

(Research Article)

Design and fabrication of Fabry-Perot fiber optic sensor with FMCW phase extraction method for acoustic detection implementation

J. Khalilpour^{*1}, S.A. Hosseini Moradi², I. Zarezadeh³

Khatam Al-Anbia Air Defense University

Received: 2022/02/08, Accepted: 2022/12/28

Abstract

The sensors used to detect acoustic waves were included only electrical and magnetic methods before. But today, more advanced technologies such as micro-electromechanical sensors and fiber optics have been studied to design sensors. In this paper, we are intended to introduce a new sensor based on fiber optic technology, designed and built for implementation in sonars for tracking drones. Among the various types of fiber optic sensors, phase interferometers, especially Fabry-Perot, are the most sensitive. However, their output signals require advanced signal processing due to their interference and nonlinearity. In this paper, the design and fabrication of the Fabry-Perot sensor is discussed which is combined with the diaphragm structure to adjust the frequency response to the common acoustic wave frequency emitted by the drone engine. Digital programs based on the FMCW method have also been developed to process the output signal from this sensor; which can instantly receive information from the sensor. The sensor designed and built in this paper has a significant sensitivity of 6.25 microvolts per pascal after characterization and also shows an SNR of 56 at its operating frequency in case of data collection with the program developed for signal processing.

Keywords: Radar, Sonar, Lidar, Micro-electromechanical sensor, Fiber optic sensor, Fabry-Perot, FMCW.

pp. 49-62 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: physicplasma2011@gmail.com

طراحی و ساخت حسگر الیاف نوری فابری- پرو با شیوه استخراج فاز إفامسی دابلوی جهت ردیابی صوتی

جعفر خلیل پور*، سید علی حسینی مرادی، اسماعیل زارعزاده

دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

چکیده

در گذشته حسگرهای به کار گرفته شده جهت تشخیص امواج صوتی تنها شامل روش های الکتریکی و مغناطیسی بوده اند. اما در حال حاضر برای طراحی حسگر آن ها فن آوری های پیشرفته تر مانند حسگرهای ریزبرقی مکانیکی و الیاف نوری نیز مورد مطالعه قرار گرفته اند. هدف این مقاله معرفی حسگر نوینی بر پایه فن آوری الیاف نوری قابل استفاده در سونار است. از بین گونه های متنوعی که در ساخت حسگرهای الیاف نوری وجود دارد، تداخل سنج های فازی به خصوص فابری- پرو بیشترین حساسیت را از خود نشان می دهند. هر چند علامت خروجی آن ها به دلیل تداخلی و غیرخطی بودن نیازمند پردازش علامت پیشرفته هست. در این مقاله طراحی و ساخت حسگر فابری- پرو تلفیق شده با ساختار دیافراگمی جهت تنظیم پاسخ بسامدی روی بسامد موج صوتی ساطع شونده از شیء مورد ردیابی پرداخته شده است. هم چنین جهت پردازش علامت خروجی از این حسگر برنامه ای رقومی بر مبنای روش إفامسی دابلوی توسعه داده شده است؛ که می تواند به صورت آبی اطلاعات را از حسگر دریافت و پردازش کند. حسگر طراحی و ساخته شده، پس از مشخصه یابی دارای حساسیت قابل توجه ۶۲۵ میکروولت بر پاسکال هست و هم چنین داده برداری با برنامه توسعه یافته شده برای پردازش علامت آن در بسامد کاری خود اسان آر معادل ۵۶ نشان داده است.

کلیدواژه ها: رادار، سونار، لیدار، حسگر ریزبرقی مکانیکی، حسگر الیاف نوری، فابری- پرو، إفامسی دابلوی.

۱. مقدمه

آن عدم کارکرد صحیح در شرایط مختلف جوی به دلیل پدیده جذب و پراکندگی نور مرئی در جو است [۱]. گزینه رادار به دلیل عدم جذب و پراکندگی امواج رادیویی ماکروویو در جو این عیب را دارا نیست. از دیگر مزایای رادار می توان به برد بالا، شناسایی جهت اجسام و قابلیت تشخیص چند جسم اشاره کرد. اما اساسی ترین مشکلات موجود در رابطه با رادارها، قابل تشخیص بودن آن ها توسط شیء مورد ردیابی و هم چنین تأثیر تداخلی مخرب هم سازها یا امواج الکترومغناطیسی موجود در باندهای اطراف روی بسامد کاری رادار است. گزینه بعدی مطرح شده، سونار است که معایب عنوان شده در بالا را پوشش می دهد، به صورتی که دچار جذب پراکندگی در محیط جو نمی شوند و هم چنین در حالتی که از فن آوری غیرفعال آن استفاده شود امکان شناسایی متقابل توسط شیء مورد ردیابی را از بین می برند [۲].

به غیر از روش معمول ردیابی با رادار که به وسیله امواج رادیویی انجام می گیرد، چندین روش دیگر نیز به نام های لیدار^۱ و سونار^۲ وجود دارند. در لیدار به جای امواج رادیویی و ماکروویو از نور لیزر برای ردیابی هدف استفاده می شود. در این روش با اندازه گیری زمان و طول موج تپ های برگشتی تصویری سه- بعدی از هدف ساخته می شود. روش سونار که در این مقاله به آن پرداخته شده است، استفاده از امواج صوتی جهت شناسایی و ردیابی هدف هست. از مزیت های لیدار می توان به دقت بالا در تشخیص فاصله، تشکیل تصویر سه- بعدی با وضوح بالا و سرعت بالاتر آن اشاره کرد. اما مهم ترین و چالش برانگیزترین عیب

* نویسنده پاسخگو: smsakhaei@nit.ac.ir

^۱ Lidar

^۲ Sonar

است و توانایی تمییزپذیری بین دو علامت ساطع شده از دو هدف مجاور هم افزایش می‌یابد. برای دریافت امواج صوتی در سونارها به مبدل امواج صوتی به امواج برقی جهت پردازش و تحلیل علامت نیاز هست. این مبدل‌ها انواع گوناگونی دارند. ولی انواع مرسوم آن‌ها به دو دسته مغناطوتنکشی، پیزوالکتریکی و انواع جدیدتر الیاف نوری تقسیم می‌شوند [۵].

حسگرهای الیاف نوری پتانسیل کاربردی بالایی در بیش‌تر علوم و فناوری‌هایی مانند صنعت تولید، مهندسی عمران، تجهیزات دفاعی، محافظت از محیط‌زیست، تحقیقات زمین‌شناسی، اکتشاف نفت و فناوری‌های پزشکی دارند. در طی ۵۰ سال اخیر گونه بسیار متنوعی از حسگرهای الیاف نوری از قبیل حسگرهای چرخشی، دما، تنش، کرنشی، لرزشی، صوتی و فشاری مورد تحقیق گسترده قرار گرفته‌اند. یک سونار الیاف نوری در واقع سوناری هست که مبدل آن یک حسگر الیاف نوری می‌باشد. در رابطه با حسگرهای الیاف نوری ویژگی‌های زیادی وجود دارد که آن‌ها را به جایگزین مناسبی برای مبدل‌های پیزوالکتریکی و مغناطوتنکشی متداول تبدیل کرده است. این ویژگی‌ها شامل حساسیت بسیار بالاتر، محدوده اندازه‌گیری وسیع‌تر و عدم تأثیرپذیری از نوفه‌های الکترومغناطیسی است. طبق تحقیقات صورت گرفته در رابطه با حسگرهای الیاف نوری در زمینه اندازه‌گیری امواج صوتی، در بین پیکربندی‌های موجود اندازه‌گیری فاز (تداخل سنجی) به روش فابری- پرو^۱ از همه موارد دیگر حساسیت بیش‌تری دارد [۶].

در حسگر الیاف نوری بر مبنای تداخل سنج فابری- پرو، علامت نوری بارها در داخل کاواک بازتاب می‌شود. بنابراین علامت خروجی حاصل یک تداخل چندگانه از علامت‌های بازتابی است که در صورت هم‌فاز بودن آن‌ها دارای شدت بیشینه و در صورت اختلاف فاز جزئی در آن‌ها دارای افت شدت ناگهانی می‌شوند. بنابراین کوچک‌ترین تغییر در طول کاواک موجب تغییرات شدیدی در شدت خروجی علامت تداخلی می‌شود. این پیکربندی نیز دارای مزیت‌های ذیل می‌باشد: حساسیت

سونارها به‌طور عمده در هدایت، ردیابی و ارتباط در زیرآب و جو استفاده می‌شوند و به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در سونارهای غیرفعال بخش فرستنده وجود ندارد و گیرنده تمامی علامت‌های صوتی محیط را تحلیل می‌کند. در این نوع سونارها چون فرستنده وجود ندارد، امواج صوتی تولیدشده توسط خود اشیا اعم از امواج صوتی ناشی از جابه‌جایی هدف یا صداهای ناشی از چرخش موتور آن مورد ردیابی قرار می‌گیرد. این نوع سونارها باید حساسیت بالاتری نسبت به سونارهای فعال داشته باشند، زیرا شدت امواج تولیدشده توسط خود اشیا محیط در روش غیرفعال کم‌تر از شدت امواج بازتابی موج فرستاده‌شده توسط فرستنده در سونار فعال است [۳].

