



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

I. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2015eko maiatzaren 13, 14 eta 15
Durango, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

Egituren egoeraren monitorizazio-
rako zuntz optikoan oinarritutako
sentsore sinplifikatua,

*H. Iribas, M. Sagues,
J. Mariñelarena eta A. Loayssa*

475-480 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.i.65>

ANTOLATZAILEA:



udako
euskal unibertsitatea

BABESLEAK:



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



BFA
DFB
Bizkaiko Foru Aldundia
Diputación Foral de Bizkaia

eman ta zabal zazu



UPV EHU

LAGUNTZAILEAK:



Universidad de Deusto
Deustuko Unibertsitatea



MONDRAGON
UNIBERTSITATEA



UDALBILTZA



upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

Egituren egoeraren monitorizaziorako zuntz optikoan oinarritutako sentsore sinplifikatua

Iribas H., Sagues M., Mariñelarena J., Loayssa A.

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

Laburpena

Brillouin hedatuko denbora eremu optikoaren analisisian (BOTDA) oinarritutako sentsoreak, estruktura handien (100 km luzerako estrukturak) deformazioa eta tenperatura neurtzeko gaitasuna dute. Lan honetan, BOTDA konfigurazio sinplifikatua aurkezten dugu. Erabilitako konfigurazioaren helburua sentsorearen prezioa murriztea da, detekzio prozesuan parte hartzen duten seinale optikoen sortze prozesua sinplifikatuz. Proposatutako teknika hau, iturri optiko bati irrati-maiztasun (IM) pultsu modulatu bat aplikatuz sortutako osagai espektralaren iragazketa optiko pasiboan oinarritzen da. Laborategiko esperimientuek frogatzen dute tenperatura hedatuko neurriak 1,1 metroko erresoluzioarekin 5 km zuntz optikoan zehar.

Hitz gakoak: Zuntz optikoko sentsoreak, Brillouin hedatuko 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 100 km). In this work, we present a simplified configuration for BOTDA sensors. The aim of this configuration is to reduce the cost of the sensor by simplifying the generation of the optical waves involved in the sensing process. The proposed technique is based on passive optical filtering of the spectral components generated in an RF-pulse-modulated optical source. Proof of concept experiments demonstrate distributed temperature measurement with 1.1 m resolution over a 5 km sensing fiber.

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

1. Sarrera eta motibazioa

Azken bi hamarkadetan, zuntz optikoan oinarrituriko sentsoreen artean Brillouin efektuan oinarritzen direnak interes handia sortu dute, tenperatura eta deformazioa monitorizatzeko duten gaitasuna dela-eta. Hauetatik, erabilitakoenen artean Brillouinen denbora eremua optikoaren analisiaren (BOTDA) teknika erabiltzen dutenak daude.

BOTDA sistema batean, neurtu nahi den zuntz optikoan kontrako norabidean hedatzen dira bi uhin, Brillouin hedatuko prozesua sortuz. Kontrako norabidean hedatzen diren uhin hauek, ponpaketa pultsu bat eta Stokes uhina, zuntz optikoaren Brillouinen desplazamendu-maiztasunaren (BFS) balioa duen maiztasun aldea izan behar dute. Modu honetan, Stokes uhina pultsuarekin elkar eragiten duen momentuan, zuntz optikoaren puntu horretako ezaugarriekin anplifikatua izango da Stokes uhina, eta baita uhin akustiko bat sortu ere. Bi uhin hauen arteko maiztasun aldea aldatuz gero, Brillouin espektroaren bestelako maiztasun bati dagokion anplifikazioa lortuko litzateke. Modu honetan, bi uhinetako baten maitasuna aldatzen joanez, zuntz optikoaren Brillouinen espektroa lortu egiten da. Anplifikazio honen eta Brillouinen espektroaren gehienezko desplazamenduaren balioek lotura dutelarik zuntz optikoaren puntu horretako tenperatura eta deformazioarekin.

