



Narrowband Active Noise Control in A Duct Using the FxLms Method by Means of An AVR Microcontroller

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tahvilian E.¹
Iranpour M.¹,
Loghmani A.^{1*}

How to cite this article

Tahvilian E, Iranpour M, Loghmani A, Narrowband active noise control in a duct using the FxLMS method by means of an AVR microcontroller. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(09):625-635.

¹ Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
P.O.Box: 84156-83111
a.loghmani@iut.ac.ir

Article History

Received: April 20, 2022
Accepted: July 24, 2022
ePublished: September 28, 2022

ABSTRACT

Low-cost and highly effective noise reduction has recently become one of the substantial challenges for industrial manufacturers. This paper presents the design and construction of a cost-effective system for attenuating single-frequency annoying noise generated from industrial products and machines. To achieve this goal, narrowband active noise control using Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) method has been used with the help of a two-factor digital adaptive filter, called the adaptive notch filter. Therefore, a duct structure has been designed, and experimental tests have been performed. To reduce implementation costs, the Arduino Uno board, which has an AVR microcontroller (ATmega328P), has been used as the controller. About 15dB noise attenuation at 400Hz and 750Hz frequencies and about 30dB noise attenuation at 650Hz and 950Hz frequencies have been achieved. Then, active noise control for two separate and simultaneous frequencies was performed, which had somewhat effective results, and in one of these frequencies, noise attenuation of about 18dB was observed.

Keywords Active Noise Control, FxLMS, Adaptive Notch Filter, AVR, Arduino Uno

CITATION LINKS

[1] Ambient Noise Is “The New Secondhand Smoke”. [2] What is the evidence on existing policies and... [3] Environmental noise in Europe. [4] Recent progress in acoustic materials and noise control strategies—A review. [5] Improvement of the low-frequency sound insulation of the poroelastic aerospace constructions... [6] Active noise control. [7] Active noise control: a tutorial review. [8] Radiated sound control from a smart cylinder subjected to piezoelectric uncertainties... [9] A robust optimum controller for suppressing radiated sound from an intelligent cylinder... [10] Hybrid control technique for vibroacoustic performance analysis of a smart doubly curved sandwich structure... [11] Process of silencing sound oscillations [12] Adaptive signal processing. [13] Active noise control systems. [14] An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path. [15] Stochastic analysis of the FXLMS-based narrowband active noise control system. [16] Properties of FXLMS-based narrowband active noise control with online secondary-path modeling. [17] Convergence analysis of narrowband active noise equalizer system... [18] Recent advances in active noise control inside automobile cabins... [19] Robust active noise control in a car cabin... [20] In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise. [21] Robust active noise control in the loadmaster area of a military transport aircraft. [22] Listening in a noisy environment: Integration of active noise control in audio products. [23] Active noise control system for headphone applications. [24] On selecting sensor and actuator locations for anc in ducts. [25] Active noise control of sound wave in a one-dimensional duct. [26] Active noise control in a duct to cancel broadband noise. [27] A Duct Based Experimental Setup for Active Noise Control. [28] An algorithm for designing a broadband active sound control system. [29] Design of active noise control systems with the TMS320 family. [30] Implementing a single channel active adaptive noise canceller with the TMS320C50 DSP starter kit. [31] FPGA-based implementation of an active vibration controller. [32] Active reduction of high-level acoustic noise on a fMRI test-bed using labview and FPGA platforms. [33] Multiple parallel branch with folding architecture... [34] Practical implementation of multichannel filtered-x least mean square algorithm based on the multiple-parallel-branch with folding architecture...