شناسایی نوع منبع صوتی در سونار غیرفعال حائز اهمیت است. در واقع مزیت این روش نسبت به روش قبلی این است که با داشتن یک پایگاه داده از بسامد صوتی، وسایل و تجهیزات محیطی و یک سامانه مقایسه‌کننده کاربر محور یا اتوماسیونی می‌توان نوع هدف را نیز شناسایی کرد. از دیگر مزایای این روش پنهان ماندن سونار نسبت به وسیله مورد ردیابی است. زیرا در روش فعال، سونار از خود تشعشعات صوتی ساطع می‌کند و هدف در صورت داشتن سامانه ردیابی مشابه آن را شناسایی و از محدوده ردیابی خارج خواهد شد. محدودیت نوفه‌ای سامانه غیرفعال نیز از مسائل مهم در قدرت شناسایی آن‌هاست. به دلیل اینکه این سامانه می‌بایستی حساسیت بالاتری نسبت به نوع فعال داشته باشد، نسبت به نوفه‌های اطراف و حتی خود دستگاه، به‌خصوص موتور گردان حسگر سونار حساس است [۴].

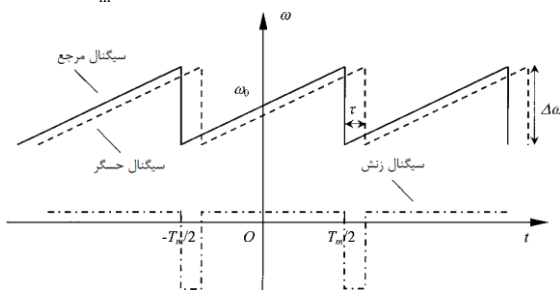
بسامد سونارها از محدوده فروصدا تا بالاتر از ۱ مگاهرتز می‌باشد. به‌طور کلی بسامدهای پایین‌تر نفوذ و برد بیش‌تری دارند، در صورتی که بسامدهای بالاتر تفکیک‌پذیری بالاتر و امکان استفاده از مبدل‌های کوچک‌تر را ارائه می‌دهند. علامت تولیدشده یا بازتابی توسط هدف دارای یک پهنای زمانی متناظر با بسامد آن است. این پهنای معیاری برای توانایی تشخیص یک هدف و تمییزپذیری آن از هدف مجاور احتمالی هست. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه بسامد علامت تولیدشده یا بازتابی بیش‌تر باشد پهنای زمانی آن کوتاه‌تر

^۱ Fabry-Perot

تفکیک پذیری بالا، دامنه اندازه گیری بالا و امکان اندازه گیری مستقیم شبیه سنج فیزیکی را ارائه می دهد. سازوکار عملکرد روش اِفام_سی دابلیو به این صورت است که بسامد لیزر توسط یک موج دندان اره ای مدوله می شود و علامت خروجی آن به درون حسگر تداخلی فرستاده می شود. این علامت درون تداخل سنج دچار اختلاف فاز می شود و نسبت به علامت اصلی دچار تأخیر زمانی می گردد. این مسئله باعث می شود دو علامت همواره در لحظه دارای یک اختلاف بسامدی ثابت شوند. بنابراین دو علامت با یکدیگر ترکیب و دچار زنش می شوند. علامت نهایی علامتی با بسامد معادل اختلاف بسامد علامت های ترکیبی خواهد بود. این بسامد که به آن بسامد زنش گویند، متناسب با مقدار اختلاف فاز حسگر تداخلی است [۹].

همان طور که در شکل ۱ نشان داد شده است، اگر شیب دندان های تابع دندان اره های در نظر گرفته شوند، این مقدار بر حسب دامنه تغییرات بسامدی و دوره مدولاسیون برابر است با:

$$\alpha = \frac{\omega_1(t) - \omega}{T_m} \quad (2)$$



شکل ۱ نمودار بسامد بر حسب زمان علامت های مرجع و حسگری.

برای به دست آوردن فاز علامت مرجع از این عبارت انتگرال گرفته می شود که در آن فاز اولیه علامت نوری قبل از اعمال مدولاسیون است. با داشتن جمله فازی علامت برای تابع موج علامت مرجع و حسگر می توان نوشت:

$$E_1(t) = E_{\cdot 1} \exp\left(j\left(\frac{1}{T}at + \omega_0 t + \phi_0\right)\right) \quad (3)$$

$$E_2(t, \tau) = E_{\cdot 2} \exp\left(j\left(\frac{1}{T}a(t - \tau) + \omega_0(t - \tau) + \phi_0\right)\right) \quad (4)$$

که در آن $E_{\cdot 1}$ و $E_{\cdot 2}$ به ترتیب دامنه های علامت های منبع و حسگر هستند. هنگامی که این دو علامت با یکدیگر تداخل

بالا: به دلیل وجود پدیده تداخل چندگانه در این تداخل سنج، حساسیت بسیار بالا ایجاد می شود که به صورت قابل توجهی از نمونه های پیزوالکتریکی خود بالاتر است. فشرده سازی: اندازه حسگر الیاف نوری ساخته شده بر مبنای تداخل سنج فابری- پرو می تواند تا چند سانتی متر و حتی چند میلی متر برسد و این باعث می شود که برای استفاده در صنایع مختلف بسیار کاربردی باشد. از معایب آن هم می توان به محدوده اندازه گیری پایین به دلیل حساسیت بالای آن اشاره کرد [۷].

در این مقاله به دلیل برتری های ذکر شده، حسگر فابری- پرو جهت طراحی سونار استفاده شده است. هم چنین مسئله ای که از اهمیت بالا و نوآوری برخوردار است، داشتن حساسیت مناسب تر و ساختاری است که نسبت به بسامد کاری موج صوتی دریافتی حساسیت بالایی داشته باشد. پس از بررسی های اولیه در این مقاله تصمیم بر استفاده از ساختار خارجی دیافراگم شده است. علت استفاده کردن از این ساختار قابلیت تنظیم بسامد بازآوایش (تشدید) پوسته دیافراگم با مهندسی ابعاد و مشخصه های آن است. این قابلیت در ساختارهای دیگر نیز تا حدی وجود دارد. اما در این ساختار، به دلیل وجود کاواک هوا و امکان ارتعاشات عرضی پوسته دیافراگم، گستره تنظیم بسامدی بیش تری وجود دارد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. روش استخراج فاز اِفام_سی دابلیو

همان طور که پیداست علامت خروجی یک تداخل سنج به صورت تابع سینوسی از اختلاف فاز بین دو علامت تداخل شونده است. پس همان طور که در معادله (۱) نشان داده شده، رابطه بین شدت خروجی و اختلاف فاز به صورت خطی نیست. از طرفی، امواج صوتی روی اختلاف فاز حسگرهای الیاف نوری مبنی بر تداخل سنجی تأثیر می گذارند. بنابراین برای پیدا کردن علامت موج صوتی استخراج فاز علامت خروجی مورد نیاز است [۸].

$$I = I_0 \cos \phi(t) \quad (1)$$

روش اِفام_سی دابلیو^۱ ویژگی های منحصر به فردی از قبیل

^۱ FMCW

که در آن مقدار c برابر سرعت نور در خلأ و مقدار n برابر ضریب شکست هوا قرار داده شده است. در مخرج نیز بیشینه مقدار تغییرات بسامد لیزر در نظر گرفته شده است. لیزرهای متداول مورد استفاده در روش استخراج فاز اِفام‌سی دابلیو لیزرهای تک‌بسامد هستند که یکی از رایج‌ترین فن‌آوری آن‌ها لیزرهای دی‌اِف‌بی^۲ می‌باشد. در این نوع لیزرهای بیشینه قابلیت جابه‌جایی طول موج حدود ۴ نانومتر در محدوده مخابراتی (۱۵۵۰ نانومتر) است. تبدیل این مقدار به فضای بسامدی معادل عدد ۵۰۰ گیگاهرتز می‌شود که در مخرج کسر قرار داده شده است.

برای رهایی از نوفه‌های مخرب ناشی پُرش‌های بسامدی در لبه‌های علامت مدولاسیون، نسبت این دو بسامد را می‌توان به صورت عددی صحیح در نظر گرفت. هم‌چنین به دلیل اینکه نوفه‌های بنفش که در بسامدهای پایین شدت بیش‌تری دارند، بهتر است بسامد زنش از بسامد مدولاسیون بیش‌تر باشد تا هنگام پردازش علامت در صورت داشتن شدت پایین در نوفه بنفش پنهان نشود. با فرضیات بالا می‌توان دید که اگر نسبت بین بسامد زنش و بسامد مدولاسیون لیزر ۱۰ و مقدار اندازه کاواک ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شود تساوی فوق برقرار خواهد ماند. به عبارت دیگر در صورتی که برای حسگر فابری-پرو طول کاواکی معادل ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شود و بسامدی معادل با ۱ کیلوهرتز جهت مدولاسیون لیزر اعمال شود، بسامد زنش خروجی از حسگر معادل ۱۰ کیلوهرتز خواهد بود.