BOTDA sentsoreak, luzera handiko estrukturaen deformazio eta tenperatura profilaren zehaztapen handiko neurketak emateko gai dira. Honek, erakargarritasun handia duelarik zenbait industri sektoreetan, hala nola, olio eta gas hodiaren monitorizazioan, trenbidearen egoeraren azterketan eta bestelako estrukturaen osasunaren monitorizazioa egiten duten aplikazioetan. Testuinguru honetan, hainbat ikerkuntza talde eta korporazio, BOTDA sentsoreen gaitasunak zabaltzeko lanetan dihardute.

Duten neurketa erresoluzioa hobetzen (Li, W. et al., 2008), luzera handiagoetarako neurketak lortzeko prestatzen (Angulo Vinuesa et al., 2012) edo neurketa egiteak daraman denbora murrizten (Urricelqui et al., 2012).

Bestalde, teknika honek beharrezkoak dituen uhin optiko ezberdinak sortzeko, BOTDA sistema gehienek garestiak diren osagaiak erabiltzen dituzte, hala nola, hainbat modulagailu elektrooptiko, mikrouhin sorgailu edo erdiekoale anplifikadore optikoak. Honek, sentsore hauen erabilgarritasuna zenbait industri sektoreetara mugatzen du, zeinetan sentsorearen prezioa arazoa ez den. Hori dela eta, ikerkuntza lerro bat irekia dago sentsore hauen sinplifikazioa bilatzeko. Merkeagoak diren beste teknologiek lehiatzeko, tenperatura neurtzeko erabiltzen diren Raman sentsoreak adibidez, ekonomikoki bideragarriak izango diren produktu komertzialak lortze aldera.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Bi dira nagusiki BOTDA sentsoreen inguruan gaur egun dauden ikerkuntza lerroak. Sentsoreen prestazioak hobetze aldera egiten direnak alde batetik eta sentsoreen teknikaren sinplifikazioa bilatzen dutenak bestetik.

BOTDA sentsoreen prestazioak hobetze aldera hainbat dira ikertzen ari diren alderdiak. Alde batetik, hainbat sistemek horrela behar dutelako, tenperatura eta deformazioa aldi berean neurtzen duten sistemak bilatze aldera egindako ikerketak daude. Modurik errazena bi zuntz optiko erabiltzea litzateke, nahiz eta honek zentzua bakarrik izan dezakeen estruktura laburretan (20 km baino txikiagoak), bestela sentsorearen prezioa asko handituko baitzen. Beste sistema batzuk modu-anitz akustikoak dituzten zuntz optikoak erabiltzean oinarritzen dira (Lee et al., 2001), edo errefringentzia bikoitzeko zuntz optikoa erabiltzean (Zou et al., 2009).

Erresoluzio espaziala hobetzeak hainbat ikerketa esfortzu bereganatu izan ditu azken garaian baita ere. Sistema ezberdinek ahalik eta neurketa tarte txikienak eskatzen dituzte, aldiz, BOTDA eskema konbentzionalekin metro bateko erresoluzioa lor liteke gehienez. Hau hobetzeko, iraupen akustikoaren limitearen inguruko erresoluzioak proposatu izan dira. Azken hau, uhin akustikoaren aurre-eszitazioak Brillouinen irabazi espektroaren (BGS) efektua gaintitu dezakeenaren printzipioan oinarritzean delarik (Bao et al., 1999). Uhin akustikoaren aurre-eszitazioa hobetzeko azalpen fisiko baten garapenak, BOTDA eskema optimizatuagoa ekarri du, intentsitate pulsu optikoak erabili beharrean fase optikoaren desplazamenduaren erabilera eginik (Foaleng et al., 2010).

BOTDA sistemaren sinplifikazioa eta hortaz beren prezioaren merkatzea bilatze aldera, hainbat dira aurkitzen ahal diren ekarpenak. Brillouinen oinarritutako zuntz optikozko laserrak erabiliz ponpaketa bidez Stokes uhina lortzea (Lecoudeche et al., 1998), DFB laser merkeak erabiliz injekzio-blokeo bidez ponpaketa pultsua zein Stokes uhina sortzen dituzten eskemak erabiltzea (Thévenaz et al., 2004), offset blokeoaren erabilera (Li, Y. et al., 2008) edo laser baten zuzeneko modulazioaren bidez sortutako ponpa-zundaren denbora zatiketa (Song et al., 2010).

