



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Sintonizazio-teknika berri baten
ezarpena in-line sistemetan
parametro fisikoak neurtzeko
MCF-en bidez**

*Danel Bargiela Mengod,
Josu Amorebieta Herrero eta
Gaizka Durana Apaolaza*

259-265 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.32>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



Sintonizazio-teknika berri baten ezarpena in-line sistemetan parametro fisiko neurtzeko MCF-en bidez

Danel Bargiela Mengod ⁽¹⁾, Josu Amorebieta Herrero ⁽²⁾ eta Gaizka Durana Apaolaza ⁽¹⁾

(1) *Komunikazioen Ingeniaritza Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU,
Torres Quevedo Ingeniaria Plaza 1, 48013 Bilbao*

(2) *Matematika Aplikatua Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Torres
Quevedo Ingeniaria Plaza 1, 48013 Bilbao*

danel.bargiela@ehu.eus

Laburpena

Artikulu honetan, izaera ezberdineko zuntz optiko sentsoreetarako galdeketa-sistema berri baten diseinua, karakterizazioa eta fabrikazioa zehazten dira. Lorpena urrats berri bat da zuntz optiko sentsore askoen ezaugarriaz baliatzeko, fabrikazio prozesu sinple batekin parametro fisikoen neurketarako sentsore aproposen diseinua ahalbidetzen duena. Fabrikazio-sinpletasun horrek, nukleo anitzeko zuntz optiko horien sentsibilitate handikoarekin batera, ezin hobeak bihurtzen ditu hainbat aplikazio teknologiko aurreratuertarako. Esperimentu honetan, laborategiko oinarritzko konfigurazioa erabiltzen da aurkeztutako kontzeptuaren bideragarritasuna frogatzeko. Horretarako, bi zuntz optiko sentsore-mota erabiltzen dira. Lehenengoa, FBG komertziala eta bigarrena, MCF zuntz sentsore bat, laborategian bereziki diseinatua.

Hitz gakoak: multiplexazioa, in-line, FBG, MCF.

Abstract

In this paper, the design, characterization and fabrication of a new optical interrogation system setup for fiber sensors of different nature is detailed. The achievement is a new step ahead in order to benefit from these type of fiber sensing characteristics, which permit with a simple fabrication process the design of ad-hoc sensors for physical parameter measurements. This fabrication simplicity, together with the high-sensitivity of these fibers, makes them ideal for several advanced technological applications. In this experiment, a basic laboratory setup is used to demonstrate the viability of the presented concept. For this purpose, two types of fiber sensors are used. First, a commercial FBG and second, an MCF fiber sensor, specifically designed in the laboratory.

Keywords: multiplexing, in-line, FBG, MCF.

1. Sarrera eta motibazioa

Gaur egun, zuntz optikoaren sentsoreen ospea gero eta handiagoa da, haien moldakortasun eta fidagarritasuna direla eta. Adibidez, interferentzia elektromagnetikoa dagoen inguruneetan, zuntz optikoetan oinarritutako sentsoreak dira bideragarriak eta, askotan, alternatiba bakarra. Gainera, zuntz optikoak denbora errealean monitorizatzeko aukera ematen dute, sentsore bezala erabiltzen diren aplikazioetan. Bestalde, zuntz optiko baten tentsioa edo okerdura detektatu daiteke zuntz Bragg sareekin (FBG), metodo interferometrikoekin edo intentsitate aldatetekin (Villatoro et. al., 2018).

Horiek, normalki, puntu anitzeko sentsorizazioan erabili ohi dira, zeina banakako zenbait sentsore modu erraz eta anitzeko galdeketa datza, bere bereizmen espaziala ondoko sentsoreen artean hautemateko ahalmenarekin lotuta dagoena. Sentsore-kopuru horiek elkarbanatzeko bi teknika daude: time-division multiplexing eta wave-division multiplexing (Chung et. al., 2005). Horiek, sentsorizazio-sistema bati dagozkion kanpoko parametroak aldatuz, nahi den sentsoreari galdeketa egitea ahalbidetzen dute.

