



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

II. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2017ko maiatzaren 10, 11 eta 12
Iruñea, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Zuntz optikoan oinarritutako
sentsoreen prestazioen muga-
efektu berria, egituren egoera
monitorizatzea helburu**

*Haritz Iribas, Jon Mariñelarena
eta Alayn Loayssa*

97-102 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.ii.03.14>

ANTOLATZAILEA:



ELKARLANEAN:



LAGUNTZAILEAK:



Zuntz optikoan oinarritutako sentsoreen prestazioen muga-efektu berria, egituren egoera monitorizatzea helburu

Haritz Iribas, eta Jon Mariñelarena, eta Alayn Loayssa

Nafarroako Unibertsitate Publikoa, Arrosadiako Kanpusa z/g, 31006 Iruñea
haritz.iribas@unavarra.es

Laburpena

Brillouin denbora-eremu optikoaren analisisian (BOTDA) oinarritutako sentsoreak estruktura handien (120 km luzerako estrukturak) deformazioa eta tenperatura neurtzeko gaitasuna dute, metro bateko bereizmen espazialarekin. Lan honetan, sentsorearen merkatu-prezioa handitu gabe bereizmen espazial txikiagoa lortzeko beharrezkoa litzatekeen teknika erabiltzeak dituen efektu kaltegarriak aztertu egin dira. Izan ere, pultsu azkar bat sortzeko beharrezkoak diren Mach-Zehnder modulagailu elektrooptikoek iraungitze-ratio (ER) txikia dute. Horiek horrela, aztertu egin da pulsatutako seinalea sortzeko sorgailuak duen ERaren eragina BOTDA sentsoreen prestazioetan, akats handiak sortzen direla ondorioztatuz.

Hitz gakoak: Zuntz optikoko sentsoreak, Brillouin denbora-eremu optikoaren analisisia (BOTDA).

Abstract

Distributed Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) sensors can provide high precision distributed measurements of the strain and temperature profile over extremely large structures (structures of 120 km) with a meter spatial resolution. In this work, we present the detrimental effect that would imply the use of the necessary technique to achieve a lower spatial resolution, without increasing the price of the sensor. Since the Mach-Zehnder electro-optical modulators that are required to perform a fast pulse have a low extinction ratio (ER). Therefore, we have studied the consequences of using a pulse generator device with a low ER on BOTDA sensors, concluding that it generates large errors.

Keywords: Fiber optics sensors, Brillouin optical time domain analysis (BOTDA).

1 Sarrera eta motibazioa

Azken hamarkadetan, industria-sektore ezberdinetarako dituzten ezaugarriak direla medio, zuntz optikoan oinarrituriko sentsoreen ikerkuntzak interes handia piztu du. Sentsore mota ezberdinen artean, Brillouin efektuan oinarritzen direnak interes berezia sortu dute, luzera handiko estruktura tenperatura eta deformazioa monitorizatzen duten gaitasuna dela-eta. Horietatik, Brillouinen denbora-eremu optikoaren analisisaren (BOTDA) teknika erabiltzen dutenak erabilitakoen artean daude.

BOTDA sistema batean, aztertu nahi den estruktura ganean jarriko den zuntz optikoaren kontrako norabidean hedatzen dira bi uhin optiko, eta beraien elkar-eragintzaren ondorioz Brillouin prozesua sortzen da. Kontrako norabidean hedatzen diren uhin optiko horiek, pulsatutako-uhina (potentzia optikoa denbora laburrean baino ez du, pultsu baten forma hartuz) eta uhin-jarraia (potentzia optiko konstantea du) izenarekin ezagutzen dira. Modu honetan, uhin-jarriak pultsuarekin elkar-eragiten duen momentuan, uhin-jarraia zuntz optikoaren puntu zehatz horretako ezaugarriekin aplikatua izango da. Kontuan izanda pultsuak zuntz optiko osoan zehar uhin-jarriarekin elkar-eragiten duela, sistemaren bereizmen espaziala, hau da, zenbateko distantzia-zehaztasunarekin neurtu daitekeen, pultsuaren luzerarekin loturik dago. Adibide gisa 10 ns-ko pultsu batekin metro bateko bereizmena lortu egiten da. Horrela, zuntz optiko osoan zehar metro bakoitzeko neurketa bat eskuratu egingo da, informazio guztia aldi berean lortuz.