کنترل فعال نویز باندباریک در یک کانال به روش FxLMS بر پایه‌ی ریزکنترل‌کننده‌ی AVR

احسان تحویلیان^۱، میلاد ایرنپور^۱، علی لقمانی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

کاهش نویز با صرف کمترین هزینه و با بالاترین بازده اخیراً به یکی از چالش‌های اساسی برای تولیدکنندگان صنعتی تبدیل شده است. در این مقاله به طراحی و ساخت سامانه‌ای مقرون به صرفه برای کاهش نویز تک بسامد و مزاحم که از محصولات و ماشین‌آلات صنعتی تولید می‌شود، پرداخته شده است. برای دستیابی به این هدف، از کنترل فعال نویز باندباریک به روش FxLMS با کمک فیلتر تطبیقی دیجیتال با دو ضریب، به نام فیلتر شکافی تطبیقی، استفاده شده است. برای آزمون عملکرد الگوریتم پیشنهادی، سازه‌ای به صورت کانال طراحی شده و پیاده‌سازی‌های مورد نظر بر روی آن انجام شده است. همچنین به منظور کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی، برد آردوینو یونو (Arduino Uno) که دارای یک ریزکنترل‌کننده AVR (ATmega328P) است، به عنوان هسته پیاده‌سازی الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. پس از پیاده‌سازی الگوریتم مذکور بر روی این مجموعه، تا حدود ۱۵ دسی‌بل در بسامدهای ۴۰۰ هرتز و ۷۵۰ هرتز و تا حدود ۳۰ دسی‌بل در بسامدهای ۶۵۰ هرتز و ۹۵۰ هرتز، کاهش نویز مشاهده شده است. همچنین پیاده‌سازی این الگوریتم برای کاهش نویز در دو بسامد به صورت هم‌زمان نیز انجام شده که نتایج تقریباً اثربخشی داشته و در یکی از این بسامدها تا حدود ۱۸ هرتز کاهش نویز مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: کنترل فعال نویز، FxLMS، فیلتر شکافی تطبیقی، AVR، آردوینو یونو

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

*نویسنده مسئول: a.loghmani@iut.ac.ir

۱- مقدمه

با صنعتی شدن جوامع بشری نویزهای آکوستیکی زیادی توسط تجهیزات و ماشین‌آلات ایجاد شده که کیفیت زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده و محققان محیط‌زیست آن را آلودگی ثانویه نامیده‌اند^[۱]. سازمان جهانی بهداشت نیز در گزارش‌های اخیرش^[۲,۳]، خطرات ناشی از آلودگی صوتی همچون بیماری‌های قلبی، اختلالات روانی-شناختی، و مرگ‌ومیر زودرس را به وضوح بیان کرده است. به همین منظور، کاهش نویز در تجهیزات تولیدی، از الزامات بسیاری از استانداردها می‌باشد و امروزه به موضوعی برای رقابت بین سازندگان مختلف تبدیل شده است.

نویز تولیدی از تجهیزات می‌تواند دارای محتوای بسامد بالا (بیشتر از ۱ کیلوهرتز) و همچنین محتوای بسامد پایین (کمتر از ۱ کیلوهرتز) باشد. در یکی از روش‌های کنترل نویز، که روش غیرفعال نام دارد، محتوای بسامد بالا را با استفاده از مواد جاذب صوتی حذف می‌کنند^[۴]. این مواد جاذب معمولاً مواد متخلخل هستند که صوت با برخورد به آن‌ها، به صورت گرما تبدیل شده و تلف

می‌شود^[۵]. اثربخشی این روش زمانی قابل‌توجه و مؤثر واقع می‌شود که با توجه به طول موج صوت، ضخامت جاذب به میزان قابل قبولی باشد. بنابراین با نزدیک شدن به بسامدهای پایین، طول موج افزایش یافته و استفاده از این روش به دلیل مشکلاتی همچون کمبود فضا و افزایش هزینه‌های تمام شده، مناسب نیست.