Bestetik, nukleo anitzeko zuntzetan oinarritutako sentsoreek FBG-ak –industrian gehien erabiltzen diren sentsore optikoak, hain zuzen- baino sentsibilitate handiagoa erakusten dute (Grattan et. al., 2000; Villatoro, 2017b). Horregatik, nukleo anitzeko zuntzetan oinarritutako sentsore bat diseinatuko da, sentsore komertzialekin alderatuko daitekeena eta datozen ataletan eztabaidatuko da ea bibrazio-sentsore gisa proposatu daitekeen, bigarren sentsore komertzial horrekin batera neurketa sistema bat sortzeko, haien arteko errendimendua behin alderatura.

Galdera honi erantzutea motibazio printzipala izango litzateke: “Mota ezberdineko sentsoreetan, haien arteko interferentzia eta haien neurtzeko ahalmena nola elkar jotzen du, barrunbe optiko bat sortuz eta TDM eta WDM teknikak erabilia haien neurtzeko ahalmena azterketa kuantitatibo baten bidez aztertu ondoren?”

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak (Azpiatalak eta zerrendak)

FBG-tan oinarritutako sentsoreak oso erabiliak izan dira material konposatuetan zenbait parametro fisiko hautemateko. Gainera, zuntz optiko sentsoreen abantaila gehigarri bat eremu elektromagnetikoekiko duten immunitatea eta multiplexatzeko gaitasunak dira, besteak beste (Grattan et. al., 2000). Azken lan batzuetan (Villatoro et. al., 2016) gailu-kontzeptu berri bat aurkeztu da nukleo anitzeko zuntz optikoak erabiliz, errendimendu bikaina duena, eta horrek oso erakargarriak egiten ditu parametro fisiko-mekanikoak neurtzeko, hala nola, bibrazioak edo tentsio mekanikoa.

Bibrazio-sentsoreek aplikazio ugari eta askotarikoak dituzte, eta horrez gain, zuntz optiko bibrazio sentsoreekiko interesa nabarmen hazi da azken urteotan. Esaterako, lurrikarak edo erupzio bolkanikoak kontrolatzeko, baita azpiegitura zibilak ere (eraikinak, zubiak, etab.), maiztasun baxuak neurtzen dituzten bibrazio-sentsoreak beharrezkoak direlako, makinaren osasun-egoera monitorizatzeko maiztasun ertain edo altuen erantzuten duten bibrazio-sentsoreekin batera (Villatoro et. al., 2017). Bestetik, FBG bibrazio-sentsoreen desabantaila nagusia sistema osoaren kostua da, sentsore-mota horiekin neurketak egiteko pikometro-ebazpen-sistemak behar baitira. Hori horrela bada ere, gaur egun, FBG errendimendu handiko tentsio-sentsoreetan aplikatzen den teknologia optikorik nabarmenena da (Mihailov, 2012).

Beste alde batetik, tentsio puntuala neurtzen duten sentsoreak sinpleagoak dira eta kokapen zehatzetan tentsioaren monitorizazioa erraztu dezakete. Gainera, nukleo anitzeko zuntzez (multi-core fiber, MCF, ingelesez) egindako sentsore bat bibrazioekiko oso sentikorra da, daukan supermoduen funtzionamendu printzipioa oso sentikorra baita tolestura-angelu txikiekiko (Villatoro et. al., 2016) eta kontrolatzeko erabil daitezkeen gailu sinple eta trinkoak garatzeko aukera berriak ere eskaintzen dituztelako, beste parametro batzuen artean. Besteak beste, MCF sentsoreen ezaugarri erakargarri batzuk moldakortasun, galdeketa-erraztasuna eta sentikortasuna dira (Amorebieta et. al., 2022), esaterako, FBG-ekin alderatzen badira. (Arrizabalaga, et. al., 2020).