Beste alde batetik, azpimarratzekoa ere bada bi uhin optiko horiek maiztasun alde zehatz bat izan behar dutela beraien artean, zeina zuntz optikoaren Brillouinen desplazamendu-maiztasuna (BFS) izango den gutxi gora behera, zuntz optiko konbentzionalen 10,8 GHz ingurukoa dena. Modu honetan, uhin-jarraia aplikatua izango da maiztasun zehatz horren arabera. Bi uhin optikoen arteko maiztasun

aldea aldatuz gero (aldaketa txikiak egiten dira, 2 MHz ingurukoak), Brillouin espektroaren bestelako maiztasun bati dagokion amplifikazioa lortuko litzateke, zeina zertxobait ezberdina den aurrekoarekin alderatuta. Bi uhinetako baten maiztasuna aldatzen joanez zuntz optikoaren Brillouinen irabazi-espektroa (BGS) lortu egiten da zuntz optikoan aztertu diren puntu guztietan. Hau da, erabilitako maiztasun ezberdin bakoitzeko uhin-jarriak amplifikazio ezberdina jasoko du. Zuntz optikoan neurtutako puntu bakoitzaren BFS izango da puntu horretan amplifikazio gehien eman dion maiztasuna. Aztertua dago BFSren aldaketak lotura zuzena duela tenperatura eta deformazioaren aldaketarekin. Zehazki, MHz bateko aldaketa batek gradu zentigradu bateko aldaketa suposatzen du. Beraz, modu jarraitu batean zuntzaren BFS neurtuz edozein momentuan tenperatura aldaketa bat neurtzeko aukera dago.

BOTDA sentsoreak, bereizmen espazial txikian (metro bat) luzera handiko (120 km inguru) estrukturen deformazio eta tenperatura profilarren zehaztasun handiko neurketak emateko gai dira. Horregatik, erakargarritasun handia piztu dute zenbait industri sektoretan, hala nola, sare elektrikoaren goi-tentsioko lineen kontrolean, olio eta gas hodien monitorizazioan, trenbidearen egoeraren azterketan eta bestelako estrukturen osasunaren monitorizazioa egiten duten aplikazioetan. Testuinguru honetan, aunitz dira BOTDA sentsoreen gaitasunak zabaltzeko lanetan diharduten ikerkuntza talde eta korporazioak. Duten neurketa bereizmena hobetzen (Floch *et al.*, 2015a), sistemaren sinplifikazioa bilatzen (Iribas *et al.*, 2016) edo luzera handiagoetarako neurketak lortzeko prestatzen (Floch *et al.*, 2015b) besteak beste.

Bestalde, kontuan izanda BOTDA sistemek beharrezkoak dituzten uhin optiko ezberdinak sortzeko garestiak diren osagaiak erabiltzen dituztela, hala nola, mikrouhin sorgailuak edo erdieroale amplifikadore optikoak (SOA), sentsore hauen erabilgarritasuna zenbait industri sektoretara mugatua dago, zeinetan sentsorearen prezioa arazoa ez den. Horretaz gain, bereizmen espazial txikia izateko beharrezkoa den pulstu azkarren sorrerak sistemaren prezioa eta sinplifikazioa zailtzen du, izan ere, normalean erabiltzen diren SOAk pulstuen igoera motela aurkezten baitute. Horregatik, merkeagoak diren beste teknologiek lehiatzeko, ekonomikoki bideragarria den produktu komertziala lortzeko garrantzia handia du.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

BOTDA sentsoreen inguruan gaur egun dauden ikerkuntza-lerroak bi multzo nagusitan banandu daitezke. Sentsorearen mugak aztertu eta prestazioak hobetze aldera egiten direnak alde batetik eta sentsorearen teknikaren sinplifikazioa eta hortaz prezioaren murrizketa bilatzen dutenak bestetik.