با توجه به مشکلات گفته شده، حذف محتوای بسامد پایین، با استفاده از روش کنترل فعال امکان‌پذیر است^[۶,۷]. این روش به دو دسته‌ی کنترل فعال آکوستیک سازه‌ای و کنترل فعال نویز تقسیم می‌شود. در کنترل فعال آکوستیک سازه‌ای، با استفاده از حسگرها و عملگرهایی که بر روی سازه نصب می‌شوند، به کمک ارتعاشات، نویز انتشاری از سازه کنترل می‌شود^[۸-۱۰]. در روش کنترل فعال نویز، با استفاده از میکروفن و بلندگو، فرآیند کاهش صوت مزاحم انجام می‌شود. این روش ابتدا توسط پائول لگ به واسطه‌ی یک ثبت اختراع در سال ۱۹۶۳ مورد توجه قرار گرفت^[۱۱]. پیاده‌سازی این روش بر مبنای تولید صوتی با ۱۸۰° اختلاف فاز و مخالف با نویز مورد نظر برای حذف و ایجاد برهم‌نهی مخرب آن با نویز، استوار شده است. با توجه به اینکه نویز تولیدی از منبع با زمان تغییر می‌کند، کنترل‌کننده و الگوریتم کنترلی مورد استفاده باید تطبیقی‌پذیر باشد^[۱۲]. روش Filtered-x Least Mean Square (FxLMS)^[۱۳,۱۴] یکی از الگوریتم‌های معروفی است که به دلیل سادگی و مقاوم بودن در مقابل اغتشاشات، مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته است.

یکی از کاربردهای گسترده‌ی روش کنترلی FxLMS حذف نویزهای باندباریک شامل یک یا چند تک بسامد است^[۱۵-۱۷]. چنین نویزی معمولاً از تجهیزاتی که دارای بخش مکانیکی دوار هستند، مانند کمپرسورها، موتورها، ژنراتورها و غیره، تولید می‌شود. به دلیل هارمونیک بودن نویز تولیدی توسط این گونه از تجهیزات، کنترل آن‌ها از طریق روش فعال یکی از بهترین و مؤثرترین روش‌ها است. گسترش روش‌های مختلف کنترل فعال صوت موجب به کارگیری و تولید محصولات بهینه در بسیاری از زمینه‌ها همچون تولید کنترل نویز داخل اتومبیل‌ها^[۱۸,۱۹] و هواپیما^[۲۰,۲۱]، هدفون‌های هوشمند با قابلیت حذف نویز خارجی^[۲۲,۲۳]، و همچنین حذف نویز در کانال‌های هوایی^[۲۴-۲۸] شده است. پیاده‌سازی کنترل فعال صوت در کانال‌های هوایی یکی از پرکاربردترین و ساده‌ترین روش‌های حذف نویز باندباریک^[۲۴,۲۵] و همچنین نویز باندپهن^[۲۶-۲۸] می‌باشد. در این مقاله نیز از همین مدل برای حذف نویز باندباریک استفاده شده است.

پیاده‌سازی کنترل فعال صوت با استفاده از الگوریتم FxLMS به کمک سخت‌افزارهایی که سرعت بالایی در محاسبه دامنه و فاز سیگنال نویز مخالف دارند، انجام می‌پذیرد. این سخت‌افزارها به صورت کلی به سه دسته‌ی پردازنده سیگنال دیجیتال، واحد ریزکنترل‌کننده، و برد اف پی جی ای (FPGA) تقسیم می‌شوند. به

تطبیقی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، معرفی شده‌اند. روش ایجاد مولد سیگنال سینوسی به منظور تولید نویز و شناسایی سامانه توسط بورد آردوینو یونو در بخش ۳ شرح داده شده و سامانه مورد استفاده برای پیاده‌سازی به همراه تمام مدارها در بخش ۴ معرفی شده‌اند. در بخش ۵ نیز نتایج پیاده‌سازی شناسایی سیستم، کنترل فعال نویز تک بسامد و دو بسامد به روش FxLMS توسط بورد آردوینو یونو نمایش داده شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در نهایت، نتیجه‌گیری این پژوهش در بخش ۶ خلاصه شده‌است.

