

Fiber-optički senzor naprežanja baziran na optičkoj feedback interferometriji

Branimir Radisavljević

Sadržaj— U ovom radu je predstavljen senzor za merenje naprežanja, baziran na optičkoj feedback interferometriji, posredstvom brzog istežanja standardnog monomodnog fibera pri čemu dolazi do promene optičke dužine puta svetlosti koja se prostire u fiberu. U režimu umerene povratne sprege postignuta je visoka linearnost merenja u opsegu naprežanja od 0 do 700 $\mu\epsilon$, sa rezolucijom od $\sim 0.7 \mu\epsilon$. Mogućnost merenja distribuiranog naprežanja duž jedne veće površine je takođe jedno novo dostignuće za senzore ove kategorije. Preliminarni rezultati pokazuju da ovaj senzor ima dobru stabilnost sa povećanjem frekvencije u opsegu od 1 do 100 Hz.

Ključne reči — Fiber-optički senzori, merenje naprežanja, optička feedback interferometrija, self-mixing efekat.

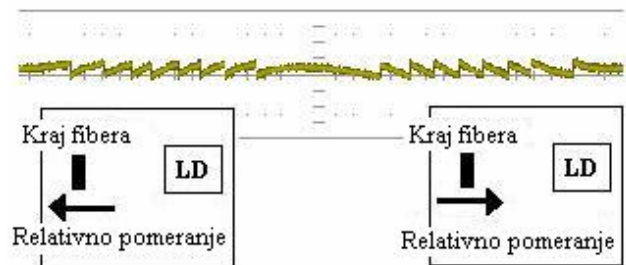
I. UVOD

U poslednje vreme fiber-optički senzori postaju sve više i više rašireni u različitim oblastima primene [1]-[2]. Visoka osetljivost, brz odziv i imunost na elektromagnetne smetnje, samo su neke od prednosti koje ih stavljaju ispred drugih vrsta senzora. Pored svega toga oni poseduju jako dobru toleranciju na surove uslove, kao što su veoma visoke temperature, betonski slojevi, morska voda i slično.

Self-mixing (SM) efekat u laserima, poznat i kao optička feedback interferetrija, je jako dobro proučavan u poslednje četiri dekade i pokazao se kao jedna od obećavajućih metoda za merenje pomeranja, vibracija, rastojanja, brzine [3]-[5], naprežanja i drugih srodnih veličina. Međutim, neke realizacije su tehnički jako komplikovane i zahtevaju pažljivo postavljanje visoko kvalitetnih optičkih elemenata.

Kao što je dobro poznato, self-mixing efekat u laserima ima više prednosti nad konvencionalnim metodama merenja. Ovaj metod zahteva jako jednostavne optičke šeme i lako postizanje SM efekta, gde mali procenat svetlosti biva reflektovan od slobodnog kraja fibera ili ogledala u lasersku šupljinu i gde interferirajući sa stojećim talasom u laseru prouzrokuje modulaciju amplitude emitovane optičke snage. Ovako modulirana izlazna snaga laserske diode može se jednostavno pratiti posredstvom fotodiode koja je ugrađena u laserskom pakovanju, što predstavlja jednu prednost u odnosu na ostale laserske izvore. U tom slučaju možemo izvesti