Luzera handiko neurketak egin ahal izateko BOTDA sentsoreek duten muga nagusia seinale/zarata ratioa (SNR) da. Izan ere, fotodetektatagailuan jasoko den seinalea modu egokian neurtu ahal izateko beharrezkoa izango litzatekeen bi seinale optikoen potentzia limitatua baitago zuntz optikoan azaltzen diren efektu ez-lineal ezberdinengatik. Horrela, zuntz optikoan sar daitekeen pulstuen potentzia optikoa mugatua dago modulazio aldakortasunaren (Alem *et al.*, 2015) efektua dela medio, eta uhin-jarriarena, aldiz, mugatua dago efektu ez-lokalak (Thévenaz *et al.*, 2013) izenarekin ezagunak diren efektuengatik.

Limitazio horiek gainditu eta BOTDA sentsoreen prestazioak hobetze aldera, hainbat dira egindako ikerkuntza lanak. Hala nola, modulazio aldakortasunaren muga gailentzeko polarizazio ortogonalen pulstuen teknikan (Urricelqui *et al.*, 2015) oinarritutakoa. Efektu ez-lokalak gainditu edo arintzeko maiztasun modulatu duen uhin-jarria oinarritutako sistema (Ruiz-Lombera *et al.*, 2015). Eta baita SNR hobetzeko coding teknikak (Floch *et al.*, 2015b) erabiltzen dituzten sistemak aztertuak izan dira.

Bereizmen espaziala hobetzeak hainbat ikerketa esfortzu bereganatu izan ditu azken garaian baita ere. Izan ere, sistema ezberdinek ahalik eta neurketa tarte txikiak eskatzen dituzten bitartean, BOTDA eskema konbentzionalekin metro bateko bereizmena lor liteke gehienez. Hau hobetzeko, iraupen akustikoaren limitearen inguruko bereizmenak proposatu izan dira. Azken hau, uhin akustikoaren aurre-eszitazioak BGSren efektua gainditu dezakeenaren printzipioan oinarritzen da. Uhin akustikoaren aurre-eszitazioa hobetzeko azalpen fisiko baten garapenak, BOTDA eskema optimizatuagoa ekarri du, intentsitate pulstu optikoak erabili beharrean fase optikoaren desplazamenduaren erabilera eginik (Foleng *et al.*, 2010) edo luzera ezberdineko bi pulstuen arteko diferentziaz baliatuz (Floch *et al.*, 2015a).

Bestalde, BOTDA sistemaren sinplifikazioa eta hortaz prezioaren merkatzea bilatze aldera, hainbat dira aurkitzen ahal diren ekarpenak. DFB laser merkeak erabiliz injekzio-blokeo bidez pulstua zein uhin-jarria sortzen dituzten eskemak erabiltzea (Thevenaz *et al.*, 2004), edo seinale optiko guztiak iturri optiko bakar batez sortzean dautzatenak (Iribas *et al.*, 2016).