Bestalde, FBG multzo batzuk erabilia, bi galdeketa-teknika berriak erabili dira sentsore horien aldaketak neurtzeko eta bereizteko: “time- eta wave- division multiplexing (TDM, WDM)”, ingelesez; sentsore optikoko galdeketa-sistema bakun bat sortu eta gero. Horretan, barrunbe optiko bat erabili zen, haren barruan programatu zitekeen pultso-sorgailu bat erabiliz (Chung et.al., 2005). Horrela, bi kontzeptu berri horiek, uhin-luzera eta denborazatiketa-multiplexazioa, erraz konbina daitezke frogatu da, banaka galdekatu daitezkeen sentsore-elementuen kopurua handitzeko (Amorebieta et. al., 2022).

3. Ikerketaren muina

3.1 Ikerketaren emaitza

Esperimentu honen bidez, nukleo anitzeko zuntzetan oinarritutako sentsoreen balioak neurtzeko balio duen galdeketa-metodo bat proposatzen da, bere derrigorrezko egiaztapen eta balidazio atalekin. Honen bidez, bi mota ezberdineko sentsoreak erabili dira parametro fisiko berbera neurtzeko –eremu eta modu kontrolatu batean artifizialki sortutako bibrazioak-, haien arteko interferentzia-maila (edo “crosstalk”, ingelesez) oso txikia lortuz. Honekin, aurreko ataletan aipatutako MCF sentsoreak modu errazean eta izaera ezberdineko beste sentsoreekin konbinatuta erabiltzeko gaitasuna frogatu da.

3.2 Zergatik lortu nahi zen hori?

Arloko egoeraren atalean aipatu den bezala, multi-core sentsoreak aprobetxatzea da gako handiena. Batzuk (Amorebieta et. al., 2022), mota honetako bi sentsore paraleloan jarri dituzte, eta haien arteko interferentziak eta sentsibilitatea neurtu dituzte, arrakastarekin. Hala ere, sentsore horiek segidan jartzea aurrerapen nabarmena izango litzateke, haien arteko interferentzia eta sentsibilitatea oraindik neurtu ez delako. Horrek, nahi adina sentsore segidan kokatzeko ahalmena emango luke; eta hortaz, egitura baten nahi adina puntu kritiko ezberdin neurtzeko ahalmena ere.

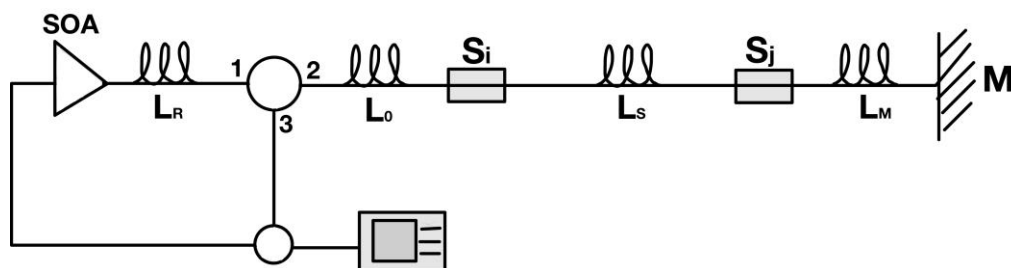
Horretarako, izaera ezberdineko sentsoreak zuntz optiko beso berean konbinatzeko aukera aztertu da. Proposatutako galdeketa-sistemarekin, bi sentsore-mota ezberdin erabili daitezkeela frogatu nahi izan da, laborategian nahi bezala diseinatu daitezkeen sentsore aproposak eraikitako sistema barruan ezartzeko atea irekiko lukeena.

3.3 Nola egin zen?

3.3.1.- Erabilitako elementuen konfigurazioa

Horretarako, zuntz optikoz osatutako “sigma” barrunbe (Chung et. al., 2005) bat erabili zen (1. irudia). “Sigma” izena bere disposizioarengatik erabili oi da, non barrunbe edo eraztun erako baten barruan dagoen elementu optiko guztiak – argi-igorgailu bezala erabili den SOA, adibidez- zirkulatzaile optiko baten bidez konektatuta dauden kanpoko zuntz-optiko beso batera (L_0 , L_S , L_M). Beso horretan, sentsoreak kokatzen dira (S_i , S_j), bata bestetik metro gutxi batetara, gero eraztun barruko beste elementu batzuekin haien gainean gertatutako fenomeno fisikoak neurtzeko.

