. Električni del vsebuje sinusni frekvenčni vir, impulzni generator, impulzni

modulator, visokofrekvenčni električni ojačevalnik, vezje za stabilizacijo delovne točke MZM in vezje za temperaturno kontrolo ter napajanje laserskega čipa. Optični sestavni deli so CW laser, optični izolator in EDFA. Elektro-optični sestavni del je Mach-Zehnderjev LiNbO_3 jakostni modulator na potujoči val, ki je tudi ključni element merilnega vira.

Nov dvofrekvenčni optični merilni vir za merjenje NLC z metodo FWM je sestavljen iz enega samega spektralno ozkega enorodovnega laserja. Laserski čip je napajen v temperaturno stabiliziran s pomočjo vezja za temperaturno kontrolo in napajanje. Izhodni optični signal iz laserja najprej preide optični izolator, ki odpravlja morebitne moteče odboje nazaj v laser. Laserski signal je nato zunanje moduliran z električnim impulznim radiofrekvenčnim signalom. Laserski izvor in modulator sta povezana z vlaknom, ki ohranja polarizacijo (angl. Polarisation Maintaining Fibre - PMF) in zagotavlja vedno isto polarizacijo na vходу v polarizacijsko občutljiv MZM. Zunanja modulacija se vrši v Mach-Zehnderjevem LiNbO_3 jakostnem modulatorju, v delovni točki maksimalno zadušenega nosilnika. Izbrana delovna točka MZM se nastavi s pomočjo prednapetostnega vira enosmerne napetosti in vzdržuje na istem mestu s pomočjo sistema za nadzor delovne točke MZM. S pomočjo MZM je na optični nosilnik moduliran impulzni radiofrekvenčni signal s frekvenco 10 GHz. Radiofrekvenčni signal generira sinusni frekvenčni vir. Niz električnih impulzov je ustvarjen s pomočjo impulznega modulatorja, ki ga krmili impulzni generator. V vlaknu električnih impulzov, ki prihajajo iz impulznega modulatorja imajo impulzi širino τ in se ponavljajo s frekvenco f oziroma imajo periodo T .

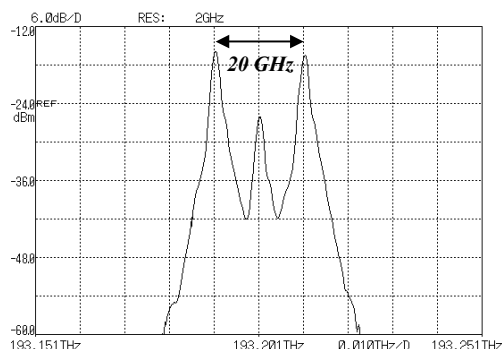
Stranska boka optičnega moduliranega signala, ki imata enako optično moč in polarizacijo, se ojačujeta v EDFA. Zaradi periodičnega ponavljanja električnih impulzov pride do utripanja stranskih bokov. Ker je čas ponavljanja električnih impulzov manjši od časovne konstante EDFA, je njegovo ojačenje povečano.

3. Opis delovanja dvofrekvenčnega FWM merilnika

3.1. Delovanje merilnika brez impulzne modulacije

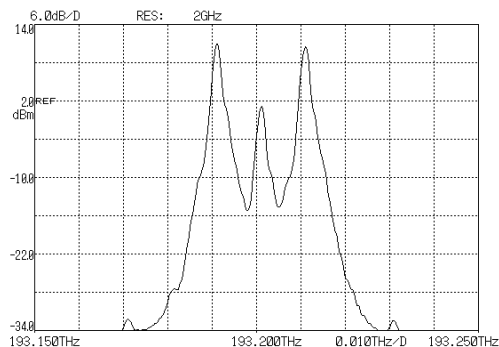
Najprej si pogledjmo obnašanje merilnega sistema, ko je impulzni modulator izklopljen. Pri tem na vhod elektro-optičnega MZM prihaja RF signal frekvence 10 GHz. Jakostna modulacija ustvari optičnemu nosilniku dva stranska boka v optičnem spektru. Generirana stranska boka sta simetrično oddaljena od nosilnika za 10 GHz in imata enako optično moč ter polarizacijo. S pomočjo enosmerne prednapetosti je intenzitetni modulator postavljen v točko, kjer je optični nosilnik maksimalno zadušen. Na ta način torej na izhodu

optičnega modulatorja pridobimo dvofrekvenčni optični signal pri katerem imajo obe komponenti enako moč in polarizacijo. Komponenti sta razmaknjena za 20 GHz, kot to prikazuje slika 3. Z namenom zmanjšanja vpliva Brillouinovega sipanja, ki nastane v optičnem vlaknu, je laser direktno moduliran z šibkim sinusnim signalom (-20 dBm) frekvence 14 MHz.