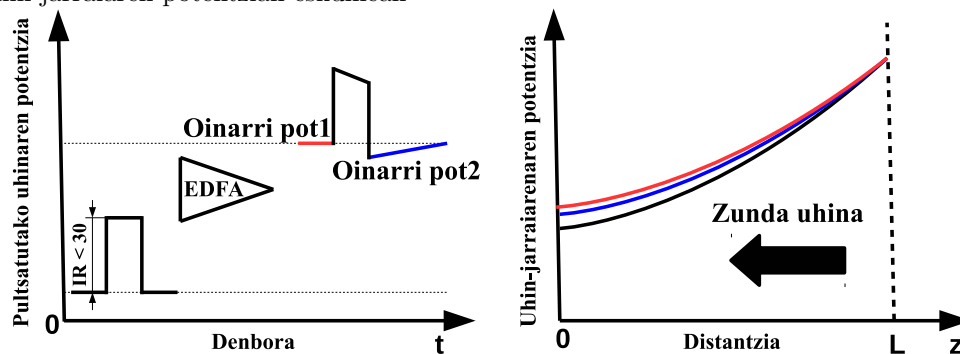
Lan honetan, orain arte aztertu ez den muga berri bat aurkeztuko da, zehazki pultsua sortzeko erabiltzen den sorgailuak daukan iraugitze-ratioak (ER) duen eragina BOTDA sentsoreen prestazioetan. Zeinak garrantzia berezia hartzen duen bereizmen espazial txikiko sistema ekonomikoak sortzerako garaian. Hauek lortzeko modurik sinple eta merkeena pulsatutako uhina Mach-Zehnder modulagailu elektrooptiko (MZ-EOM) baten bidez egitean datza-eta, zeinak ER baxua baitu SOA batekin alderatuta. Aldiz, SOA batekin bereizmen espazial txikia lortzeko ezintasun teknikoa dago, MZ-EOMarekin ez bezala.

3 Ikerketaren muina

BOTDA sentsoreetan, aipatu den bezala, bi uhin optiko kontrako norantzan hedatzen dira, jarraitua den uhin-jarraia eta pulsatuta dagoen pulsatutako-uhina. Hiru dira sistema honek lan egiteko dituen moduak, uhin-jarraia nolakoa den kontuan izanda. Uhin bakarraz osatua dagoenean sistemak irabazian edo galeran lan egin dezake (uhin-jarraiaren maiztasuna pultsuarena baino txikiagoa edo handiagoa izanik hurrenez hurren). Baina baita bi uhin-jarriak aldi berean erabiltzen dituzten sentsoreak ere badaude, zeinek BOTDA sistemak dituzten desabantail gehienak arintzen dituzten. Guztietan pultsuaren eta uhin-jarraiaren arteko elkar-eragintzatik kalkulatu egiten da puntu horretan zuntz optikoaren tenperatura zein den. Zehazki, pultsuak uhin-jarraiari emandako amplifikaziotik kalkulatu da, zeina ezberdina izango den bi uhinen maiztasun diferentziaren arabera.

Pulsatutako seinalea modu ideal batean pulsu bat baino ez litzateke izango, ordea, pultsua sortzeko erabiltzen diren sorgailu guztiek ER bat dute eta horren arabera pulsu hori jarraitua den oinarriko potentzia baten gainean izango da, 1. irudian aurkezten den bezala. SOA batek 45-50 dB-eko ER daukan bitartean, MZ-EOM batek normalean 20-30 dB artekoa izaten du. Beraz, kontuan izanda zuntz optikoan gehienez sar daitekeen pulsuaren potentzia 20 dBm ingurukoa dela, pultsua sortzeko MZ-EOM bat erabiltzea gerta liteke kasurik okerrean pultsua 0 dBm-ko potentzia duen uhin optiko baten gainean egotea. Gauzak horrela, aurretik aztertuta dagoen moduan (Zornoza *et al.*, 2010), uhin-jarriak pulsuak ematen dion amplifikazioa jasotzeaz aparte, oinarriaren potentziarena ere jasotzen du, zeinak modu jarraitu batean amplifikatuko duen uhin-jarraia. Honek neurketari arazo bat ekar diezaiokkeen arren, aztertu egin zen arazo hau konpentsatu daitekeela bukaeran jasotzen den seinaleari pulsurik gabe iristen dena kenduta. Lan honetan, lehendik aztertuta ez dagoen ER baxu batek BOTDA sentsoreen prestazioen okertzean duen eragina aztertuko da. Zehazki bi kausa direla-eta: pultsuen potentziaren hustutzeagatik suertatuko dena eta pultsua amplifikatzeko erabiltzen diren EDFA amplifikadoreek duten erantzun iragankorragatik.