1. irudia. Erabilitako galdeketa-sistemaren setup-a.



Horiek horrela, bi era daude barrunbe horren propietateak interpretatzeko, galdeketa-motaren arabera, lehen aipatutako: “time-division multiplexing” (TDM) edo “wave-division multiplexing” (WDM).

Azkena sinpleena da, sentsoreak haien gailur espektralaren uhin-luzeraren arabera bereizteko gai izatean baitatza. Lehengoa, aldiz, konplexuagoa da. SOA-k sentsore pare

batek (irudikatutako sistemaren zuntz optiko besoaren MCF eta FBG, kasu) kokatuta dauden barrunbean joan-etorriko denboren pareko periodoak dituzten pultsuak sortzen dituenean, sentsore konkretu horrek amplifikatu egingo da SOAtik pasatzen den bakoitzean. Ondorioz, pulso maiztasun horrek barrunbean zehar birzirkulatuko ditu bat datozen pulsoak, beste momentu batean iritsitako pulsoak xurgatzen diren bitartean, 1. formula jarraituz (non c/n , L_R eta L_i , argiaren abiadura zuntz optikoaren barruan, sistemaren barrunbearen luzera eta sentsore batek barrunbe horretatik dagoen distantzia dira, hurrenez hurren):

$$f_R = \frac{c}{n*(L_R+2*L_i)} \quad (1)$$

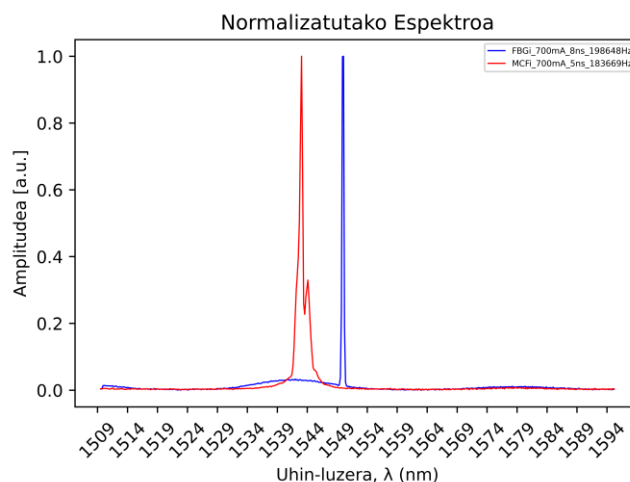
Gainera, sentsore bakoitza bere erresonantzia-maiztasunarekin soilik zuzentzen denez, espektro antzekoak dituzten sentsoreak erabil daitezke ere luzera ezberdinetan kokatuz gero (Chung et. al., 2005). Hau da, espektroarekiko gailur antzekoak dituzten sentsoreetan oinarritutako gailuak erabiltzea eta multiplexatzea ahalbidetzen du galdeketa-leiho berean, nahastezin eta banan-banan identifikatzen baitira bakoitzaren f_R bereziaren medio. Hots, sentsoreen posizioak ezagutzen dira edo zehaztasunez zehaztu daitezke pulsu-sorgailuarekin (SOA) erresonantzia edo pulsu-maiztasunak identifikatuz.

Bestalde, sentsorea perturbazio baten eraginpean dagoenean, -hala nola, bibrazioa-, bere erresonantzia-maiztasuna ez da aldatzen. Kasu horretan, bere espektroko gailurraren uhin-luzera perturbazioaren arabera aldatzen denez (anplitudea aldatuz edo uhin-luzeraren desplazamendu baten bidez), perturbazioarekin erlazionatu daiteke; eta hortaz, aipatutako bibrazioak neurtzeko erabil daiteke. Galdeketa-sistema honek, gainera, zuntz-sentsoretan agertutako efektu fisikoak areagotzen ditu, sortutako erresonantzia-barrunbeei esker.

3.3.2.- Esperimentua

Esperimentu honetan erabilitako bi sentsoreak 2. irudian erakusten dira, bere erresonantzia-maiztasuna SOA-n ezarri ondoren. Ikusten den bezala, laborategian fabrikatutako sentsorea (MCF, gorriz) sentsore komertzialen antza du (FBG, urdinez).