۲-۳. محاسبه ناحیه اتصال الیاف به دیافراگم

دلیل اهمیت این محاسبه تلاش برای حذف تأثیرات گرمایی محیط روی حسگر است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، حسگر فابری-پرو شامل یک پرده دیافراگم است که در اثر برخورد امواج صوتی دچار ارتعاش می‌شود. از جهتی ارتعاشات پرده دیافراگم موجب تغییر طول کاواک به صورت تناوبی می‌گردد.

مطابق با سازوکار توضیح داده‌شده از روش اِفام‌سی دابلیو، این نوسانات موجب تغییر فاز علامت زنش خروجی از

می‌کنند و زنش رخ می‌دهد، می‌توان برای علامت نهایی نوشت:

$$I(t, \tau) = |E_v(t) + E_v(t, \tau)|^2 = I_0 [1 + V \cos(\alpha t + \omega \tau)] \quad (5)$$

که در آن I میانگین شدتی و V نمایانی علامت زنش می‌باشند. بنابراین علامت خروجی دارای بسامد $\omega_b = \alpha \tau$ و فازی معادل با $\phi_b = \omega \tau$ است. برای ملموس‌تر شدن شبیه‌سنج‌ها اندازه‌گیری به جای شبیه‌سنج اختلاف زمانی از اختلاف راه نوری^۱ استفاده می‌شود. بنابراین با توجه معادله (۵) و رابطه پراکنندگی نور روابط ذیل بدست می‌آیند:

$$OPD = \frac{c v_b}{\Delta v v_m} \quad (6)$$

$$\delta(OPD) = \frac{\lambda \cdot \delta \phi_b}{2\pi} \quad (7)$$

که در این معادلات بسامد v_b زنش، Δv دامنه بسامد مدولاسیون، v_m بسامد مدولاسیون می‌باشند. روابط بالا به ترتیب مقدار مطلق اختلاف راه نوری و تغییرات لحظه‌ای آن را نشان می‌دهند. حال که روابط فاز و بسامد علامت خروجی حسگر تداخلی بر حسب اختلاف راه و تغییرات آن به دست آمده نیاز به سازوکاری جهت استخراج فاز و بسامد این علامت‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های رایج صافی کردن (فیلتر کردن) علامت و سپس استفاده از یک حلقه قفل فاز است. صافی میان‌گذر در واقع هم‌ساز اطراف علامت زنش و نوفه فازی آن را خنثی می‌کند. سپس حلقه قفل فازی روی فاز علامت زنش قفل می‌شود تا مقدار لحظه‌ای آن را به دست آورد [۱۰].

۲-۲. تعیین اندازه کاواک فابری-پرو

با توجه به معادله (۶) تناسبی بین اندازه کاواک فابری-پرو و شبیه‌سنج‌های مؤثر در روش پردازش علامت اِفام‌سی دابلیو وجود دارد که برای طراحی اندازه کاواک می‌بایستی زیر نظر قرار گرفته شود. اگر در این تناسب مرتبه تقریبی اعداد متداول استفاده‌شده در این روش قرار گیرد، رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$1 \times d = \frac{3 \times 10^8 \times v_b}{5 \times 10^{11} \times v_m} \quad (8)$$

² DFB

¹ OPD

می توان نوشت:

$$L_1 = \epsilon \times \frac{\alpha_r}{\alpha_1 - \alpha_r} \quad (12)$$

معادله (۱۲) نشان می دهد که برای ضریب انبساط گرمایی ماده نگه دارنده دیافراگم می بایستی از ضریب انبساط گرمایی ماده تشکیل دهنده الیاف نوری (سیلیکا) کم تر باشد. مواد با سختی کم تر ضریب انبساط حرارتی پایین تری دارند. بنابراین، در این قسمت از مواد بسیاری (پلیمری) جهت طراحی بدنه نگه دارنده دیافراگم استفاده می شود. از طرفی باید در نظر داشت که ماده منتخب سختی بیش تری نسبت به پرده دیافراگم داشته باشد تا در صورت برخورد امواج صوتی دچار تغییر شکل نشود. بنابراین بسیار پی ایم ای^۱ با نام تجاری پلکسی گزینه مناسبی برای این مسئله به نظر می رسد که در این قسمت از آن استفاده شده است. با قراردادن مقادیر ضریب انبساط حرارتی سیلیکا و پلکسی در معادله (۱۲) رابطه (۱۳) بدست می آید:

$$L_1 = \epsilon \times \frac{70 \times 10^{-6}}{70 \times 10^{-6} - 54 \times 10^{-6}} = 47.6 \text{ mm} \quad (13)$$

همان طور که در جواب نهایی پیداست، طول اولیه الیاف که در واقع منظور طول الیاف از ناحیه اتصال بین الیاف نوری و بدنه نگه دارنده دیافراگم است، می بایستی تقریباً معادل طول کاواک فابری- پرو در نظر گرفته شود.

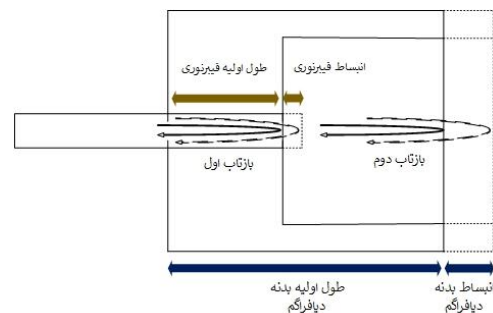
۴-۲. طراحی دیافراگم صوتی

ابعاد و جنس ماده استفاده شده در این ساختار از آن جایی مورد اهمیت هستند که در تعیین بسامد بازآوایش (تشدید) و حساسیت حسگر نقش دارند. با توجه به الگوسازی های انجام شده در رابطه با دیافراگم مرتعش می توان گفت بسامد بازآوایش پوسته ای آن با عواملی چون شعاع و ضخامت پوسته و سرعت صوتی در آن متناسب است. این تناسب به صورت معادله (۱۴) بیان می شود [۸]:

$$f_n \propto \frac{t}{R^2} v \propto \frac{t}{R^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (14)$$

که در t ضخامت، R شعاع و v سرعت صوتی در دیافراگم هستند. سرعت امواج صوتی در جامدات خود تابعی از

حسگر می شوند. برای برقراری شرایط پایدار در تحلیل علامت به روش ایم-سی دابلیو بسامد علامت زنش می بایستی تقریباً ثابت بماند و تنها فاز آن دچار تحولات متنظر با موج صوتی شود. در حالت کلی طول میانگین کاواک و در نتیجه بسامد علامت زنش ثابت است. اما در صورتی که تغییرات دمای محیط باعث تغییر طول کاواک به صورت مثبت یا منفی شود، می تواند باعث از بین رفتن پایداری سازوکار عملکرد روش ایم-سی دابلیو شود. یکی از راه هایی که برای جلوگیری از این مشکل می توان ارائه کرد انتخاب مواد مناسب جهت جبران اثر انبساط دمایی است.



شکل ۲ اثر تغییرات دمایی روی طول کاواک حسگر الیاف نوری فابری- پرو.

در اثر افزایش دمای محیط هم الیاف نوری و هم بدنه نگه دارنده پرده دیافراگم دچار انبساط گرمایی می شوند. اما از آن جایی که ضرایب انبساط گرمایی و ابعاد اولیه این دو عنصر یکسان نیست، میزان انبساط گرمایی در هر یک متفاوت است. این امر موجب می گردد که طول مؤثر کاواک تغییر کند.