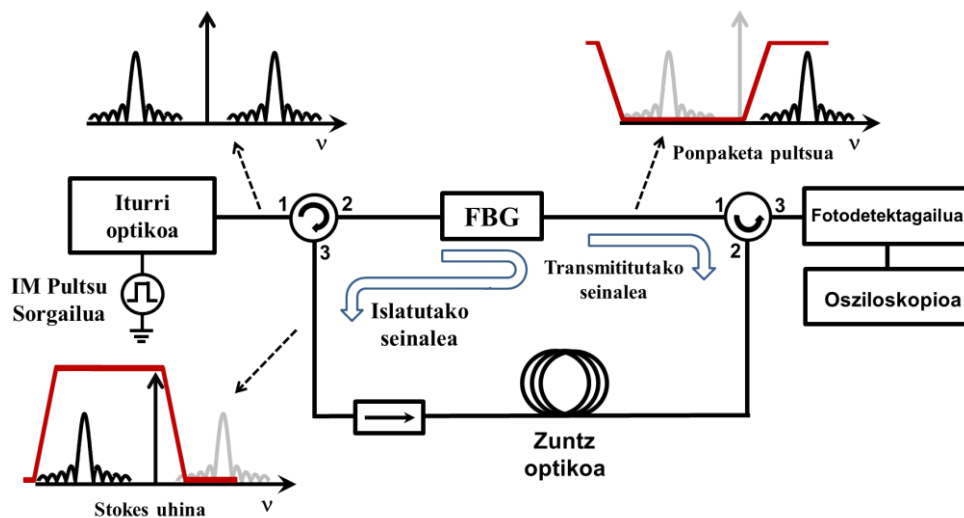
Lan honetan, sinplifikatuagoa den eta hortaz prezio murriztuagoa duen BOTDA sentsore eskema alternatibo bat aurkeztuko dugu, sisteman beharrezkoak diren uhin optiko guztiak iturri optiko berdinarekin sortuz. Horretarako, pulsatuta dagoen modulaturiko alboko banda baten osagai espektralaren iragazketa optiko pasibo egingo delarik.

3. Ikerketaren muina

Proposatutako sentsorearen oinarri teorikoa 1. irudian aurkezten da. Lehenengo urratsa seinale jarraituaz eta pulsatutako bi banda modulatuaz osatutako seinale optikoa sortzea izango da, zeina iturri optikoan zuzenean sortua izango den. Modu honetan, Stokes uhina zein pulsatutako ponpaketa uhina, modulaturiko seinalean sortuak izango dira: maiztasun eramailea Stokes uhina izango da eta pulsatutako bandetako bat ponpaketa uhina izango delarik. Hori lortu ahal izateko, jatorrizko seinaleari iragazketa pasibo simplea aplikatuz lortuko da, behean azalduko den moduan. IM-pulsatutako banda bikoitzeko seinale optikoa, zirkuladore baten bidez konfigurazioaren goiko bidetik