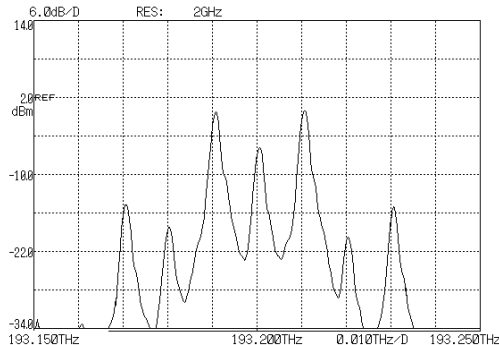


Slika 3: Optični spekter pri izključeni impulzni modulaciji na izhodu iz MZ modulatorja

Moduliran optični signal je nato ojačen v EDFA z ojačenjem G . Izhodni signal je zgolj ojačen in spektralno nespremenjen, kar prikazuje slika 4. To pomeni, da se v samem ojačevalniku niso vzbudili nikakršni nelinearni pojavi.



Slika 4: Optični spekter pri izključeni impulzni modulaciji na izhodu iz EDFA.



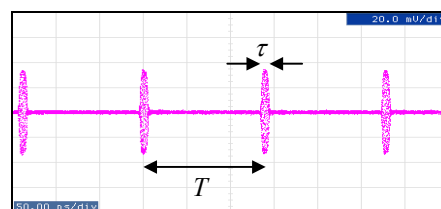
Slika 5: Optični spekter pri izključeni impulzni modulaciji na izhodu optičnega vlakna.

Po ojačenju je optični signal voden v optično vlakno dolžine 30 km, katerega NLC merimo. V FUT pride do pojava FWM in v izhodnem spektru nastanejo mešalni produkti, ki so opazni na sliki 5. S pomočjo nastalih mešalnih produktov je mogoče z uporabo enačbe, ki opisuje pojav FWM [5], določiti NLC.

Vhodna signala v vlakno imata oba linerano in paralelno polarizacijo, kar omogoča maksimalno učinkovitost FWM. Kljub temu so dobljeni mešalni produkti majhne moči. Zato je njihovo odčitavanje dokaj nenatančno, kar vnese napako v merilni rezultat.

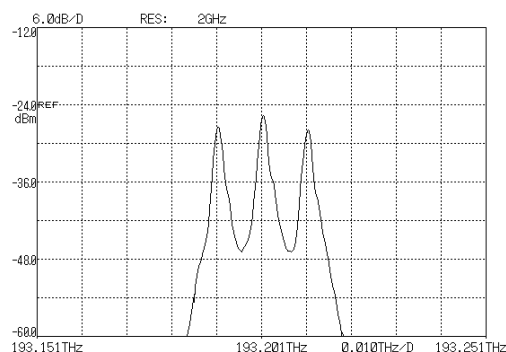
3.1. Delovanje merilnika z impulzno modulacijo

Z namenom povečanja nelinearnih mešalnih produktov je merilni shemi dodan električni impulzni modulator. Impulzno moduliran električni signal v časovnem prostoru prikazuje slika 6. Impulzna modulacija povzroči utripanje stranskih bokov v optičnem spektru.



Slika 6: Vlak električnih impulzov

Ker je sedaj intenziteta stranskih bokov v povprečju manjša, jih sprejemna fotodioda OSA zazna kot ustrezno manjša. Izhodni optični spekter iz impulzno krmiljenega elektrooptičnega modulatorja prikazuje slika 7. Slika optičnega nosilnika je nespremenjena in po moči in obliki povsem enaka tisti na sliki 3. Boki so na OSA zaradi utripanja navidežno manjši.

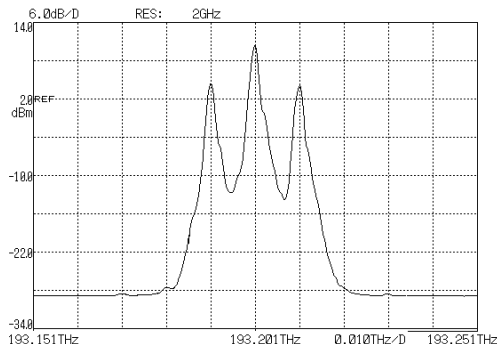


Slika 7: Optični spekter pri vključeni impulzni modulaciji na izhodu MZ modulatorja.