2. irudia. Sentsore komertziala (urdina) eta laborategian ekoizitakoa (gorria).



Honekin, ahalik eta baldintza antzekoenak sortu nahi izan dira gero esperimentuaren emaitzak interpretatzeko. Bestalde, esperimentuari dagokionez, bi sentsoreek (2. irudia) bibrazioak jasan dituzte eragingailu piezoelektriko baten gainean jarri ondoren. Eragingailu honek programagarria denez, esperimentu honetan behar ziren maiztasun ugari sortzea eskaini zuen. Honela, sentsoreen antolamenduari dagokionez, batek bibrazioak jasan ditu bestea geldirik zegoen bitartean, eta alderantziz.

Esaterako, FBG-a eragingailu piezoelektrikoaren gainean jarri denean, bibrazio-anplitude eta maiztasun sorta zabala jasan ditu (hala nola, 0.1 Hz-tik 100 kHz-ra), laborategian fabrikatutako MCF sentsorea ukitu gabe geratu den bitartean.

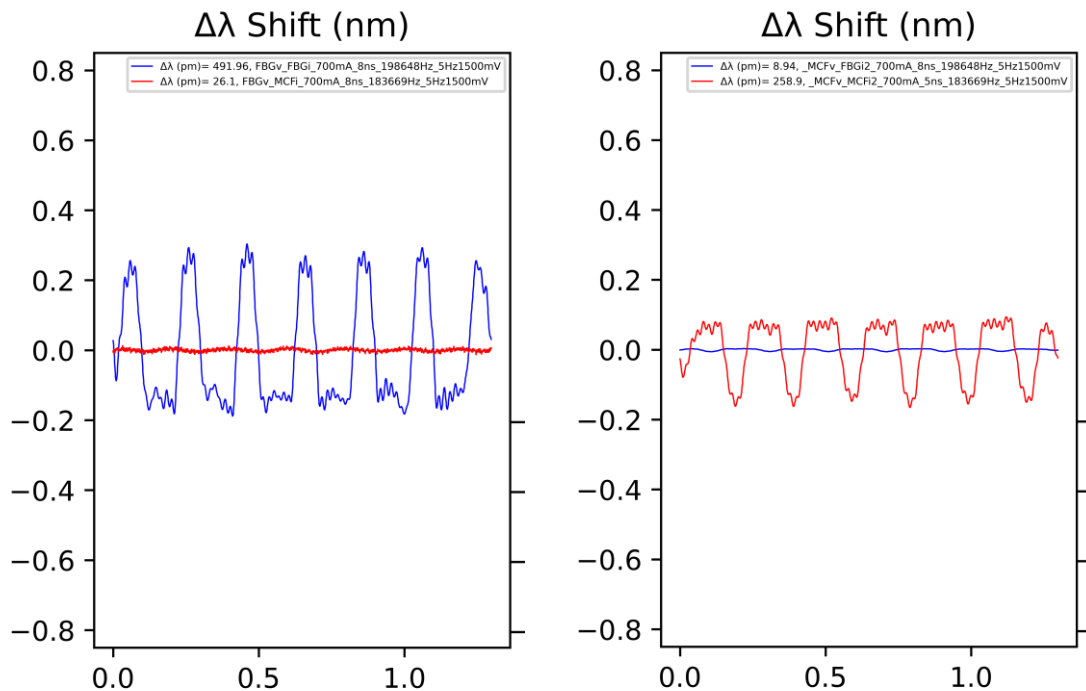
Aurretik, barrunbearen distantzia fisiko osoei dagozkien bi maiztasunak identifikatuta zeuden -1. formula erabiliz- sentsore bakoitzerako. Horri esker, sistemaren puntu anitzeko galdeketa egin da, barrunbeko pultsuen maiztasuna aldatuz (TDM teknika), galdekatu beharreko bi sentsoreen distantziaren arabera.

Ondoren, eragingailu piezoelektrikoari ekin zaio eta bi sentsoreak txandaka galdekatu dira, bibrazioak sigma barrunbearen besoa (1. irudia) eragiten dioten eragin nabaria aztertuz.