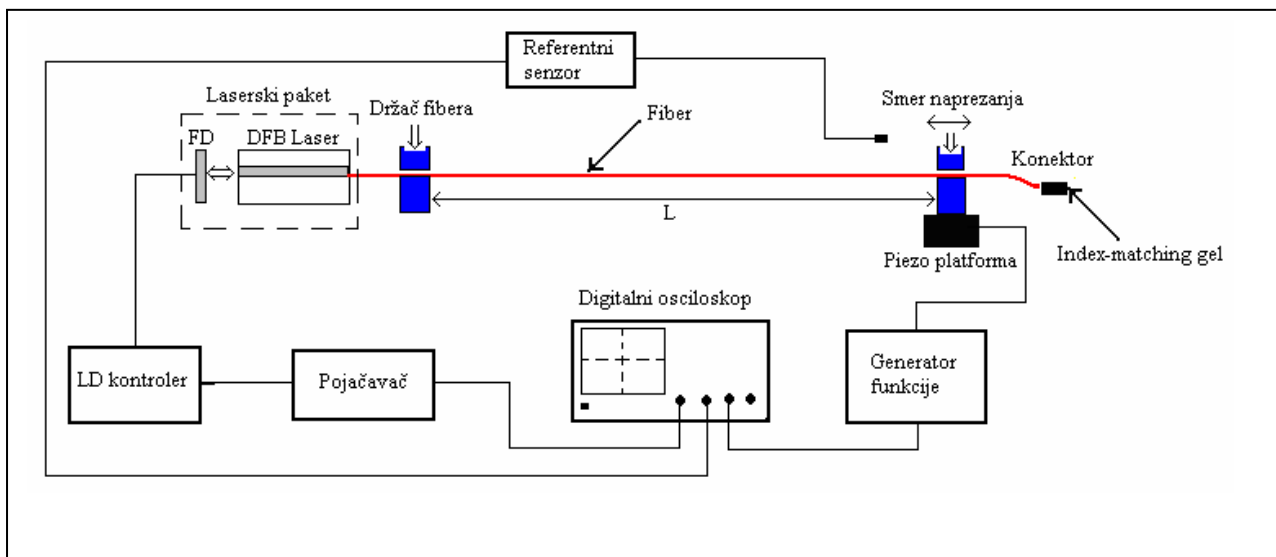
zaključak da je SM sličan konvencionalnim interferometrima sa dva zraka ali bez spoljašnjih optičkih komponenata (sočiva, ogledala, beam splitter-a). Razlika optičkih putanja od polovine talasne dužine odgovara jednoj interferentnoj pruzi, koje se ovde pojavljuju u vidu testerastih zuba signala. Na Sl. 1 je prikazan tipičan oblik fluktuacija snage laserskog zračenja, dobijen eksperimentalnim putem, pri umerenoj povratnoj sprezi za sinusoidalni napon napajanja piezoelektrične platforme. Zavisnost oblika self-mixing signala od relativnog pomeraja kraja fibera je takođe prikazana.



Sl. 1. Testerasti oblik fluktuacija snage laserskog zračenja pri self-mixing efektu.

Teoretska analiza fenomena do kojeg dolazi pri self-mixing efektu je tretirana od strane više autora [6], [7]. Ponašanje monomodne DFB (Distributed Feedback) laserske diode može se okarakterisati kroz različite režime povratne sprege. Takozvani *feedback parametar* C [4], je najvažniji parametar u ovom razmatranju jer on definiše različite režime povratne sprege:

- Režim *veoma slabe povratne sprege*, koji se javlja kada je $C \ll 1$.
- Režim *slabe povratne sprege*, pri čemu je $0.1 < C < 1$.
- Režim *umerene povratne sprege*, gde je $1 < C < 4.6$. Interferometrijski signal postaje testerastog oblika sa gotovo vertikalnim nagibima.
- Režim *jake povratne sprege*, javlja se pri $C > 4.6$. Ovo je stanje kolapsa. To je radni režim haotičnih kriptografskih sistema [8], koji nisu predmet našeg razmatranja.



Sl. 2. Eksperimentalna postavka senzora naprezanja baziranog na optičkoj feedback interferometriji

U ovom radu je predložena nova senzorska šema za merenje dinamičkog naprezanja, na bazi optičke feedback interferometrije ili self-mixing efekta u umerenom režimu povratne sprege [9]. Pri tome je korišćena jako pristupačna i relativno jeftina elektronika. Sam senzor predstavlja jedna DFB laserska dioda sa pigtailed fiberom, i fotodiodom koja je već fabrički montirana u kućište laserske diode i koja služi za monitoring self-mixing signala.