1 Irudia: Azalpen teorikoa: ER baxu bateko pultsua EDFA batek amplifikatua ezkerrean eta honen eragina uhin-jarraiaren potentzian eskuinean



3.1 Oinarri teorikoak

Irabazian funtzionatzen duen sistema batean pulsuak uhin-jarraia amplifikatzen duen bezala uhin-jarriak pultsua potentziaz hustutzen du ere bai. Aztertu egin zen (Thévenaz *et al.*, 2013) pultsua %20 hustu ezkerro neurketan gradu bateko akatsa eragiten dela, eta pulsuaren hustutzea zuntz optikoaren propietateekin eta uhin-jarraiaren potentziarekin erlazionatua dagoela.

Beraz, kontuan izanda pulsatutako-uhinaren oinarri potentziak uhin-jarraia amplifikatzen duela pul-

tsuaren hustutzea areagotu egingo da. Horiek horrela ez da bakarrik kontuan hartu behariko sarrerako potentzia baizik eta zenbat aldatuko den uhin-jarraia pultsatutako-uhinaren oinarriaren eraginez. Hor-taz, honek suposatzen du zuntz optikoaren hasieran uhin-jarrai potentzia gutxiago sartzen ahalko dela, eta, beraz, sentsorearen SNR okertuko dela. 1. taulan aurkezten da erabiltzen den sistemaren arabera (irabazian, galeran edo bi uhin-jarrai dituen sistema) zenbatekoa den sar daitekeen uhin-jarrai poten-tzia ER balio ezberdinetarako, zuntz optiko estandarraren balioak erabilia ($g_B = 1.65 \times 10^{-11} m/W$, $A_{eff} = 80 \times 10^{-12} m^2$, $\alpha^{-1} = 22 \times 10^3 m$).

1 Taula: Uhin-jarrai potentzia erabilitako sistemaren eta ERren arabera.

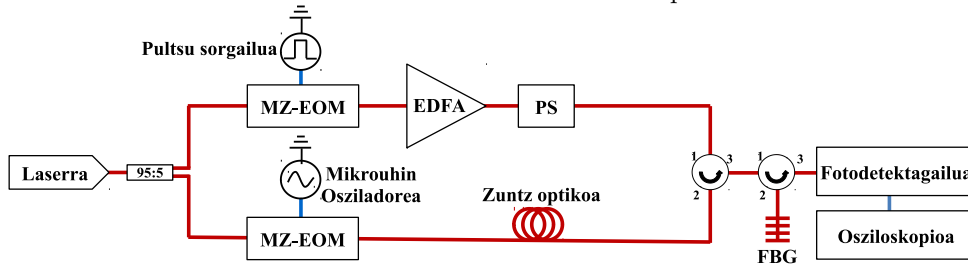
	ER= ∞	ER=30	ER=25	ER=20
Irabazian dagoen sistema	50 μW	50 μW	49 μW	43 μW
Galeran dagoen sistema	50 μW	40 μW	41 μW	43 μW
Bi uhin-jarrai sistema	616 μW	260 μW	115 μW	30 μW

Beste alde batetik, kontuan hartu beharreako ere bada 20 dBm-ko potentzia pultsua lortu ahal izateko beharrezkoa dela EDFA amplifikadore bat erabiltzea, eta EDFA guztiek erantzun iragankor bat aurkezten dutela pultsuak amplifikatzerako garaian (Sun *et al.*, 1997). Gauzak horrela, 1. irudian aurkezten den mo-duan, EDFAREN eragina dela medio pultsuaren aurretik dagoen pulsatutako-uhinaren oinarri potentzia eta pultsua eta gero dagoena ezberdinak izango dira. Potentzia ezberdintasun honek amplifikazio ezber-dina emango dio uhin-jarraiari, eta, beraz, jasoko den Brillouin traza desitxuratua azalduko da. Honek sentsoreak duen zehastasunean eragingo du erabiltzen den EDFAREN arabera akats ezberdina sortuz.