3.4.- Emaitzak eta analisisia

Erakusten den adibidean (3. irudia, a eta b) maiztasun berdineko bibrazio sinusoidalak izatean (5 Hz, adibide honetan) neurtutako aldaketak erakusten dira. 3.a. irudian, hain zuzen, FBG-a (urdina) eragingailua piezoelektrikoaren gainean jarri eta MCF (gorriz) inaktibo uztearen emaitzak erakusten dira, eta 3.b. irudian, aldiz, MCF-k (gorriz) bibrazioak jasaten ditu, FBG-a (urdina) inaktibo dagoen bitartean. 1. taulan, gainera, bi sentsoreek aldi berean bibrazioak jasan zituztenean neurtutako aldaketak ere erakusten dira.

3. irudia. (A, eskerrean) FBG (sentsore komertziala, urdina) bibrazioak jasaterakoan eta MCF (laborategian ekoiztitakoa, gorria) idle estatuan egotean lortutako sentsoreen seinalea. (B, eskuinaldean) MCF (laborategian ekoiztitakoa, gorria) bibrazioak jasaterakoan eta FBG (sentsore komertziala, urdina) idle estatuan egotean lortutako sentsoreen seinalea.



3. irudietan eta 1. taulan ikusten denez, bi sentsoreen arteko “crosstalk” arbuigarria da, batz besteko -14 dB-koa delako. Emaitza horiek lortzeko, neurtutako bibrazioetatik lortutako uhin-luzeraren aldaketak erabili dira. Esan beharra dago, hemen aurkeztzen den metodoaren bideragarritasuna baieztatzeko, -5 dB-ko baino balio txikiagoa lortu beharko litzatekela, SNR (Signal-to-Noise Ratio) x3-ren baliokidea. Irizpide horrek, telekomunikazioetan maiz erabiltzen den kontzeptua da, neurtutako zaratatik neurtu

beharreko seinalea antzemateko, azken hori sistemako gainerako nahi ez diren seinaleek sortzen dutelako.

1.taula. Esperimentuaren emaitzak

CrossTalk	Shift balioak (pikometro-tan)		
5Hzv	MCFi	FBGi	CrTk (dB)
FBGv, MCF	26	492	-12,8
MCFv, FBG	259	9	-14,6
FBGv, MCFv	107	94	-

Horrela, bi sentsoreek bibrazioak zehaztasun handiz detektatu eta neurtu dituztela bereizi da, horien arteko “crosstalk” neurketetan eragin handirik ez duela baieztatuz. Gainera, azpiatal bezala, bi sentsoreak bibrazio berean gainean jarri zirenean (1.taularen azkenengo lerroa), haiek neurtutako bibrazio anplitudea parekoa dela frogatu zen ($\pm\%$ 10-ko aldea gehienez, neurtu ziren kasu guztietan).

4. Ondorioak

Proposatutako galdeketa-sistemaren bideragarritasuna frogatu da, estimulu fisiko berbera jasan duten funtzionamendu printzipio ezberdineko sentsore optikoak erabiltzen. Gainera, usatu diren sentsoreak luzera ezberdinetan banatzen badira, horietako bakoitzak erresonantzia-maiztasun bakarra izango du eta nahastezina den identifikazioa ahalbidetuko du.

Erabilitako sintonizazio-maiztasunaren arabera, sentsore bat edo bestea antzemateko gaitasuna dago, biak zuntz-optiko beso berean egon arren eta haien arteko “crosstalk” apur bat existitu arren.

Doikuntza zuzenarekin, bibrazioen antzeko interpretazio bat lor daiteke sentsore bakoitzaren bidez, laborategian sortutako estimulu beraren aurrean. Gainera, zuntz optiko beso berean MCF sentsore bat beste izaera ezberdineko sentsore batekin galdeketa egin den lehen aldia izan da, FBG batekin, kasu. Kontzeptu hori frogatu ahal izateak etorkizunean bestelako parametro fisiko neurtzeko aukerak zabaltzen ditu. Bestalde, MCF sentsoreek ez dute histeresia erakusten, beraz, egokiak dira azkar aldatzen diren parametro fisikoak neurtzeko.