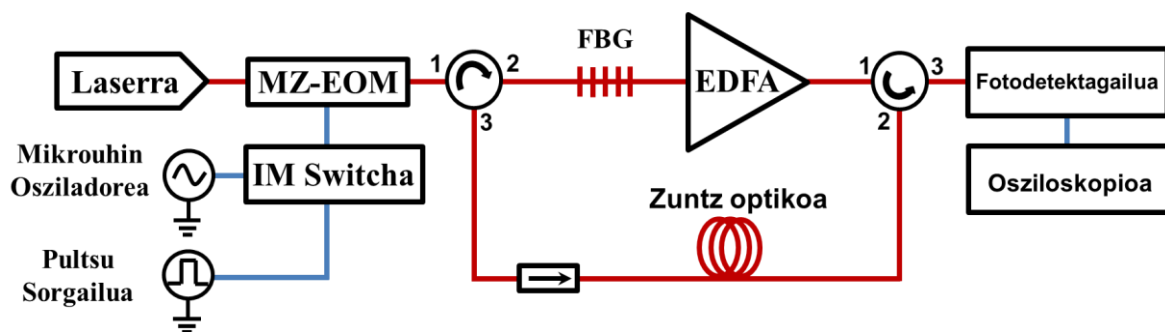
bideratua izango da. Bertan, seinaleak transmisio moduan jarria dagoen FBG batekin topo egingo du, zeina sintonizaturik egongo den modulaturako seinalearen pulsatutako goiko banda pasatzen uzteko moduan. Ondorioz, bai beste banda zein eramailea islatuak izango dira zirkuladorera itzuliz, zeinak zuntz optikora bideratuko dituen. Aldi berean, beste zirkuladore baten bidez, goiko bidetik transmititzen ari den pulsatutako banda zuntz optikoaren beste aldetik sartu egingo da. Modu honetan, Brillouin elkarrekintza suertatzeko beharrezkoak diren norabide kontrako bi seinaleak zuntz optikoan transmitituak izango direlarik. Modulazio maiztasuna aukeratua izango da zuntz optikoaren Brillouin desplazamendu-maiztasunetik gertu egon dadin, pultsuak seinale garraiatzaile optikoan Brillouin anplifikazioa sor dezan. Honen ostean, ondoriozko Stokes uhina fotodetektagailu baten bidez jasoa izango da eta lortutako seinale elektrikoa osziloskopio baten bidez jasoa izango da. Bukatzeko, neurketa hau hainbatetan errepikatua izango da modulazio maiztasuna saltoka aldatuz, zuntz optikoaren Brillouinen irabazi espektra eraikiz.

1. irudia. Proposatutako BOTDA sentsorearen eskema teorikoa



Azaldutako teknikaren aukerak aztertu ahal izateko, 2. irudian aurkezten den eskema esperimental muntatu egin zen. Integratutako elektro-absortzio modulagailua (EAM) duen DFB laserrik laborategian ez zegoenez, IM-pulsatutako modulazio optikoa sortzeko, kanpo modulagailu baten bidez egin zen. Zehazki, 1559.6 nm-ko laser bat Mach-Zehnder modulagailu elektrooptikoarekin (MZ-EOM) modulaturik izan zen pulsatutako mikrouhin baten bidez. Hau, mikrouhin sorgailu baten irteeran, pulsu sorgailu bat eta mikrouhin switch bat jarri lortuz. Bide honetan, pulsatutako IM seinalearen itxura zuzenean igarotzen delarik eremu optikora modulagailuaren bidez. Gainera, gaur egun, mikrouhin switchak gai dira erantzun azkarreko eta isolamendu handiko erantzunak emateko (ns 1 baino gutxiagokoak). Modu honetan, merkeak eta azkarrak diren pulsu optikoak lortzen ahal direlarik (Zornoza et al., 2010).