$$\Delta L_1 = L_1 \alpha_1 \Delta T \quad (9)$$

$$\Delta L_r = L_r \alpha_r \Delta T \quad (10)$$

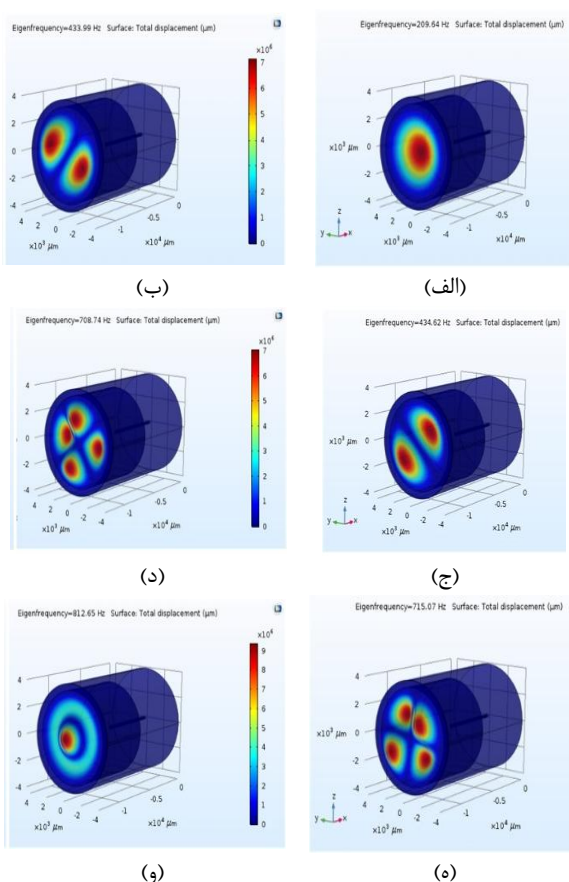
که در آن ها L_1 و L_r به ترتیب طول های اولیه، α_1 و α_r ضرایب انبساط گرمایی، ΔL_1 و ΔL_r تغییرات طول به ترتیب الیاف نوری و بدنه نگه دارنده دیافراگم می باشند. حال برای این که از تغییر یافتن طول مؤثر کاواک در اثر تغییرات دمایی جلوگیری شود، می بایستی تغییرات طول هر دو الیاف نوری و بدنه دیافراگم یکسان باشند. بنابراین:

$$\Delta L_1 = \Delta L_r \quad (11)$$

با انتخاب طول های اولیه مناسب از هر عنصر، می توان اثر انبساط گرمایی را خنثی نمود. در نهایت برای طول L_r

^۱ PMMA

متناظر با ناحیه‌هایی هستند که توسط چسب یا پیچ به یکدیگر متصل شده‌اند. عدم تعریف این نواحی در یک شبیه‌سازی موجب واگرا شدن جواب‌های شبیه‌سازی خواهد شد. در شکل ۳ شش مد ارتعاشی اول ساختار طراحی شده برای حسگر فابری- پرو نمایش داده شده‌اند که به ترتیب بسامد بازآوایش آن‌ها (الف) ۲۰۹٫۶۴، (ب) ۴۳۳٫۹۹، (ج) ۴۳۴٫۶۲، (د) ۷۰۸٫۸۴، (هـ) ۷۱۵٫۰۷ و (و) ۸۱۲٫۶۵ هرتز می‌باشند.



شکل ۳ مدهای بازآوایشی ساختار طراحی شده برای حسگر الیاف نوری فابری- پرو.

۲-۵. طراحی برنامه شبیه‌ساز علامت نوری

این برنامه خود از دو قسمت تشکیل شده که قسمت اول برای مدولاسیون بسامدی علامت لیزر و قسمت دوم جهت تشکیل علامت نهایی خروجی از حسگر الیاف نوری (علامت زنش) در نظر گرفته شده‌اند.

۲-۵-۱. مدولاسیون بسامدی علامت لیزر

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این سربرگ از

شبه‌سنگ‌های E مدول یانگ، ρ چگالی جرمی و ν ضریب پواسون است. به دلیل اینکه در ابتدا تمایل برای به‌دست آوردن مدهای بازآوایشی این ساختار وجود دارد، فیزیک مکانیک جامدات در این نرم‌افزار ایجاد شده و کل ساختار تحت پوشش این ماژول فیزیکی قرار گرفته است. فیزیک مکانیک جامدات، به سه مشخصه اصلی هر ماده برای تحلیل کرنش‌های اعمالی به ساختار نیاز دارد. در جدول ۱ و ۲ مشخصه‌های مربوط به هر کدام از مواد استفاده شده در شبیه‌سازی ارائه شده است.

جدول ۱ ابعاد اجزای مختلف حسگر الیاف نوری فابری- پرو.

قطر غلاف الیاف نوری	۱۲۵ میکرون
طول ناحیه اتصال الیاف نوری به پی‌ام‌ای	۶ میلی‌متر
طول بدنه نگه‌دارنده پرده دیافراگم	۱۲ میلی‌متر
شعاع داخلی کاواک	۳٫۵ میلی‌متر
شعاع خارجی کاواک	۴ میلی‌متر
ضخامت پرده دیافراگم	۱۰۰ میکرون
شعاع پرده دیافراگم	۳٫۵ میلی‌متر

جدول ۲ مشخصه‌های مواد مورد استفاده در طراحی حسگر

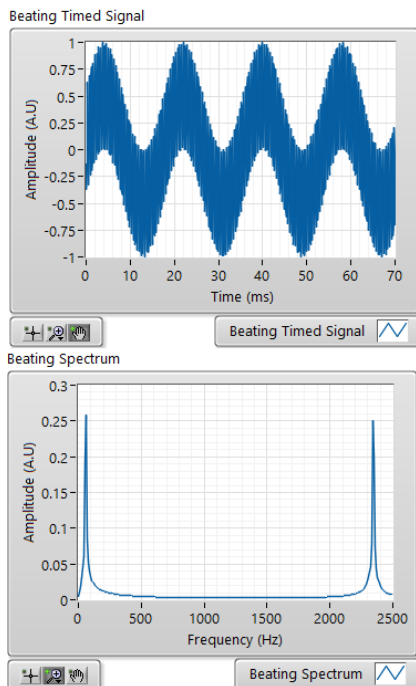
الیاف نوری فابری- پرو.

مشخصه ماده	مدول یانگ (پاسکال)	ضریب پواسون	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
سیلیکا	79×10^9	۰٫۱۸۶	۲۲۰۳
پی‌دی‌ام‌ایس	750×10^3	۰٫۴۹	۹۷۰
پی‌ام‌ای	3×10^9	۰٫۴	۱۱۹۰

پس از وارد کردن مشخصات مواد مورد استفاده، نیاز به اعمال شرایط مرزی در فیزیک مطرح شده وجود دارد. در فیزیک جامدات تکیه‌گاه‌ها و نقاط اتصال نقش کلیدی در تعیین جواب نهایی مسئله دارند. تکیه‌گاه‌ها قسمت‌هایی از ساختار هستند که دارای محدودیت‌های کرنشی در یک یا تمامی راستاها می‌باشند. این نواحی در واقعیت به بخش‌هایی از ساختار اتصال دارند که وجود آن‌ها در شبیه‌سازی الزام ندارد. نقاط اتصال نیز نقشی مشابه تکیه‌گاه‌ها دارند با این تفاوت که این نقاط مابین اجزای ساختار مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. معمولاً این نقاط

حسگر الیاف نوری اتفاق می‌افتد، دو علامت منبع و حسگری با یکدیگر تداخل می‌کنند. در اثر تداخل دو علامت با بسامدهای متفاوت زنش رخ می‌دهد و علامت نهایی علامتی با بسامدی معادل با جمع و تفریق بسامد علامت‌های تداخل‌کننده ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ (نمودار بالا) مشاهده می‌شود، این علامت هم‌چنین دارای یک پوش با بسامدی معادل تفریق بسامدهای علامت‌های تداخل‌کننده است که به آن علامت زنش گفته می‌شود.

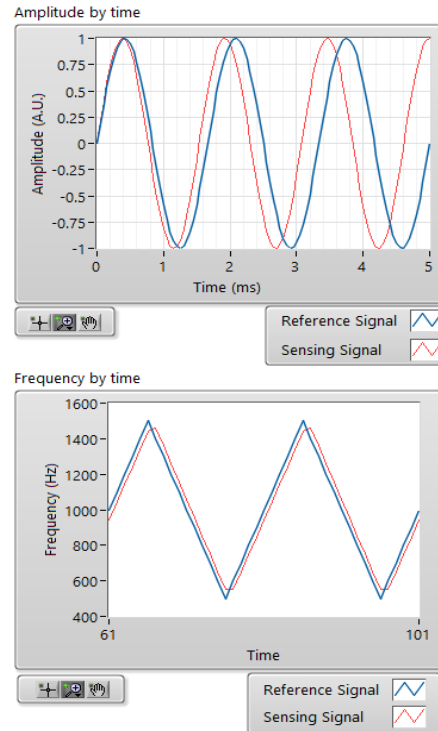
در نمودار شکل ۵ (نمودار پایین) طیف بسامدی علامت زنش خروجی از حسگر الیاف نوری نشان داده شده است.



شکل ۵ نمودارهای مربوط به تشکیل علامت زنش توسط برنامه.

در این نمودار دو مؤلفه بسامدی قابل مشاهده هستند. مؤلفه بسامد بالا همان مؤلفه جمع بسامدهای تداخل‌کننده می‌باشد که با زمان متغیر است. دلیل تغییر این مؤلفه با زمان این است که بسامد هر دو علامت مرجع و حسگری به صورت تابع مثلثی در حال نوسان است. حال آن‌که جمع این دو نیز به صورت تابع مثلثی نوسان می‌کند. اما مؤلفه بسامدی پایین که در نمودار سمت راست شکل ۵ (نمودار پایین) مشاهده می‌شود، همان بسامد زنش است. این مؤلفه بسامدی برخلاف مؤلفه بسامدی بالا نسبت به زمان ثابت است. زیرا اختلاف بسامدی بین دو

برنامه دارای دو نمودار است. نمودار بالا و پایین به ترتیب نشان‌دهنده دامنه و بسامد علامت نوری لیزر نسبت به زمان می‌باشند.