Postojeći komercijalni fiber-senzori za merenje naprezanja su najvećim delom bazirani na merenju posredstvom šifra talasne dužine svetlosti koja je reflektovana od Bragg-ove rešetke [10]-[11]. Stoga, osetljivost ovakve komponente zavisi od širine propusnog opsega fiber-Bragg-ove rešetke (FBR) i kvaliteta praatnih elektronskih uređaja. Tipična vrednost osetljivosti u komercijalno dostupnim senzorima iznosi 1 pm/ $\mu\epsilon$, pri čemu je potrebno obezbediti prilično sofisticiranu elektroniku da bismo imali rezoluciju bolju od 1 $\mu\epsilon$ (naprezanje se definiše kao odnos relativne promene dužine fibera izražene u μm i njegove dužine izražene u m; jedinica naprezanja je 1 microstrain ($\mu\epsilon$)). Druga karakteristika FBR senzora jeste što oni obezbeđuju lokalnu informaciju, pa tako postaju praktični za monitoring spojeva struktura ili u slučajevima uniformno raspoređenog naprezanja.

Za razliku od toga, SM senzor naprezanja koji je predstavljen u ovom radu, vrši merenje integrala naprezanja koje je raspoređeno duž mernog fibera i ima rezoluciju koje je ograničena samo odnosom $\lambda/(2L)$, gde je λ talasna dužina svetlosti laserske diode, a L dužina fibera.

II. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

Eksperimentalna postavka senzorskog sistema koji je baziran na SM efektu i koji je u osnovi sastavljen od pigtailed DFB laserske diode, prikazana je na Sl. 2.

Korišćeni laser je monohromatski izvor bez optičkog izolatora koji emituje na 1550 nm. Izlazna snaga lasera je 3 mW pri konstantnoj struji napajanja od 16.95 mA. Posle

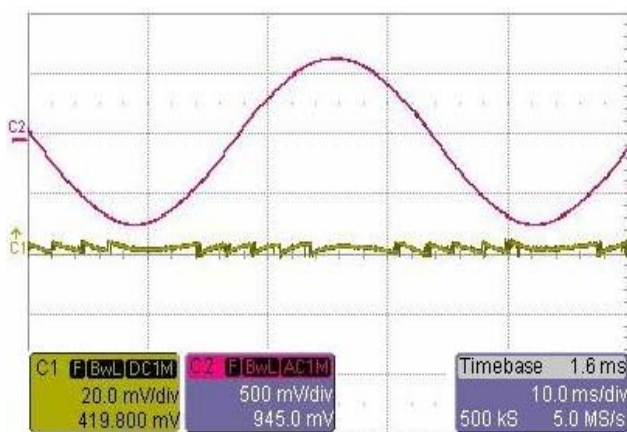
svih podešavanja i uzimajući u obzir gubitke, možemo sasvim sigurno zaključiti da se nalazimo u režimu umerene povratne sprege ($1 < C < 4.6$) koja je za nas od interesa.

Dužina fibera, koji predstavlja senzorsku glavu, je 1.5 m i na slobodnom kraju se nalazi konektor na kojem je fiber zasečen pod uglom od 8 stepeni, što je standardna procedura u optičkim telekomunikacijama radi smanjenja refleksije na konektoru. Da bismo imali dovoljno reflektovane snage za SM efekat potrebno je naneti index-matching gel na kraj konektora. Potom, fiber je učvršćen između dva držača fibera, od kojih je jedan montiran na piezoelektričnu platformu koja se napaja iz generatora funkcije. Primenjeno naprezanje je sinusoidalnog tipa sa frekvencijom u opsegu 1-150 Hz. Kao referentni senzor pomeranja korišćen je free-space interferometrijski senzor. Dinamičko naprezanje fibera rezultira u promeni optičke dužine puta, pri čemu se informacija o tome nalazi u zračenju koje je reflektovano od druge strane fibera.