3.2 Emaizta esperimentalak

Azalduko efektuek BOTDA sentsore batean duten eragina aztertu ahal izateko, 2. irudian aurkezten den eskema esperimentalala muntatu egin zen. Iturri optiko moduan 1559.6 nm-ko DFB laser bat erabili zen, zeinaren irteera, beharrezkoak diren bi uhin optikoak sortzeko, hargune anitzeko fotoakoplagailu baten bidez bitan banatu zen. Goiko bidetik, pulsatutako-uhina sortzeko 20-30 dB-eko ER duen MZ-EOM bat erabili zen, zeina pultsu sorgailu baten seinalearekin gidatua zegoen. Behin pulsatua izan beharrezkoa den 20 dBm-ko potentzia pultsua izateko seinalea amplifikatua izan zen EDFA bat erabiliz. Pulsatutako-uhina azterketarako erabili zen 25 km-ko zuntz optikora iritsi aurretik polarizazio scrambler (PS) baten bidez ausazko balioa eman zitzaion, polarizazio aldaketak sor ditzakeen seinalearen gorabeherak ekidin aldera.

2 Irudia: BOTDA sentsorearen eskema esperimentalala

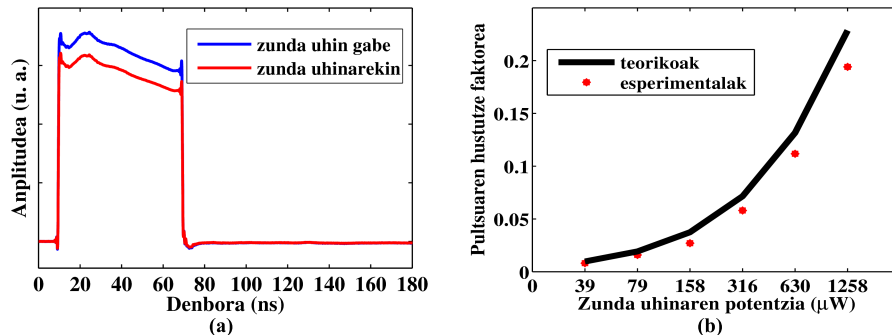


Beheko aldetik, beste MZ-EOM bat erabili zen uhin-jarraia sortzeko, zeina mirouhin sorgailu baten bidez modulagailua BFS mazitasunaren inguruan modulatuaz lortu zen. Bi uhin-jarrai sistema erabili zenez, modulaziotik ateratako bi alboko bandak erabili ziren, baina irabazian zein galeran lan egiten duen sistema erabiltzeko aski litzateke bi bandetako bat iragaztearekin. Horren ostean, eta zuntz optikoa sartu aurretik, atenuadore optiko aldakor bat erabili zen uhin-jarraiaren potentzia kontrolatzeko. Bukatzeko, uhin-jarraia banda estuko iragazki (FBG) baten bidez iragazia izan zen 125 MHz-ko fotodetektagailu baten bidez detektatuta izan aurretik. Zehazki galerako uhin-jarraia iragazia izan zen irabaziko sistema aztertu ahal izateko.

ERk zer nolako eragina duen pulsuaren potentzia hustutzean aztertzeko, bai ERren balioa zein uhin-jarraiaren potentzia aldatuz neurketa ezberdinak egin ziren, 60 ns-ko eta 20 dBm-ko potentzia