شکل ۴ نمودارهای مربوط به مدولاسیون بسامدی لیزر در برنامه اِفام‌سی دابلوی.

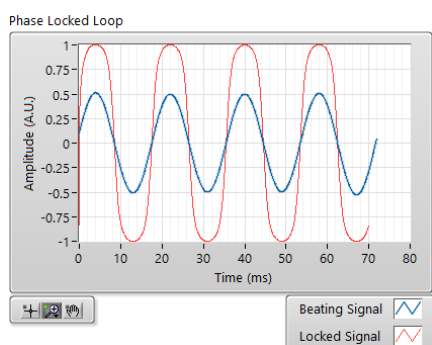
همان‌طور که مشهود است در هر یک از نمودارها دو علامت وجود دارد. این دو علامت‌ها در واقع علامت‌های نوری بازتابی از دو سطح فابری- پرو می‌باشند که دارای اختلاف فاز اولیه نسبت به یکدیگر (به دلیل اختلاف راه نوری کاواک) هستند و به نام‌های علامت مرجع و حسگر شناخته می‌شوند. بر طبق اصول توضیح داده‌شده از روش اِفام‌سی دابلوی، بسامد علامت خروجی لیزر به صورت دندان اره‌ای یا مثلثی مدوله می‌شود. همان‌طور که در نمودار پایینی نشان داده‌شده، بسامد علامت‌های مرجع و حسگری هر دو به صورت مثلثی با اختلاف فاز جزئی نسبت به هم نوسان می‌کنند. در نمودار بالایی اثر این مدولاسیون بسامدی روی دامنه علامت سینوسی خروجی از لیزر نشان داده می‌شود.

۲-۵-۲. تشکیل علامت زنش

در این قسمت از برنامه طبق فرآیندی که در عمل در

مقایسه کننده فاز است که وظیفه محاسبه کردن اختلاف فاز بین موج ورودی به حلقه و موج تولید شده بازگشتی (فیدبک) از بلوک وی سی^۱ است. سازوکار این حلقه به شکلی است که این اختلاف به عدد صفر نزدیک شود (اصطلاحاً فاز قفل شود) به طوری که فاز موج مجهول ورودی به صورت لحظه ای قابل اندازه گیری باشد. بلوک وسطی یک نوع صافی پایین گذر است که در از بین بردن جمله های بسامد بالا جهت جلوگیری از خارج شدن حلقه از حالت پایدار (قفل فاز) نقش اساسی دارد.

در این برنامه، حلقه قفل فاز به صورت رقومی طراحی و پیاده سازی شده است. به طوری برای تنظیم فاز موج خروجی از بلوک وی سی^۱ از اندازه علامت خطا (اختلاف فاز بین موج ورودی و فیدبک) به عنوان ولتاژ تنظیم کننده فاز استفاده شده است. هم چنین محاسبات بخش مقایسه کننده فاز توسط تجزیه و تحلیل مختلط صورت گرفته است. در نهایت برای پیاده سازی صافی حلقه، از یک صافی^۲ با ضرایب بهینه شده مستقیم ۱/۰۵ و ۰/۹۵- و معکوس ۱ و ۱- استفاده شده است. علامت های آبی و قرمز رنگ در نمودار شکل ۶ به ترتیب علامت ورودی (علامت زنش) و خروجی حلقه قفل فاز می باشند که در آن علامت خروجی یا قفل شده، بهنجار شدند تا در تصویر از یکدیگر قابل تمایز باشند.



شکل ۶ نمودار مربوط به حلقه فاز برنامه اِفام سی دابلوی.

۷-۲. بررسی اثر نوفه ها بر علامت صوتی

علامت صوتی توسط دو نوفه فازی و بنفش با مقادیر متفاوت دچار اغتشاش می گردند تا توسط این شبیه سازی

علامت مرجع و حسگری همواره ثابت و متناسب با اختلاف فاز بین آن دو می باشد.

۲-۶. طراحی برنامه پردازشگر علامت الکتریکی

۲-۶-۱. صافی میان گذر

همان طور که در بخش قبلی اشاره شد علامت زنش دارای دو مؤلفه بسامدی است. مؤلفه بسامدی مدنظر جهت استخراج فاز حسگر الیاف نوری مؤلفه بسامد پایینی است که اختلاف بسامدی بین علامت مرجع و علامت حسگری می باشد. از طرفی در بسامدهای خیلی پایین نوفه بنفش یا $1/f$ وجود دارد که برای اندازه گیری فاز علامت زنش مشکل ایجاد می کند. بنابراین جهت حذف مؤلفه بسامدی بالا و هم چنین کم تر کردن نوفه $1/f$ از یک صافی رقومی میان گذر استفاده می شود.

۲-۶-۲. حلقه قفل فاز

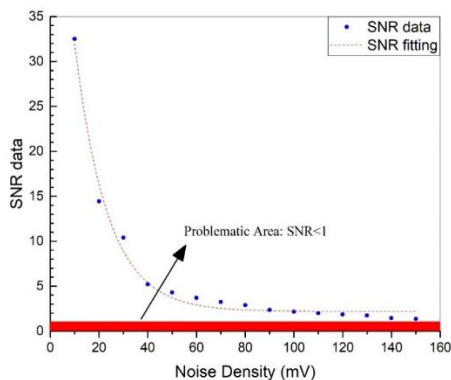
همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، بسامد علامت زنش توسط تحلیل فوریه قابل تعیین هست. بنابراین بر طبق روابط (۴-۱۱) می توان اختلاف راه اولیه یا طول کاواک حسگر را به دست آورد. ولی از جهتی که این حسگر در عمل تحت تأثیر امواج فراصدا با بسامد بالا قرار می گیرد، شناسایی قله نمودار فوریه جهت تشخیص بسامد لحظه ای از دقت پایینی برخوردار است. هم چنین میزان تغییرات طول کاواک در اثر امواج فراصدا نسبت به اندازه اولیه کاواک بسیار کوچک است. بنابراین شناسایی تغییرات قله بسامدی در طیف تحلیلی فوریه امری دشوار خواهد بود. در عوض در صورتی که از معادله (۷) که رابطه بین تغییرات طول کاواک و فاز علامت زنش را نشان می دهد، استفاده شود. با دقت و سرعت بالایی می توان تغییرات طول کاواک را اندازه گیری نمود. برای اندازه گیری فاز علامت زنش سامانه حلقه قفل فاز به کار گرفته شده است.

حلقه قفل از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بلوک انتهایی حلقه یک اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ است که وظیفه آن تولید یک موج با فاز قابل تنظیم می باشد. در واقع، تغییرات ولتاژ ورودی به این اسیلاتور، منجر به جابه جایی فاز موج خروجی آن می شود. بلوک ابتدایی، یک

¹ VCO

² IIR

خروجی حسگر سونار با اهمیت است، نوبه $1/f$ یا نوبه بنفش است. این نوبه عمداً ریشه الکترونیکی دارد به طوری که در این مسئله بیش‌تر هنگام داده‌برداری در مدارهای واسط بسامد بالا ایجاد می‌شود. شکل ۸ نشان‌دهنده نرخ کاهش مقدار ISN آر علامت صوتی بازیابی شده در اثر افزایش این نوبه را نشان می‌دهد. در این قسمت میزان نوبه اعمالی با شبیه‌سنج چگالی نوبه مشخص شده است.

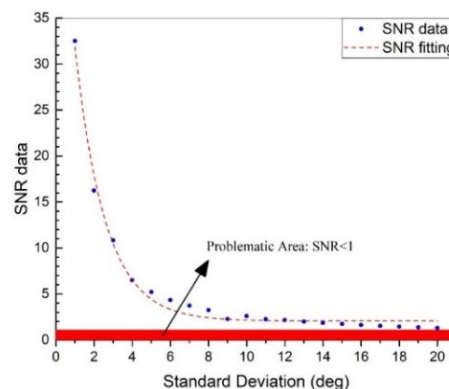


شکل ۸ نمودار میزان تغییرات شبیه‌سنج ISN آر در اثر افزایش نوبه $1/f$ سامانه پردازشگر علامت.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود زمانی که مقدار این نوبه به عدد 150 میلی‌ولت نزدیک می‌شود نسبت به ISN آر به ناحیه زیر 1 بسیار نزدیک شده است. این نشان‌دهنده مرز گم‌شدن علامت اصلی در نوبه موجود است. بنابراین آخرین حد قابل قبول برای این نوبه در سامانه پردازش علامت بر مبنای روش ایفام‌سی دابلیو مقدار 150 میلی‌ولت گزارش می‌شود. برای کاهش این نوبه می‌توان بسامد زنش را تا حد ممکن بزرگ در نظر گرفت تا از ناحیه مربوط نوبه بنفش که در بسامدهای پایین دارای چگالی بیش‌تری می‌باشد، دوری کرد. یکی از مزیت‌های روش ایفام‌سی دابلیو این است که می‌توان بسامد علامت زنش را با افزایش بسامد مدولاسیون لیزر افزایش داد. از طرفی با افزایش بسامد مدولاسیون لیزر نوبه فازی آن نیز بیش‌تر می‌گردد. بنابراین می‌بایستی یک حد بهینه برای این کار به‌دست آورد.