۲- فرمول‌بندی کنترل فعال نویز باند باریک به روش FxLMS

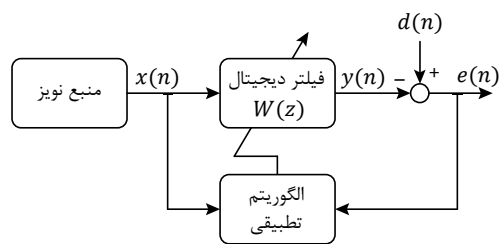
بر مبنای فیلتر شکافی

به منظور آشنایی با روابط و اصول حاکم بر الگوریتم مورد استفاده برای کنترل فعال نویز، در این بخش ابتدا به معرفی ساختار و دو جزء اصلی فیلتر تطبیقی پرداخته شده است. سپس فیلترهای FIR (Finite Impulse Response) به عنوان دسته‌ای از فیلترهای دیجیتال و الگوریتم FxLMS به عنوان یکی از الگوریتم‌های تطبیقی معرفی و روابط حاکم بر آن بیان شده است. در انتها ساختار فیلتر شکافی تطبیقی به منظور حذف نویزهای یک یا چند بسامدی بیان شده و در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۱- فیلترهای تطبیقی

کنترل فعال نویز معمولاً بر مبنای استفاده از فیلترهای تطبیقی پیاده‌سازی می‌شود^[13]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این فیلترها از دو قسمت اصلی فیلتر دیجیتال و الگوریتم تطبیقی تشکیل شده است. فیلتر دیجیتال، به منظور پیاده‌سازی پردازش سیگنال مورد نظر برای تبدیل سیگنال ورودی $x(n)$ به سیگنال خروجی $y(n)$ ، که باید به سیگنال دلخواه $d(n)$ همگرا شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین الگوریتم تطبیقی نیز به منظور به‌روزرسانی ضرایب فیلتر دیجیتال، $W(z)$ ، با استفاده از سیگنال خطا، $e(n)$ ، استفاده می‌شود.

فیلترهای دیجیتال نیز معمولاً به صورت فیلترهای FIR هستند که ساختار آنها تنها از صفر تشکیل شده‌است. این فیلتر در ساختارهای حلقه بسته پایداری سامانه را تا حد امکان حفظ می‌کند. فیلترهای FIR دارای L ضریب با نام‌های $w_l(n)$ ، $(l = 0, 1, \dots, L-1)$ می‌باشد که تعداد آنها طول فیلتر را مشخص می‌کند. این ضرایب متغیر با زمان بوده و توسط الگوریتم تطبیقی به‌روزرسانی می‌شود.



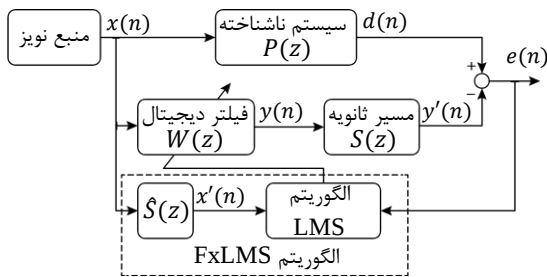
شکل ۱) نمودار بلوکی یک فیلتر تطبیقی

عنوان مثال، کو و همکارانش^[29] و همچنین بوچر و همکارانش^[30] به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ موفق شدند روش کنترل فعال صوت را به کمک خانواده‌ی ریز پردازنده‌های دیجیتال TMS320 پیاده‌سازی کنند.