2. irudia. BOTDA sentsorearen eskema esperimental

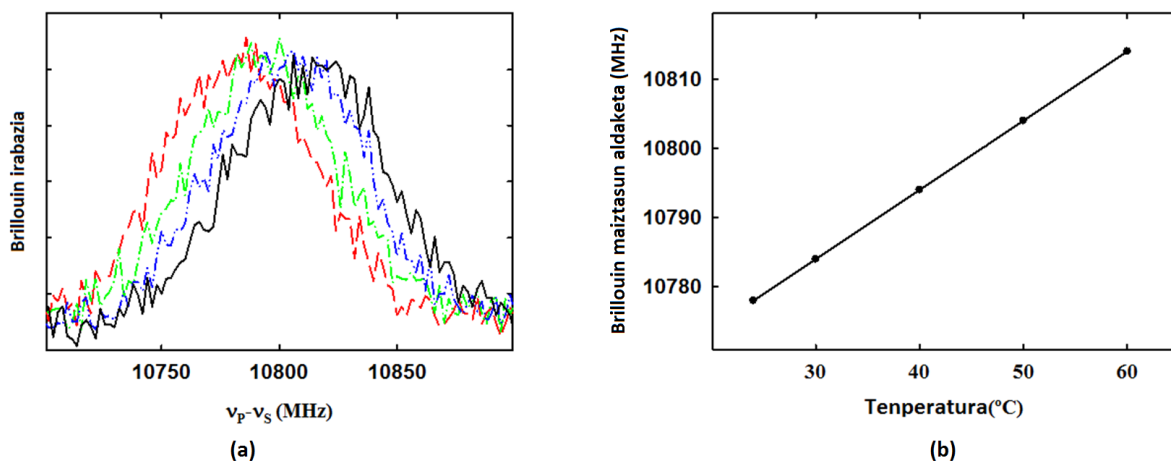


Lortutako seinale modulatuak eskemaren goiko bidetik bideratua izango da, non banda estuko FBG baten bidez iragazia izango den. Irabazian lan egiten duen BOTDA sentsorea lortu ahal izateko, FBGa sintonizatua izango da pulsatutako modulazioaren goiko banda pasatzen uzteko eta aldiz seinalearen beste banda eta Stokes uhinak islatuak izango dira. Galeran lan egiten duen BOTDA sistema ere sortzen ahalko litzateke, horretarako FBGa modulazioaren azpiko banda pasatzen uzteko moduan sintonizatzearekin. Horren ostean, pulsatutako uhina amplifikatua izango da EDFA bat erabiliz, estimulatutako Brillouin dispersioaren (SBS) efektua zuntz optikoan agertzen den mailara arte. Pulsatutako ponpaketa azterketarako erabiliko den zuntz optikora iritsi aurretik, polarizazio scrambler baten bidez ausazko balioa ematen zaio, polarizazio aldaketak sor ditzakeen seinalearen gorabeherak ekidin aldera. Bukatzeko, Stokes uhina 125 MHz-ko fotodetektagailu baten bidez detektatuta izango da.

Sistemaren funtzionamendua aztertze aldera, temperatura neurketak egin ziren modu bakarreko 5 km-ko zuntz optiko estandar batean. Pulsuaren luzera 11 ns-tan ezarri zen, zeinak gutxi gora behera 1,1 m-ko erresoluzioarekin bat egiten duen, eta 1024 batezbesteko egin ziren osziloskopioan. Zuntz optikoaren azken 20 m-ak ganbera klimatiko batean sartu ziren, beste guztia gelako temperaturan mantendu zen bitartean. Modulazio maiztasuna 2 MHz-ko saltoekin ezarria izan zen.

Ganbera klimatikoaren temperatura aldatzen joan zen teknikaren temperatura neurketen zehaztasuna aztertu ahal izateko. Berotutako zuntz optikoaren zatian lortutako espektroak, 3. irudiaren (a) atalean ikusi ahal dira. Ikus daitekeen moduan, neurtutako espektroek temperaturak gora egin ahala maiztasun aldaketa dutelarik. Horretaz gain, neurtutako anplitude espektroen BFSa lortze aldera, Lorentziano-Gaussiano profil baten bidezko doikuntza matematikoa egin zen. Hau, 3. irudiaren (b) atalean azaltzen da, non ikus daitekeen moduan, BFS bidez lortutako erregresio linealak argiki erlazio lineala aurkezten duen temperaturarekin. Gainera, zehaztasun handia dago ganbera klimatikoan emandako temperatura aldaketan (10 °C-ko aldaketak) eta neurtutako espektroen maiztasun aldaketaren artean.