Gainera, fabrikatzeko erraztasun eta parámetro fisiko horiek hautemateko moldagarritasun eta sentsibilitate handiak etorkizunerako alternatiba aproposa eta interesgarria bilakatzen dute. Honezkerok, hemen jakinarazitako galdeketa-metodoa egokia da eremu kontrolatu batean sortutako maiztasun baxuko bibrazioak monitorizatzeko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honen erronketako bat sisteman jasandako galerak minimizatzeko eta eskura dagoen potentzia optikoa optimizatzeko gaitasuna da, etorkizunean sentsore kopuru handiagoa jarri ahal izateko. Gainera, hainbat parametro fisiko -hala nola, presioa, tenperatura, bibrazioak, etab.- zehazki neurtzeko aukera dagoenez, behin laborategian diseinu apropos bat egin ondoren, haien ikerkuntza ahalbidetuko luke. Dena den, ikerketa sakonagoak egin beharko lirateke etorkizunean bide horretatik jotzeko.

Barrunbe barruko elementuen konfigurazioei dagokienez –SOA, zirkuladorea, ispilua, etab.-, konfigurazio optimo batek sistemaren errendimendu osoa hobe dezakeela esan beharra dago, sentsoreak are sentikorrako bihurtzeko eta interferentziak minimizatzeko.

Bestalde, esan beharra dago lehenengo hurbilketa honetan, zuntz optikoz osaturiko besoaren amaieran ispilu bat erabili dela galerak gutxitzen saiatzeko. Baliagarritasun handia izan arren, etorkizuneko asmoa horri gabe sistema oso bat egitea izango litzateke. Azkenik, aurreko zenbait erreferentziatan ikus daitekeenez, (Amorebieta et. al., 2022, adibidez), lortutako seinaleak aztertzeko eta horietatik informazio gehiago atera ahal izateko, FFT erabiltzen da maiz, eta beraz, etorkizunean egiteko geratzen da.

6. Erreferentziak

- Amorebieta, J., Pereira, J., Durana, G. et al. (2022) Twin-core fiber sensor integrated in laser cavity. *Sci Rep* 12, 11797. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16103-8>
- Arrizabalaga, O. et al. (2020). High-performance vector bending and orientation distinguishing curvature sensor based on asymmetric coupled multi-core fibre. *Sci. Rep.* 10, 14058. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70999-8>
- Chung, W. H., Hwa-Yaw, T., Wai, P. K. A. & Khandelwal A. (2005). Time- and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 17, 2709–2711. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.859484> (2005).
- Grattan, Kenneth & Sun, Tong. (2000). Fiber Optic Sensor Technology: An Overview. *Sensors and Actuators A-physical - SENSOR ACTUATOR A-PHYS.* 82. 40-61. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00368-4](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00368-4)
- Mihailov S. J. (2012). Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors* (Basel, Switzerland), 12(2), 1898–1918. <https://doi.org/10.3390/s120201898>
- Villatoro, J., Van Newkirk, A., Antonio-Lopez, E., Zubia, J., Schülzgen, A. and Amezcua-Correa, R.(2016). Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber, *Opt. Lett.* 41, 832-835 <https://doi.org/10.1364/OL.41.000832>
- Villatoro, J., Antonio-Lopez, E., Schülzgen, A and Amezcua-Correa, R. (2017) Miniature multicore optical fiber vibration sensor, *Opt. Lett.* 42, 2022-2025 <https://doi.org/10.1364/OL.42.002022>
- Villatoro, J., Arrizabalaga, O., Durana, G. et al. (2017). Accurate strain sensing based on super-mode interference in strongly coupled multi-core optical fibres. *Sci Rep* 7, 4451 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04902-3>
- Villatoro, J., Arrizabalaga, O, Diez, M., Arrospide, E., Antonio-Lopez, E., Zubia, J., Schülzgen, A., and Amezcua-Correa, R. (2018) Simple Multi-core Optical Fiber Accelerometer, *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF)*, *OSA Technical Digest (online)* (Optica Publishing Group, 2018), <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2018.SeW3E.4>