از بین سخت‌افزارهای معرفی شده، بوردهای توسعه‌ی إف پی جی ای قدرتمندترین سخت‌افزار برای پیاده‌سازی کنترل فعال صوت هستند. لوا و پیرودی^[31] در سال ۲۰۰۸ به منظور کنترل ارتعاش یک پمپ خلاء توربومولکولی، روش کنترل فعال صوت و ارتعاشات را با استفاده از یک بورد توسعه‌ی إف پی جی ای از خانواده‌ی CRIO ساخته شرکت نشنال اینسترومنت (National Instrument) پیاده‌سازی کردند. رامچاندرن و همکارانش^[32] نیز با ساخت یک سیستم کنترل فعال صوت مبتنی بر بورد إف پی جی ای در تونل شبیه‌سازی شده از فرایند إف إم آر آی (fMRI)، موفق به کاهش ۱۵ تا ۴۵ دسی‌بل از نویز تولیدی با بسامد ۱۰۰ هرتز تا ۵۰۰۰ هرتز شدند. شی و همکارانش^[33,34] نیز به منظور بهره‌گیری از سرعت پردازش بالا برای تعداد محاسبات زیاد در پیاده‌سازی الگوریتم FxLMS چند کاناله، از بورد توسعه‌ی إف پی جی ای استفاده کردند. با توجه به توانایی و سرعت پردازش بالای بوردهای توسعه‌ی إف پی جی ای در کاربردهای پیچیده همچون کنترل فعال صوت چند کاناله، هزینه‌ی بالای این دسته از بوردها و همچنین پیچیدگی برنامه‌نویسی در آنها، از قابلیت پیاده‌سازی آنها در کاربردهای نسبتاً ساده همچون کنترل فعال صوت تک کاناله، کاسته است.

به طور خلاصه، پیاده‌سازی کنترل فعال نویز نیاز به تجهیزات و کنترل‌کننده‌های پیشرفته‌ای دارد که موجب به وجود آمدن هزینه‌های بالا می‌شود. بنابراین سازندگان همواره برای کاهش این هزینه‌ها در تلاش هستند. برای اقتصادی بودن استفاده از روش کنترل فعال، نیاز است که از پردازنده‌های ارزان قیمت برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی استفاده کرد ولی چالش‌هایی از جمله سرعت پردازش پایین وجود دارد که ممکن است بازدهی این روش‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله به منظور قدمی مؤثر در راستای رسیدن به هدف مذکور، به پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی FxLMS باندباریک توسط ریزکنترل‌کننده‌ی إف وی آر (AVR) با بهره‌گیری از بورد ارزان قیمت آردوینو یونو (Arduino Uno) درون یک کانال پرداخته شده است. لذا به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت پردازش، از روابط بازگشتی به منظور تولید سیگنال سینوسی استفاده شده و به کمک ساده‌سازی، روابط کانولوشنی برای عبور سیگنال از مسیر ثانویه، به صورت مجموع دو جمله ضربی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین این امر باعث ایجاد کمترین تعداد عمل‌گرهای محاسباتی و در نتیجه افزایش سرعت پردازش شده است.

ساختار کلی مقاله در ادامه آورده شده است. در بخش ۲ به بررسی مفاهیم پایه‌ای همچون کنترل فعال نویز و فیلترهای تطبیقی پرداخته شده است و سپس الگوریتم FxLMS و فیلترهای شکافی



شکل ۲) سامانه کنترل فعال نویز با بهره‌گیری از الگوریتم FxLMS

که در این رابطه، $\hat{s}(n)$ پاسخ ضربه سامانه تخمینی $\hat{S}(z)$ می‌باشد.

۳-۲- فیلتر شکافی تطبیقی

یکی از کاربردهای کنترل فعال نویز، حذف نویز مزاحم باندباریک یا نویزهایی حاوی محتوای تک بسامدی می‌باشد. منشأ تولید این‌گونه از نویزها، عمدتاً سامانه‌های دوار هستند. نویز مزاحم تولیدی توسط این سامانه‌های دوار از نوع سیگنال‌های متناوب است. بنابراین با فرض اینکه بسامد سیگنال مزاحم (از طریق یک سنسور ارتعاشی یا با استفاده از پردازش سیگنال) برای ما آشکار است، می‌توان بدون استفاده از میکروفن مرجع و با استفاده از مولدهای سیگنال سینوسی و کسینوسی که حاوی همان بسامد نویز مزاحم هستند، اثر آن را حذف کرد [13].