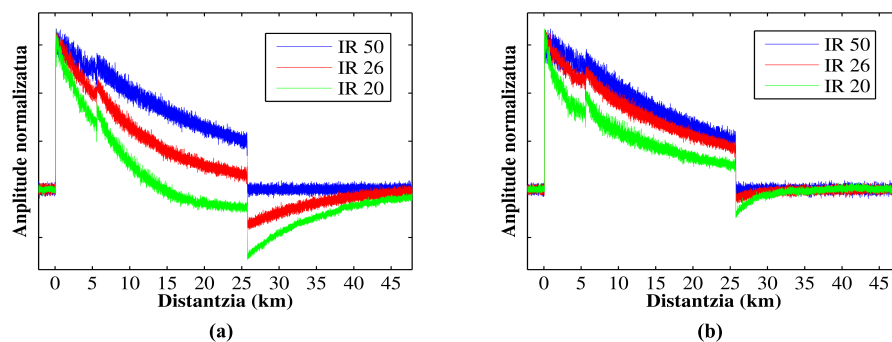
pultsua mantenduz. Pultsuaren hustutzea neurtzeko, zuntzaren irteeran pultsuak beste fotodetektagailu batekin jaso ziren, zehazki 11 GHz-ko fotodetektagailu batekin, eta gero hustutze ehunekoak kalkulatu zen. 3. irudiaren (a) atalean bi pultsu erakusten dira, uhin-jarririk gabe iritsiko zen pultsua (hau da, soilik zuntzaren atenuazioa jasango zuena) eta ER 25 baliorako eta uhin-jarraia -13 dBm-ko potentzia duenaren pultsua. Argiki ikus daiteke pultsuak jasandako potentzia galera, zeina kalkulaturik %10ekoa den. 3. irudiaren (b) atalean, aldiz, ER 25 baliorako pultsuak jasaten duen hustutze faktorea erakusten da uhin-jarrai potentzia ezberdinentzako, zeinak kalkulaturiko balio teorikoekin (zuntzaren $g_B = 0.63 \times 10^{-11} m/W$ balioa) nahikoa parekotasuna aurkezten duten. Emaitza aldea teorikoki zuntz optikoaren BFSa lautzat hartu izanaren eta benetako zuntzek horrelakorik ez izatean argudiatu daiteke.

3 Irudia: (a) Jasotako pultsua hustutzerik gabe eta ER 25eko balioak ematen dion hustutzearekin eta (b) ER 25rentzako hustutze faktorea uhin-jarraiaren potentziaren arabera.



Bukatzeko, EDFaren eragina aztertu ahal izateko, bi EDFA ezberdin erabili ziren ER ezberdinentzako uhin-jarrai potentzia berdina mantenduz (-18.5 dBm). 60 ns-ko eta 20 dBm-ko potentzia zeun pultsua erabili zen oraingoan ere eta ER altua izateko 50 dB-eko ER duen SOA bat erabili zen (zeina erreferentziatzko balioz har daitekeen). 4. irudian ER ezberdinak erabilia jasotako BOTDA trazak erakusten dira, (a) atalean 2 etapako EDFA bat erabiliz eta (b) atalean, ordea, 3 etapako EDFA batekoak erakusten dira. Lortutako traza ezberdinetan argiki ikusten da ER txikitzen joan ahala handiagoa dela trazaren deformazioa. Eta baita EDFA bakoitzak eragin ezberdina duela ere. Deformazio honek egindako neurketan zer nolako akatsa sortzen duen aztertzeko zuntzaren azken 20 metroak ganbera klimatiko batean sartu eta laborategiko tenperatura baino $10^\circ C$ gehiagoko tenperaturan jarri ziren lehenengo EDFarentzako. ER 20ko kasuan neurtzerik ezin zen (13. km-tik aurrera ezin baitzen neurtu) eta ER 26-ko kasuan $7^\circ C$ -koa zen sortutako akatsa.

4 Irudia: BOTDA trazak ER balio ezberdinetarako: (a) bi etapako EDFA erabiliz eta (b) 3 etapakoa.



4 Ondorioak

BOTDA sentsoreetan pultsatutako-uhinaren oinarri potentziak duen eragina aztertu egin da lehendabiziko aldiz, eta ikusi ahal izan da pultsuaren potentzia hustiapena azkartzen dela, hortaz, mugatu egiten

dela zuntz optikora sar daitekeen uhin-jarraiaren potentzia. Horrekin batera, EDFAk duten erantzun iragankorra dela-eta zer nolako eragina duen aztertu egin da. Ikusi da kalkulaturako trazetan eragin handia duela, ER zenbat eta txikiagoa izanda orduan eta akats handiagoa sortuz. Bukatzeko, tenperatura azterketa batean zer nolako akatsa sortzen den aztertu egin da ondorioztatuz EDFA bakoitzaren arabera eta ERren arabera akatsa handiagoa bilakatzen dela, zenbait kasutan neurketa egitea ezinezkoa bilakatuz.