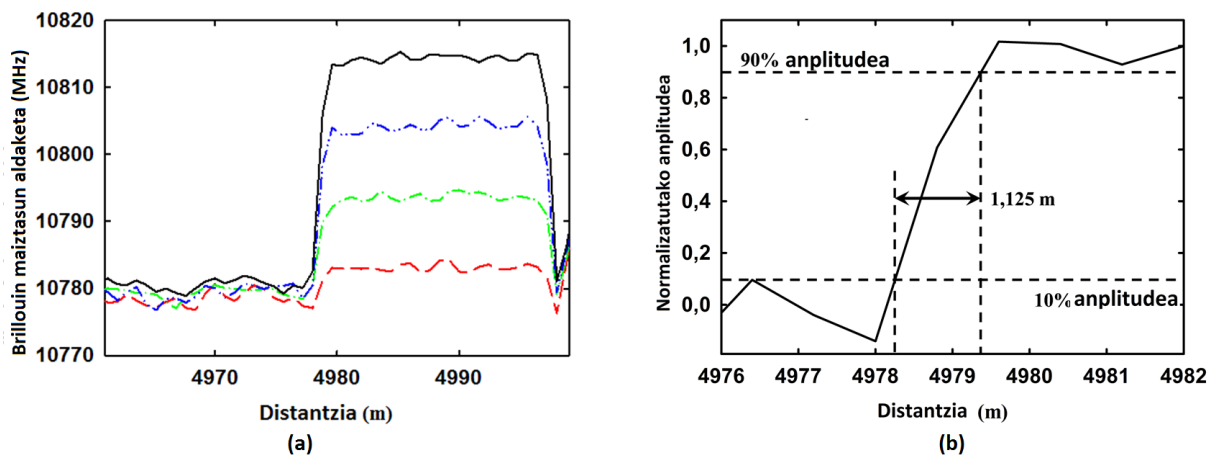
3. irudia. (a) Berotutako zuntz optikoaren puntu batean lortutako espektroak, 10 °C-ko temperatura saltoekin. (b) Neurtutako maiztasunen eta temperaturaren arteko erlazioa



Bukatzeko, sentsorearen baliabideak aztertu ziren hedatutako neurketentzako. 4. irudiko (a) atalean, zuntz optikaren azken zatian temperatura aldaketak ematen direnean neurtutako Brillouin maiztasunaren aldaketak neurtzen dira. Berotutako 20 m-ko zuntz optikoaren zatia argi ikusi daiteke eta baita ematen den bat-bateko aldaketa berotutako zatiaren eta bestelako zuntz optikoaren artean. Temperatura ezberdinean aurkitzen diren zuntz optikoko alboko bi zatiren arteko igoera denbora neurtuz, 1,125 m-ko erresoluzioa duen sistema bat dela konfirmatua geratu zen. Azken hau, 4. irudiaren (b) atalean erakusten da, non kalkulatu den berotutako zuntzaren eta berotu gabekoaren arteko igoera denbora metroetan.

Bestalde, osziloskopioan jasotako BOTDA seinaleak, Stokes uhinarekin batera doan modulaturako azpiko bandaren eragina jasoko du. Zehazki, pulsatutako seinale honek zuntz optikoaren erdiko zatian egiten diren neurketen baloreak baliogabetuko ditu. Edonola ere, sistemaren muga hau hainbat moduz konpondu daiteke. Modurik errazena, hau gertatuko dela alde aurretik jakinik, monitorizatuko den estrukturan jarriko den zuntz optikoaren neurketen balioak galduko diren zatian zuntz optiko zati gehigarri bat jartzea litzateke. Beste aukera bat, isolagailuaren aurretik zuntz optikoa jartzea litzateke eskemaren beheko aldean, zeinak Stokes uhinaren atzerapena sortuko duen, eta horrela pulsu hau BOTDA seinale osoa fotodetektagailuan detektatu ostean iritsiko litzatekeelarik. Arazo honentzako beste irtenbide bat banda bakarrek modulagailu optikoa erabiltzea litzateke, banda bikoitzekoa erabili beharrean.