در قسمت پایانی برنامه از نوبه سفید جهت شبیه‌سازی نوبه فازی لیزر و از نوبه بنفش جهت شبیه‌سازی نوبه‌های

بیشینه مقدار نوبه قابل تحمل به این سامانه تحلیل گردد. نوبه‌ای که ابتدا مورد تحلیل قرار گرفته است، نوبه فازی لیزر اثر ناپایداری حرارتی و جریان اعمالی به آن است. این نوبه که در شبیه‌سازی به علامت‌های ورودی به حسگر تداخل‌سنج در نظر گرفته شده است، توسط مقدار انحراف معیار آن قابل تنظیم می‌باشد. در واقع میزان انحراف معیار به میانگین پرش‌های فازی لیزر از حالت هم‌دوسی کامل اطلاق می‌گردد. این نوبه موجب برهم‌ریختگی فازی تداخل‌سنج و نتیجتاً عدم پایداری فاز علامت زنش در حالتی که هیچ موج صوتی در محیط وجود نداشته باشد، می‌گردد. شکل ۷ تغییرات ISN آر^۱ علامت صوتی بازیابی شده از طیف بسامدی علامت زنش را بر حسب مقادیر مختلف نوبه فازی لیزر اعمالی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، مقدار ISN آر به سرعت در اثر افزایش انحراف معیار نوبه فازی به صورت نمایی کاهش می‌یابد و در مقداری حدود 20 به ناحیه $SNR < 1$ (ناحیه‌ای که در شکل با نوار قرمز رنگ مشخص شده) می‌رسد. در این ناحیه تشخیص علامت اصلی از نوبه تقریباً غیرممکن است. بنابراین جهت حفظ اطلاعات لازم برای تحلیل امواج صوتی بهتر است انحراف معیار نوبه فازی لیزر کم‌تر از 20 باشد. این کار با پیاده‌سازی سامانه‌های برگشتی پیشرفته جهت تنظیم دقیق دما و جریان لیزر ممکن می‌باشد.

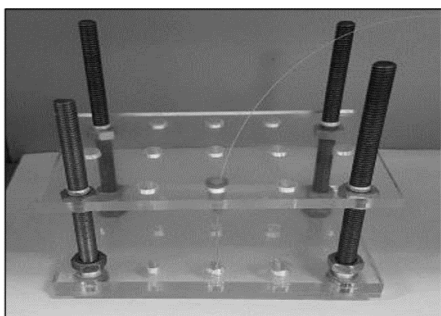


شکل ۷ نمودار میزان تغییرات شبیه‌سنج ISN آر در اثر افزایش نوبه فازی لیزر.

نوبه دیگری که از اهمیت بالایی در پردازش علامت

^۱ SNR; Signal-to-Noise Ratio

هیبریدی تعیین شود: برای این منظور انتهای الیاف توسط جابه‌جاگر در راستای Z تغییر می‌کند، دامنه تغییرات بیانگر طول نهایی این کاواک خواهد بود. بسیار به کار رفته در این حسگر، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با نام اختصاری پی‌دی‌ام‌اس^۱ می‌باشد. این ماده به دلیل خاصیت الاستیسیته ذاتی، در مقابل تغییر شکل برگشت‌پذیر بوده و در نتیجه گزینه مناسبی برای ساخت این حسگر می‌باشد.



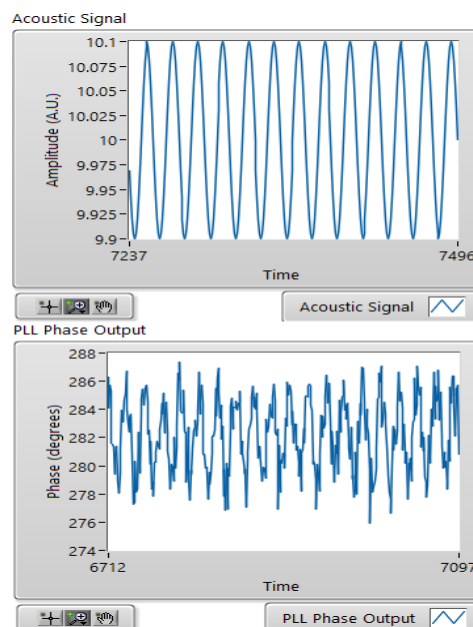
شکل ۱۰ قالب آماده شده جهت قالب‌گیری استوانه‌ای بسیاری.

هم‌چنین از مزایای این حسگر قیمت کم، تولید آسان و شفافیت آن می‌باشد. برای تهیه محلول بسیاری از سیلگارد ۱۸۴- سیلیکون‌لاستومر^۲ به نسبت ۱:۱۰ از بسیار اصلی و ماده منعقدکننده استفاده شده است. بدین‌منظور مقدار ۲۲/۹۰۸۶ گرم از ماده پایه را با مقدار ۲/۲۹۳۳ گرم از ماده‌ی سفت‌کننده ترکیب کرده و آن‌ها را کاملاً هم زده تا محلول یکنواختی حاصل شود (از پی‌دی‌ام‌اس با نسبت ۱:۱۰ نیز برای مقایسه و مشخصه‌یابی حسگر در گام‌های بعدی استفاده شده است) سپس، قالب استوانه‌ای از محلول بسیاری پر می‌شود و در نهایت، قالب به همراه پی‌دی‌ام‌اس به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق و بدون تغییر نگهداری شده است.

۲-۸-۲. ایجاد گاف هوا در حسگر

در این مرحله، الیاف نوری تک مد مطابق با آنچه در شکل ۱۱ نشان داده شده است کمی به عقب برده می‌شود. در این حالت، به دلیل ایجاد کاواک دوم (که از جنس هوا می‌باشد) طیف حسگر به طیف مدوله‌شده‌ی تداخلی

الکترونیکی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشهود است به علامت استخراج‌شده دو مشخصه نوفه بنفش و نوفه سفید اضافه‌شده، ولی هم‌چنان علامت نهایی با علامت به نوفه قابل توجهی نمایان است.



شکل ۹ سرب‌های مربوط موج فراصداى اعمالی (بالا)، موج دریافتی از حسگر (پایین).

۲-۸-۱. ساخت حسگر استوانه‌ای بسیاری

۲-۸-۱-۱. ساخت و آماده‌سازی قالب

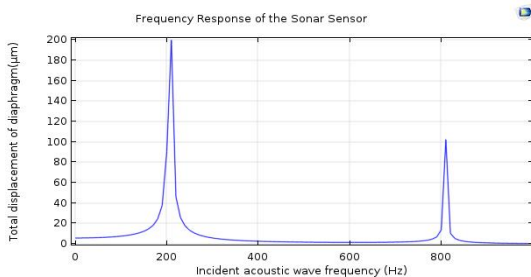
برای ساخت حسگر، قبل از هر چیز نیاز به آماده‌سازی قالب جهت تهیه استوانه بسیاری (پلیمری) است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، سه قطعه پلکسی طراحی‌شده‌اند که به ترتیب لایه زیرین، لایه قالب و لایه فوقانی (لایه‌ی نگهدارنده سوزن) را تشکیل می‌دهند. حفره‌های روی قطعات، به کمک لیزر عمود برش داده شده‌اند. برای ساخت حسگر از سوزنی به قطر ۶۰۰ میکرون به عنوان نگهدارنده حسگر استفاده شده است. در ادامه الیاف تک مد که سر آن عمود بریده شده درون این غلاف فلزی قرار می‌گیرد. ارتفاع لایه‌ی فوقانی باید به گونه‌ای تنظیم شود که سوزن حدود ۱ میلی‌متر از کف حفره فاصله داشته باشد. هم‌چنین تراز بودن لایه باید به گونه‌ای تنظیم شود که سر سوزن در وسط حفره‌ی استوانه‌ای قرار بگیرد. در ادامه لازم است طول کاواک

^۱ PDMS

^۲ Sylgard 184- Silicon elastomer

زیرشاخه آن ماژول در قسمت فشار فرودی باید امواج به صورت تخت انتخاب شوند. علتی که برای این نکته‌ی فنی ارائه می‌شود، این است که با وجود تمایل تخت در نظر گرفتن امواج به دلیل دور بودن منبع، شرایط جفت‌شدن مدهای عرضی دیافراگم با مدهای طول امواج صوتی تنها در صورتی بر شبیه‌سازی اعمال می‌شوند که امکان در نظر گرفتن شرایط مرزی امواج کروی توسط شبیه‌سازی ایجاد شده باشد.