OSA meri impulzni optični signal s povprečenjem, ki ga izvaja z nizkopropustnim filtrom [6], [7]. Prikazana velikost moči utripajočih bokov je povprečna vrednost svetlobnih impulzov. V našem primeru, ko so impulzi popolnoma pravokotni, je prikazana vrednost produkt vršne moči in »duty cycle«. Vršna optična moč je torej

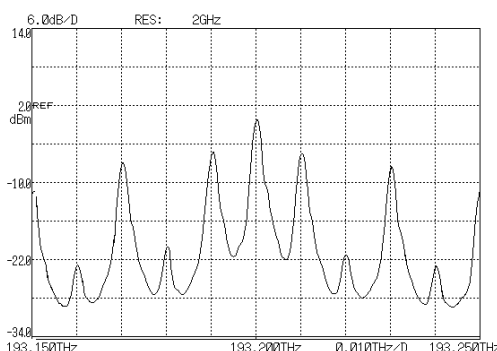
$$P_{VRŠNA} = \frac{\bar{P}}{\text{Duty Cycle}} = \bar{P} \cdot \frac{T}{\tau} \quad (1)$$

Zaradi povprečno manjše jakosti vhodne moči ima optični ojačevalnik sedaj večje ojačenje. Optični spekter ojačenega signala, ki izhaja iz EDFA, prikazuje slika 8. Ker je ojačenje večje, je v njegovem izhodnem optičnem spektru viden povečan nosilnik. Povečana sta tudi stranska boka, vendar to zaradi utripanja na fotodiodi OSA, ki povpreči sprejeto moč, ni vidno.



Slika 8: Optični spekter pri vključeni impulzni modulaciji na izhodu iz EDFA.

Ustrezno večje moči optičnih signalov v optičnem vlaknu ustvarijo mešalne produkte s precej večjo močjo. Kot je razvidno z izhodnega optičnega spektra, ki ga prikazuje slika 9, so mešalne komponente, kljub temu da njihovo moč fotodioda povpreči, precej povečane v primerjavi s tistimi na sliki 5. Zaradi povprečenja se njihova moč linearno zmanjšuje. Zaradi povečane moči stranskih bokov pa moč mešalnih komponent raste s tretjo potenco moči stranskih bokov.



Slika 9: Optični spekter pri vključeni impulzni modulaciji na izhodu vlakna.

Za natančno določitev NLC optičnega vlakna potrebujemo natančno očitati vršni moči stranskega boka in generiranega mešalnega produkta. Zaradi impulznega načina delovanja sta obe vrednosti vršne moči sedaj spremenjeni in ju je potrebno ustrezno skalirati. Prikazana velikost optične moči utripajočih bokov in mešalnih produktov je povprečna vrednost svetlobe impulzov. Vršna optična moč pravokotnih impulzov se izračuna po izrazu (1).

Za določitev prikazanega zmanjšanja moči zaradi povprečenja OSA si lahko pomagamo s primerjavo slik 5 in 9. Za določitev povečanja ojačenja EDFA si pomagamo z oceno povečanja optičnega nosilnika. Pri vključeni impulzni modulaciji je moč optičnega nosilnika za faktor G' večja kot pri izključeni impulzni modulaciji. Moč stranskih nosilnikov je navidezno za α' manjša kot pri izključeni impulzni modulaciji.

Iz zaslona, ki ga prikazuje slika 9, odčitamo razmerje moči med stranskima bokoma in generiranima FWM produktoma. Ker oba signala utripata z isto frekvenco, sta deležna enakega povprečenja in je njuno razmerje moči enako dejanskemu razmerju moči. Moč stranskega boka, ki je tudi potrebna za izračun NLC, je potrebno korigirati z ojačenjem G' .

3. Zaključek

Predstavljen merilni vir je namenjen karakterizaciji NLC enorodovnega optičnega vlakna z metodo FWM. Razvita merilna vezava ima z vidika optične opreme precej poenostavljen in cenejši merilni vir. Sestavljen je iz enega samega zunanje moduliranega laserskega vira in enega EDFA. Dvofrekvenčni optični merilni signal je visoke moči in enake polarizacije, kar omogoči učinkovito FWM. Učinkovitost je povečana tudi zaradi razmeroma majhnega frekvenčnega razmika med komponentama. Stabilnost pa zagotavlja enakomeren razmik med njima ter regulacija temperature laserja in delovne točke MZM.

Literatura

- [1] B. Batagelj, "Review of so far proposed fiber n2 measurement schemes", ICTON 2002
- [2] L. Prigent, J. P. Hamaide, "Measurement of fiber nonlinear Kerr coefficient by four-wave mixing", IEEE Photonics Technology Letters, vol.5, 1993, str. 1092-1095
- [3] J. C. Antona, S. Bigo, S. Kosmalski, "Nonlinear index measurements of various fibre types over C+L bands using four-wave mixing" Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Comm. (ECOC'01- Amsterdam), vol. 3, 2001, str. 270-271
- [4] B. Batagelj in M. Vidmar, "Optični vir za merjenje nelinearnosti optičnega vlakna z metodo štirivalovnega mešanja", Urad RS za intelektualno lastnino, 2002, str. 1-7
- [5] B. Batagelj, "Pretvornik valovne dolžine na osnovi štirivalovnega mešanja v optičnem vlaknu", ERK'00
- [6] "Pulsed- or Time-Dependent Optical Spectra Measurements", Product Note 71452-4, Agilent Technologies
- [7] "AQ6317 Optical Spectrum Analyzer", Instruction Manual, Ando Electronic CO., LTD, Japan 1998