4. irudia. (a) Berotutako zuntz optiko zatian neurtutako maiztasun aldaketak, 10 °C-ko temperatura saltoekin. (b) Sistemaren erresoluzioa



4. Ondorioak

Brillouin hedatuko sentsoreetarako konfigurazio sinplifikatua proposatu eta frogatu egin da. Sentsorea, IM pulsu bidez modulaturako seinale baten osagai espektralen iragazketa optiko pasibo batean oinarritu egiten da. Honek, sentsorea osatzeko beharrezkoak diren osagaien kantitatea eta prezioa murriztu egiten ditu, bukaera prezioa merkatuz. Teknika honen gaitasuna frogatua izan da 5 km-ko zuntz optiko batean zehar zehaztasun eta erresoluzio handiarekin egindako tenperatura neurketen bidez. BOTDA sentsoreek gaur egun sarbidea ez duten aplikazio eta industrietan aurkitu ahal izateko, beren errendimendua hobetzeko ikerkuntzaz gain, konfigurazioa sinplifikatu beharko litzateke.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Aurkeztutako lanean egin bezala, hurrengo urratsak BOTDA sentsoreen sinplifikazioa bilatuko duten eta hortaz prezioa murriztuko duten bidean joango dira. Horrela, BOTDA sentsoreek gaur egun sarbidea ez duten eremu eta aplikazio industrialetara iritsi ahal izateko. Lehenengo urratsa, sistema hau bera distantzia handiagoetan neurtzea izango da, sistemaren ahalmenak egokiago neurtu ahal izateko. Hori eginda, hurrengo urratsa Mach-Zehnder modulagailu elektrooptikoa laser bat modulatzeko erabili beharrean, BOTDA sistema hau integratutako EAM modulagailua duen DFB laser batekin gauzatzea litzateke, zeinak kontuan hartzeko prezioaren merkatzea ekarriko duen.

6. Erreferentziak

Angulo Vinuesa, X. Martin, S. Corredera, P. eta Gonzalez Herraiez, M. (2012), "Raman assisted Brillouin optical time domain analysis with sub meter resolution over 100 km", *Optics Express*, 20, 12147-12154.

- Bao, X. Brown, A. DeMerchant, M. eta Smith, J. (1999), "Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (10-ns) pulses", *Optics Letters*, 24, 510–512.
- Foaleng, S. M. Tur, M. Beugnot, J. C. eta Thévenaz, L. (2010), "High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes", *Journal of Lightwave Technology*, 28, 2993–3003.
- Lecoeuche, V. Webb, D. J. Pannell, C. N. eta Jackson, D. A. (1998), "Brillouin based distributed fibre sensor incorporating a mode-locked Brillouin fibre ring laser", *Optics Communications*, 152, 263–8.
- Lee, C. Chiang, P. W. eta Chi, S. (2001), "Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift", *IEEE Photonics Technology Letters*, 13, 1094–1096.
- Li, W. Bao, X. Li, Y. eta Chen, L. (2008), "Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing", *Optics Express*, 16, 21616–21625.
- Li, Y. Bao, X. Ravet, F. eta Ponomarev, E. (2008), "Distributed Brillouin sensor system based on offset locking of two distributed feedback lasers", *Applied Optics.*, 47, 99–102.
- Song, K. eta Yang, S. (2010), "Simplified Brillouin optical time-domain sensor based on direct modulation of a laser diode", *Optics Express*, 18, 24012-24018.
- Thévenaz, L. Le Floch, S. Alasia, D. eta Troger, J. (2004) "Novel schemes for optical signal generation using laser injection locking with application to Brillouin sensing", *Measurement Science and Technology*, 15, 1519–24.
- Urricelqui, J. Zornoza, A. Sagues, M. eta Loayssa, A. (2012), "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation", *Optics Express*, 20, 26942-26949.
- Zornoza, A. Olier, D. Sagues, M. eta Loayssa, A. (2010), "Brillouin distributed sensor using RF shaping of pump pulses", *Measurement Science and Technology*, 21, 094021.
- Zou, W. He, Z. eta Hotate, K. (2009), "Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber", *Optics Express*, 17, 1248–1255.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan honen egileek eskerrak eman nahi dizkiete Espainiako Zientzia eta Berrikuntza Ministerioari (TEC2010-20224-C02-01 proiektuaren bitartez) zein Nafarroako Unibertsitate Publikoari emandako laguntza ekonomikoengatik.