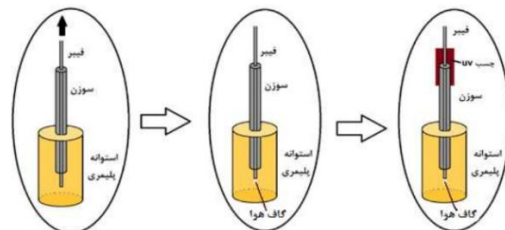
در شکل ۱۳ پاسخ بسامدی حسگر طراحی‌شده در فصل چهارم در گستره ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز به چشم می‌خورد که در آن محور افقی بسامد امواج صوتی فرودی به حسگر بر حسب هرتز و محور عمودی جابه‌جایی مکانیکی پرده دیافراگم توسط تنش اعمالی این امواج بر حسب میکرومتر می‌باشد. همان‌طور که مشهود است، حسگر در بسامدی حدود ۲۱۱ هرتز به بازآوایش (تشدید) می‌رسد.



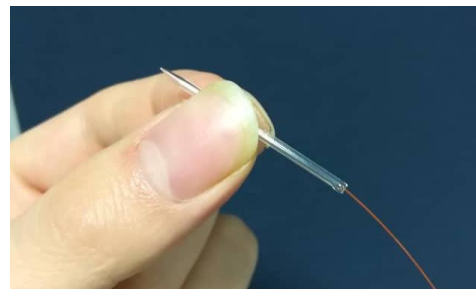
شکل ۱۳ نمودار پاسخ بسامدی حسگر فابری- پرو طراحی‌شده جهت استفاده در سونار.

این بدین معنی است که موج صوتی با بسامد ۲۱۱ هرتز شرایط لازم جهت تزویج شدن به صورت مد ارتعاشی پرده دیافراگم را دارد و حسگر ساخته‌شده مطابق با انتظار امواج صوتی نزدیک به ۲۰۰ هرتز را تقویت و امواج دورتر از این ناحیه را با شدت بسیار ضعیف‌تر دریافت می‌نماید. مد بعدی که در طیف بسامدی به چشم می‌خورد در بسامد ۸۱۱ هرتز قرار دارد. این بسامد نیز مشابه به آن چیزی که در رابطه بسامد ۲۱۱ هرتز گفته شد معادل مد ششم ارتعاشی ساختار دیافراگم است. دلیل برانگیخته نشدن مدهای بین اول و ششم عدم برقراری شرایط تطبیق فازی بین موج صوتی و آن مدها می‌باشد. همگی مدهای به‌غیر از مدهای اول و ششم دارای گره و شکم محوری نیز می‌باشند. اما از آن جهت که امواج صوتی فرودی بر پرده

تبدیل می‌گردد. هم‌چنین تغییرات طول کاواک هوا و کاواک هیبریدی در حین عقب کشیدن، باعث می‌شود طیف حسگر در هر گام دچار تغییر شود. در نهایت هنگامی که طیف حسگر، طیف مورد نظر شد و یا به عبارتی طول کاواک هوا به مقدار مد نظر رسید، کشیدن الیاف متوقف می‌شود. در مرحله‌ی آخر، پس از آن که گاف هوا با طول مناسب تشکیل شد، برای ثابت کردن مکان الیاف درون حسگر، از چسب فرابنفش استفاده شده است. برای این منظور، ناحیه‌ی اشتراک سوزن و الیاف به چسب آغشته می‌شود تا در نهایت پس از خشک شدن چسب، جایگاه الیاف نوری در حسگر ثابت شود. در نهایت حسگر استوانه‌ی بسپاری با دو گاف هوا و پی‌دی‌ام‌اس ساخته می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۱ مراحل تکمیل ساخت حسگر استوانه بسپاری.



شکل ۱۲ تصویری از حسگر استوانه بسپاری بعد از ساخت.

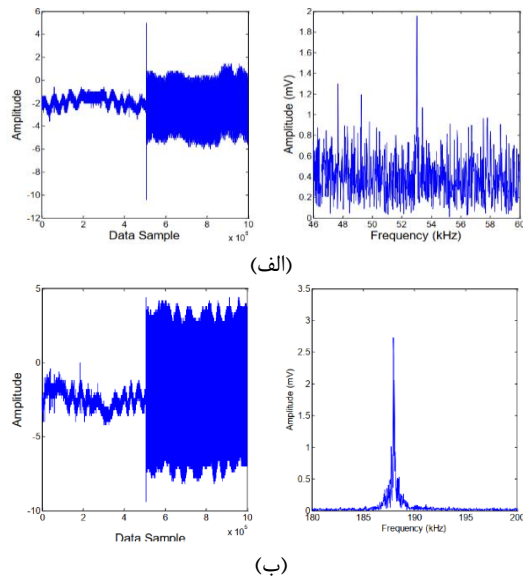
۳. نتایج و بحث

۳-۱. پاسخ بسامدی حسگر شبیه‌سازی‌شده

در این شبیه‌سازی برای مطالعه گسترده‌تر پاسخ بسامدی حسگر سونار و بررسی هم‌سازهای مزاحم در باندهای اطراف، طیف بسامد بین ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز قرار داده شده است. نکته بسیار مهم و حائز اهمیت در تنظیمات بخش صوتی شبیه‌سازی این است که ناحیه‌ای که به‌عنوان منبع موج صوتی در نظر گرفته می‌شود خود ناحیه به‌صورت ناحیه مولد امواج کروی باید در نظر گرفته شود ولی در

طیف فرودی از لیزر دی اف بی توسط تزویج گر وارد الیاف و سونار شده و بعد از برخورد به سطوح، بازتاب فرنل از هر سطح صورت گرفته و باریکه های بازتابی با یکدیگر تداخل می کنند، در نهایت طیف تداخلی مجدداً توسط تزویج گر جمع شده و در آشکارساز نوری به علامت برقی تبدیل و جهت پردازش های رقومی وارد رایانه و اسیلوسکوپ می شود.

در این مرحله حسگر فابری- پرو مورد آزمایش در دو بسامد مختلف ۵۳ کیلوهرتز و ۱۸۸ کیلوهرتز قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، علامت بسامدی حسگر فابری- پرو در بسامد ۱۸۸ نسبت به ۵۳ از این آر بیش تری برخوردار است. دلیل این عمر حساسیت تعددی طراحی شده حسگر در این ناحیه بسامدی می باشد.



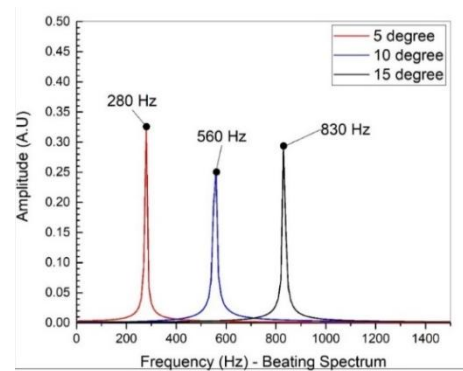
شکل ۱۶ (الف) علامت زمانی و بسامدی دریافتی توسط حسگر شماره ۱ در بسامد ۵۳ کیلوهرتز، (ب) علامت زمانی و بسامدی دریافتی توسط حسگر شماره ۱ در بسامد ۱۸۸ کیلوهرتز.

در مرحله بعدی، پاسخ بسامدی حسگر به صورتی که در شکل ۱۷ مشاهده می شود، اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری پاسخ بسامدی حسگر فابری- پرو بسامد تولید موج صوتی روی بازه ۲۰ تا ۲۳۰ کیلوهرتز با گام ۲ کیلوهرتز جاروب شده و به طور هم زمان علامت خروجی حسگر مورد آشکارسازی قرار گرفته است. سپس به نمودار داده های این آزمایش، یک تابع چند جمله ای مطابق شکل ۱۷ برازش شده است. از نمودار می توان برداشت کرد که

دیافراگم به صورت شبه تخت در نظر گرفته شدند دارای جبهه موج متقارن بوده و این موجب عدم برقراری شرط تطبیق فازی و نتیجتاً عدم برانگیختگی این مدها را شامل می شود. این مسئله برای مهندسی این ساختار در عمل نکته مثبتی شناخته می شود. از آن جهت که محدوده قابل توجهی از بسامد حسگر (حدود ۲۰۰-۸۰۰ هرتز)، از خود عدم حساسیت نشان می دهد.

۳-۲. تصدیق علامت زنش حسگر

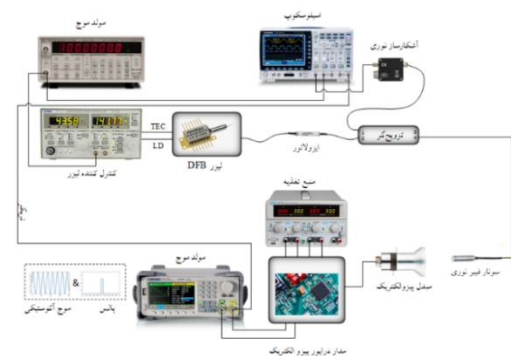
اختلاف فازهای اولیه حسگر متناظر با طول کاواک های متفاوت می باشد. نمودار شکل ۱۴ نشان دهنده تناظر یک به یک بین اندازه کاواک طراحی شده برای حسگر و بسامد علامت زنش خروجی از آن بر مبنای معادله (۶) است.