5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Behin pulsatutako uhinaren ERk dakartzan mugak aztertuta, hurrengo urratsa muga hau gainditzeko teknika ezberdinen azterketa izango da. BOTDA sentsoreen bereizmen espaziala hobetzeko moduekin batera sentsorearen prezioa murrizteko aukera gauzatu. Horrela, BOTDA sentsoreek gaur egun sarbidea ez duten eremu eta aplikazio industrialetara iritsi ahal izateko. Lehenengo urratsa, aurkeztutako mugaren modelo teorikoa egitea izango da, egoera ezberdinetan sentsorearen errendimenduan izango duen eragina egoki aztertu ahal izateko. Hori eginda, hurrengo urratsa pulsatutako-uhinaren oinarri potentziaren eragina lehunduko duten teknika ezberdinak aztertzea izango da.

Erreferentziak

- ALEM, M., M. A. SOTO, eta L. THÉVENAZ. 2015. Analytical model and experimental verification of the critical power for modulation instability in optical fibers. *Optics Express* 23.29514–29532.
- FLOCH, S. L., Z. YANG, F. SAUSER, M. A. SOTO, eta L. THÉVENAZ. 2015a. Differential chirped-pulse pair for sub-meter spatial resolution Brillouin distributed fiber sensing. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9634.
- FLOCH, SÉBASTIEN LE, FLORIAN SAUSER, MIGUEL LLERA, eta ETIENNE ROCHAT. 2015b. Novel Brillouin Optical Time-Domain Analyzer for Extreme Sensing Range Using High-Power Flat Frequency-Coded Pump Pulses. *J. Lightwave Technol.* 33.2623–2627.
- FOALENG, S. M., M. TUR, J. BEUGNOT, eta L. THÉVENAZ. 2010. High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes. *Journal of Lightwave Technology* 28.2993–3003.
- IRIBAS, H., J. URRICELQUI, J. MARINÉLARENA, M. SAGUES, eta A. LOAYSSA. 2016. Cost-Effective Brillouin Optical Time-Domain Analysis Sensor Using a Single Optical Source and Passive Optical Filtering. *Journal of Sensors* 2016.
- RUIZ-LOMBERA, R., J. URRICELQUI, M. SAGUES, J. MIRAPEIX, J. M. LÓPEZ-HIGUERA, eta A. LOAYSSA. 2015. Overcoming Nonlocal Effects and Brillouin Threshold Limitations in Brillouin Optical Time-Domain Sensors. *IEEE Photonics Journal* 7.
- SUN, Y., J. L. ZYSKIND, eta A. K. SRIVASTAVA. 1997. Average inversion level, modeling, and physics of Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 3.991–1007.
- THEVENAZ, L., S. LE FLOCH, D. ALASIA, eta J. TROGER. 2004. Novel schemes for optical signal generation using laser injection locking with application to Brillouin sensing. *Measurement Science and Technology* 15.1519–1524.
- THÉVENAZ, L., S. F. MAFANG, eta J. LIN. 2013. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system. *Optics Express* 21.14017–14035.
- URRICELQUI, J., M. ALEM, M. SAGUES, L. THÉVENAZ, A. LOAYSSA, eta M. A. SOTO. 2015. Mitigation of modulation instability in Brillouin distributed fiber sensors by using orthogonal polarization pulses. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9634.
- ZORNOZA, A., D. OLIER, M. SAGUES, eta A. LOAYSSA. 2010. Brillouin distributed sensor using RF shaping of pump pulses. *Measurement Science and Technology* 21.

6 Eskerrak eta oharrak

Lan honen egileek eskerrak eman nahi dizkiete Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari (TEC2013-47264-C2-2-R proiektuaren bitartez), EEGF funtsei eta Nafarroako Unibertsitate Publikoari emandako laguntza ekonomikoengatik.