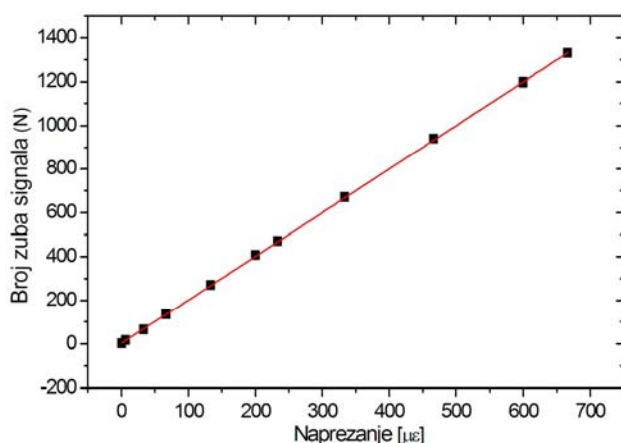
III. REZULTATI I DISKUSIJA

Na Sl. 3 je prikazan eksperimentalno dobijeni rezultat u vremenskom domenu. Kanal 1, donji dijagram, predstavlja tipičan oblik signala dobijen pomoću našeg SM senzora, dok Kanal 2, gornji dijagram, predstavlja izlazni napon generatora funkcije kojim se napaja piezoelektrična platforma. Na osnovu znaka brzih nagiba signala sa kanala 1 možemo videti da li se radi o rastućem ili opadajućem naprezanju.

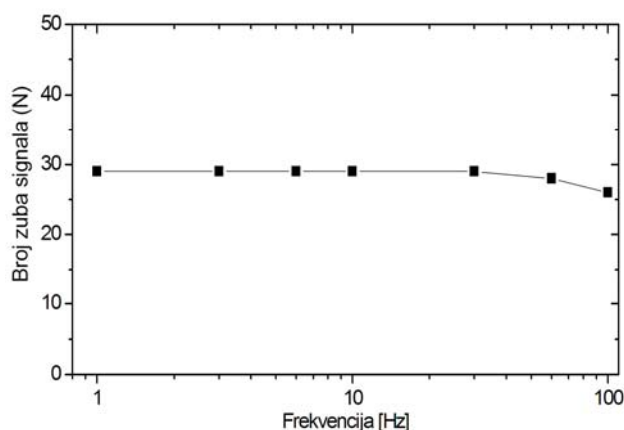
Broj zuba testerastog signala (N) u zavisnosti od primenjenog naprezanja, prikazan je na Sl. 4. Pošto jedan zub signala odgovara relativnom pomeranju kraja fibera od $\lambda/(2n)$, gde je n indeks prelamanja jezgra fibera, onda je ukupno izduženje fibera jednako $N\lambda/(2n)$. Kalibracija je vršena u odnosu na nezavisno merenje pomoću free-space senzora. Povećanjem naprezanja može se videti da je odziv senzora linearan sve do $\sim 700 \mu\epsilon$, mada sudeći po preliminarnim rezultatima ova linearnost se može povećati i do 1000 $\mu\epsilon$.



Sl. 3. Self-mixing signal dobijen pomoću SM senzora napreznja (C1), i sinusoidalni napon generatora funkcije (C2).



Sl. 4. Broj zuba self-mixing signala u funkciji od primenjenog napreznja na fiberu dužine 1.5 m.



Sl. 5. Broj zuba self-mixing signala u zavisnosti od frekvencije primenjenog napreznja pri fiksiranoj amplitudi napreznja od 35 µε.

Postignuta rezolucija sa ovakvom postavkom iznosi $\sim 0.7 \mu\epsilon$ i odgovara jednom zubu testerastog signala. Rezolucija senzora može biti znatno poboljšana upotrebom fibera veće dužine i/ili lasera kraće talasne dužine. Još jedno, možda i praktičnije rešenje, predstavlja upotreba fibera veće dužine koji je savijen dva ili više puta

tako da za isto napreznje dobijamo dva ili više puta bolju rezoluciju.

Na Sl. 5 je prikazan frekvencijski odziv senzora. U opsegu frekvencija od 1 do 80 Hz, koji je najrelevantniji za mehaničke vibracije, odziv senzora je nezavisan od frekvencije. Za nestabilnost na višim frekvencijama može se pretpostaviti da potiče od rezonance koja se javlja u piezoelektričnoj platformi i držačima fibera, ali to ostaje da se utvrdi daljim eksperimentalnim analizama.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen jedan potpuno-fiber senzor napreznja baziran na optičkoj feedback interferometriji ili self-mixing efektu. Sa gore izloženim preliminarnim eksperimentalnim rezultatima demonstrirana je mogućnost merenja napreznja jednim relativno jeftinim i jednostavnim metodom. Iz rezultata merenja moguće je videti da je amplituda merenog napreznja direktno srazmerna broju zuba testerastog signala na izlazu lasera.