شکل ۱۴ بسامدهای زنش مربوط به حسگرها با فازهای اولیه متفاوت (طول کاواک های متفاوت).

۳-۳. اندازه گیری موج صوتی توسط حسگر

پس از آماده سازی حسگر، چیدمان شکل ۱۵ برای آزمایش جهت کالیبره کردن حسگر مربوطه برپا می شود.



شکل ۱۵ طرحواره چیدمان آزمایش سونار الیاف نوری تحت امواج صوتی.

حسگر فابری- پرو مطابق ذیل محاسبه می‌شود:

$$\frac{0.2 \times 10^{-7} \text{ V}}{3185 \text{ Pa}} = 6.28 \frac{\mu\text{V}}{\text{Pa}} \quad (15)$$

در نهایت با داشتن مقدار حساسیت به دست آمده در معادله (۱۵) و میزان نوفه پایه در اِفاِتی^۲ علامت خروجی حسگر می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه اِل‌اِدی^۳ حسگر فابری- پرو استفاده کرد:

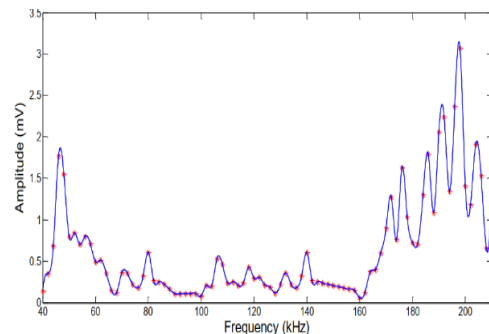
$$\text{LOD} = \frac{\text{noise floor}}{\text{sensitivity}} = \frac{5 \times 10^{-5}}{6.27 \times 10^{-8}} = 797 \text{ Pa} \quad (16)$$

چالش‌ها و افق‌های گسترش طراحی و پیاده‌سازی این سونار با استفاده از تحلیل ویولت به جای تحلیل فوریه، برای شرایطی است که پاسخ‌های زمانی دریافتی کافی از حسگر داده جهت تحلیل بسامدی را فراهم نکند. بنابراین تحلیل ویولت می‌توان مشخصه بسامدی- زمانی علامت‌های مدنظر مربوط به موج‌های صوتی ساطع شده شیء ردیابی‌شونده خاص را به صورت کتابخانه‌ای طبقه‌بندی و استفاده نمود که به آن هوش صوتی گویند. یکی دیگر از زمینه‌های قابل گسترش در این پروژه، آرایه‌سازی حسگر الیاف نوری فابری- پرو جهت تشخیص جبهه موج فرودی هست. با تشخیص جبهه موج فرودی توسط آرایه حسگری، این امکان وجود دارد که علاوه بر ردیابی شیء مورد نظر می‌توان در رابطه مکان، زاویه و شکل آن نسبت به مبدأ اندازه‌گیری اطلاعات دقیقی به دست آورد. از طرفی حسگر سونار طراحی شده حاضر این قابلیت را دارد که بدون نیاز به افزودن تعداد لیزر و آشکارساز، به روش مدولاسیون بسامدی آرایه‌سازی شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی ساخت یک حسگر سونار جهت ردیابی با بسامد ردیابی حدود ۲۰۰ هرتز پرداخته شده است. با توجه به مباحث مطرح شده در رابطه با فن‌آوری نوین حسگر الیاف نوری و نتایج ارائه شده، این امر آشکار می‌گردد که این حسگر الیاف نوری فابری- پرو تلفیق شده با ساختار دیافراگمی پی‌دی‌ام‌اس از حساسیت مناسب‌تری نسبت به فن‌آوری‌های قدیمی‌تر در این زمینه مانند پیزوالکتریک جهت آشکارسازی امواج صوتی در محدوده

در گسترده بین ۱۹۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز بازآوایش (رزونانس) رخ داده است.



شکل ۱۷ پاسخ بسامدی سونار الیاف نوری فابری- پرو در گستره بین ۴۰ تا ۲۳۰ کیلوهرتز.

۳-۴. محاسبه حساسیت و حد اندازه‌گیری حسگر

برای محاسبه حساسیت حسگر، یک بسامد مشخص (ترجیحاً بسامدی با کوچک‌ترین سطح ولتاژ در طیف خروجی) انتخاب شده و با استفاده از نمودار پاسخ بسامدی مبدل پی‌زدتی^۱، مقدار فشار خروجی مبدل در آن بسامد بر حسب پاسکال محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن اتلاف موج صوتی در مسیر انتشار، میزان فشار وارد شونده به حسگر مورد نظر به دست می‌آید. با داشتن میزان ولتاژ خروجی حسگر در آن بسامد خاص می‌توان حساسیت حسگر را محاسبه نمود.

همان‌طور که از طیف پاسخ بسامدی حسگر فابری- پرو در شکل ۱۷ مشخص است، کم‌ترین ولتاژ اندازه‌گیری شده در بازه بسامدی کاری مبدل پی‌زدتی (۱۶۰ تا ۲۳۵ کیلوهرتز) مربوط به بسامد ۱۶۰ کیلوهرتز به اندازه ۰.۲ میلی‌ولت می‌باشد. با مراجعه به نمودار پاسخ بسامدی مبدل پی‌زدتی واقع در جدول داده‌های آن، مقدار حساسیت انتقالی مبدل ۱۵۲ دسی‌بل می‌باشد. از طرفی با توجه به توضیحی که در همان جدول آمده است مقدار صفر دسی‌بل برابر با حساسیت در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری می‌باشد. از آنجایی که ولتاژی اعمالی به مبدل پی‌زدتی معادل ۸ ولت و فاصله بین آن و حسگر معادل ۱۰ سانتی‌متر بوده است، میزان فشار اعمالی به حسگر برابر ۳۱۸۵ پاسکال می‌باشد. بنابراین حساسیت

^۲ FFT

^۳ LOD

^۱ PZT

- [5] H. Moravec, A. Elfes, "High resolution maps from wide angle sonar," IEEE, 2021.
- [6] G. Rajan, "Optical Fiber Sensors: Advanced techniques and Applications," CRC press, 2017
- [7] X. Zhang, W. Wang, H. Chen, Y. Tang, Z. Ma, K. Wang, "Two-parameter elliptical fitting method for short-cavity fiber Fabry-Perot sensor interrogation," Sensors, vol. 19, no. 1, pp. 36, 2019.
- [8] J. Eom, C.J. Park, B.H. Lee, J.S. Lee, "Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor based on lensed fiber and polymeric diaphragm," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 225: pp. 25-32. 2015.
- [9] J. Zheng, "Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference," Applied optics, vol. 43, no. 21, pp. 4189-4198. 2004.
- [10] R. Jaros, J. Nedoma, S. Kepak, R. Martinek, "Fibre-optic interferometry based heart rate monitoring," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, 2022.

مذکور برخوردار است. حساسیت به دست آمده برای حسگر نامبرده معادل 0.10628 میکروولت بر پاسکال است، که با توجه به روش پردازش علامت متناسبی که برای استخراج فاز و بازیابی علامت صوتی فرودی به این حسگر بوده، در نظر گرفته شده است. این نتایج حاکی از آن است که سونار طراحی شده بر پایه حسگر الیاف نوری فابری-پرو تلفیق شده با ساختار دیافراگمی به همراه روش پردازش علامت اِف اِم سی دابلینو قابلیت تشخیص بسامد علامت انتشاری که حدود 200 هرتز می باشد، را دارد. علاوه بر آن، روش طراحی و ساخت این حسگر سونار به گونه ای است که می توان با مهندسی ساختار هندسی دیافراگم و کاواک آن بسامد پاسخ گویی را مطابق با نیاز تغییر داد. این حسگر را می توان با انتخاب لیزری با طول موج مخابراتی و تک بسامد مانند لیزرهای دی اِف بی با سامانه برگشتی پی آی دی^۱ جهت کنترل دمایی آن و به همراه یک آشکارسازی نوری متداول جهت پیاده سازی سونار به کار برد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر اسماعیل زارع زاده از دانشگاه پدافند هوایی که در بخش اندازه گیری، یاری رساندند تقدیر و سپاسگزاری به عمل می آورند.

تضاد منافع

این مطالعه تضاد منافع ندارد.

فهرست منابع

- [1] A. Farhat, "Classification of Crash Warning Level in Forward Collision Mitigation Systems," Dissertation of Oakland University, 2021.
- [2] M. Duggin, "Introduction to remote sensing," International Journal of Remote Sensing, vol. 14, no. 3, pp. 600-600, 1993.
- [3] R. Hansen, "Introduction to Sonar," Physics, 2009.
- [4] V. dos Santos Mello, N. Nunes de Moura, J. Manoel de Seixas, "Novelty Detection in Passive Sonar Systems using Stacked AutoEncoders," IEEE, 2021.

¹ PID