U poređenju sa komercijalnim FBR senzorima napreznja, postignuta je uporediva rezolucija, korišćenjem dosta jednostavnije prateće elektronike. Da bi se uzeo u obzir šift talasne dužine koji potiče od dinamičkog napreznja kod FBR senzora, talasna dužina lasera mora biti jako dobro usklađena sa širinom opsega Bragg-ove rešetke, što predstavlja dodatnu poteškoću kod senzora tog tipa.

Sudeći po gore izloženim rezultatima predloženi senzorski sistem može biti razvijen i prilagođen za merenje veoma preciznih mehaničkih deformacija, kako različitih struktura u industriji tako i raznih konstrukcija u građevini sa veoma dobrim odnosom kvalitet/cena.

ZAHVALNICA

Autor B. Radisavljević želi da se zahvali institutu CNR-INFM Regional Laboratory LIT³, c/o Dipartimento Interateneo di Fisica "M. Merlin", via Amendola 173, 70126 Bari, Italy, gde je boravio u periodu od 10.2007.-07.2008. i odradio najveći deo svog Master rada, kao i deo ovog rada. Naročito se zahvaljuje saradniku na projektu Angela Intermite kao i rukovodiocu projekta Prof. Maurizio Dabbicco. Pored toga srdačno se zahvaljuje i Prof. Dr Vitomiru Milanoviću, koji je mentor rada, na korisnim sugestijama i pomoći pri izradi rada.

LITERATURA

- [1] L. Rindorf and O. Bang, "Sensitivity of photonic crystal fiber grating sensors: biosensing, refractive index, strain, and temperature sensing," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. 310-324, March 2008.
- [2] P. Oberson, B. Huttner, and N. Gisin, "Frequency modulation via the Doppler effect in optical fibers," *Optics Letters*, vol. 24, pp. 451-453, April 1999.
- [3] T. Bosch, N. Servagent, and S. Donati, "Optical feedback interferometry for sensing application," *Opt. Eng.*, vol. 40, 2001.
- [4] G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, and T. Bosch, "Laser diode self-mixing technique for sensing applications," *J. Opt. A.: Pure Appl. Opt.*, vol. 4, pp. 283-294, November 2002.
- [5] S. Donati, *Electro-Optical Instrumentation*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, April 2004.
- [6] D. M. Kane, *Unlocking Dynamical Diversity: Optical Feedback Effects on Semiconductor Lasers*, Wiley, May 2005.

- [7] W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "Regimes of feedback effects in 1.5- μm distributed feedback lasers", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 4, pp. 1655-1661, 1986.
- [8] S. Donati and C. Mirasso, "Introduction to the feature section on optical chaos and applications to cryptography," *IEEE J. Quantum Electron.* , vol. 38, pp. 1138-1140, September 2002.
- [9] G. Plantier, C. Bes, and T. Bosch, "Behavioral model of a self-mixing laser diode sensor," *IEEE J. Quantum Electron.* , vol. 41, pp. 1157-1167, September 2005.
- [10] H. C. Seat, Y. Wang, T. Bosch, W. Hu, X. Chen, L. Zhang, "Self-mixing-based demodulation technique for dynamic fiber Bragg grating strain sensors," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, April 24-27, 2006 Sorrento, Italy
- [11] I. C. Song, S. K. Lee, S. H. Jeong, and B. H. Lee, "Absolute strain measurements made with fiber Bragg grating sensors," *Appl. Opt.* , vol. 43, February 2004.

ABSTRACT

We present a novel self-mixing based sensor for the

detection of strain caused by rapidly stretching a standard telecommunication fiber and thus modifying the optical path of the light propagating in the fiber. It is achieved high linearity of measurements in the range 0-700 $\mu\epsilon$ with resolution of $\sim 0.7 \mu\epsilon$ in moderate feedback regime. Possibility of measuring distributed strain along one long surface is also one new achievement for the sensors of this type. Preliminary results show that this sensor has good stability with increasing frequency from 1 up to 100 Hz.

**ONE PROPOSE FOR THE FIBER-OPTICAL
STRAIN SENSOR BASED ON THE OPTICAL
FEEDBACK INTERFEROMETRY**

Branimir Radisavljević