هنگامی که هدف اصلی سامانه کنترلی، حذف نویز تک بسامد باشد، فیلتری با طول $L = 2$ با بازدهی بالا به خوبی می‌تواند ما را به هدف خود نزدیک کند. فیلترهای شکافی نوعی از همین فیلترها هستند که در این کاربرد خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. ورودی این فیلترها همان سیگنال‌های هارمونیک سینوسی و کسینوسی است. لازم به ذکر است که بازدهی این فیلتر و قدرت هم‌گرایی ضرایب آن، زمانی به بیشترین مقدار می‌رسد که دو سیگنال ورودی به فیلتر شکافی دقیقاً 90° اختلاف فاز داشته و بر هم عمود باشند. نمونه‌ای از نمودار بلوکی یک فیلتر شکافی در سامانه کنترل فعال نویز باندباریک با استفاده از الگوریتم FxLMS در شکل ۳ قابل مشاهده است. در این پروژه به کمک حافظه موجود در برد آردوینو یونو و ایجاد تأخیر در سیگنال سینوسی، از نمونه‌های زمانی قبلی آن به عنوان سیگنال کسینوسی استفاده می‌شود.

با توجه به آنچه گفته شد، سیگنال نویز تک بسامد $d(n)$ را می‌توان به صورت $d(n) = A_d \sin(\omega_0 T_s n + \phi_d)$ در نظر گرفت که ω_0 بسامد مرجع، T_s زمان نمونه برداری، ϕ_d فاز سیگنال نویز، و A_d دامنه‌ی سیگنال نویز است. با توجه به اینکه این سیگنال را می‌توان به صورت ترکیب دو مؤلفه سینوسی و کسینوسی نوشت، با توجه به شکل ۳، سیگنال خروجی از فیلتر تطبیقی، مطابق رابطه ۷ به‌دست می‌آید.

$$y(n) = w_0(n)x_0(n) + w_1(n)x_1(n) \quad (۷)$$

که در این رابطه، $x_0(n) = \sin(\omega_0 T_s n)$ ، $x_1(n) = \cos(\omega_0 T_s n)$ ، و

$$x(n) \equiv [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T \quad (۱)$$

$$w(n) \equiv [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T \quad (۲)$$

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) = w^T(n)x(n) \quad (۳)$$

اگر مجموعه داده‌های ورودی را به صورت رابطه ۱ و مجموعه ضرایب فیلتر را به صورت رابطه ۲ در نظر بگیریم، سیگنال خروجی از این فیلتر دیجیتال، توسط رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

۲-۲- کنترل فعال نویز به روش FxLMS

الگوریتم FxLMS یکی از انواع الگوریتم‌های تطبیقی به منظور تکمیل و پیاده‌سازی فیلتر تطبیقی است [13,14]. طرح‌واره کلی این الگوریتم در نمودار بلوکی شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، $x(n)$ سیگنال تولیدی از منبع نویز، $d(n)$ سیگنال نویز مزاحم پس از عبور از سامانه ناشناخته $P(z)$ ، $y(n)$ سیگنال خروجی از فیلتر تطبیقی، و $e(n)$ سیگنال خطای به وجود آمده از برهم‌کنش نویز مزاحم و صوت تولیدی از بلندگوی کنترلی است. هدف از به‌کارگیری این فرایند کنترلی، نزدیک شدن سیگنال $y(n)$ به سیگنال $d(n)$ و همگرایی سیگنال خطای $e(n)$ به مقدار صفر است. سیگنال خطا به صورتی که در ادامه می‌آید محاسبه می‌شود:

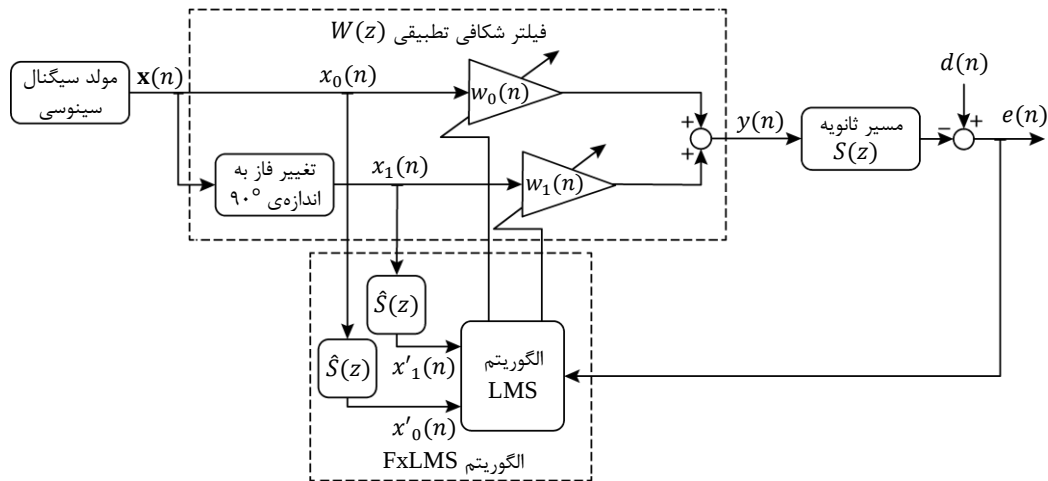
$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - y'(n) \\ &= d(n) - s(n) * y(n) \\ &= d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \end{aligned} \quad (۴)$$

که در این رابطه، $s(n)$ پاسخ ضربه سامانه $S(z)$ ، علامت * نیز نشان‌دهنده کانولوشن خطی، و بلوک $S(z)$ تابع تبدیل مربوط به مسیر ثانویه است. منظور از مسیر ثانویه، تابع تبدیل مسیر خروجی کنترل‌کننده تا میکروفن خطا، شامل مدارهای الکترونیکی تقویت‌کننده بلندگو، فیلتر، پیش‌تقویت‌کننده میکروفن، و مسیر آکوستیکی بین بلندگو تا میکروفن است. روش Filtered-x Least Mean Square یا همان FxLMS، راهکاری برای حذف اثر این مسیر ثانویه برای به‌کارگیری فرمول‌بندی مرسوم الگوریتم LMS است [13]. مطابق با کلیت این روش، بلوکی به نام $\hat{S}(z)$ ، که تخمینی از همان مسیر ثانویه است، در مسیر سیگنال $x(n)$ ورودی به الگوریتم تطبیقی LMS قرار می‌گیرد و این سیگنال را فیلتر می‌کند. به‌دست آوردن تخمینی مناسب از این مسیر ثانویه نیز در ابتدای فرایند کنترلی و به طریق روش آفلاین به کمک همان الگوریتم LMS صورت می‌گیرد. در نهایت ضرایب فیلتر تطبیقی، از طریق الگوریتم FxLMS، به کمک رابطه ۵ محاسبه می‌شوند.

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (۵)$$

که در این رابطه، μ اندازه گام نام داشته و عددی بین صفر و یک است. لازم به ذکر است که این ضریب به توان سیگنال ورودی $x(n)$ و طول فیلتر تطبیقی وابسته است. بردار $x'(n)$ نیز مطابق رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (۶)$$



شکل ۳) نمودار بلوکی یک فیلتر شکافی در سیستم کنترل فعال نویز باندباریک با استفاده از الگوریتم FxLMS

بازگشتی از روش جدول مراجعه‌ای^[13] برتری یافته و مطابق رابطه ۱۲ برای تولید سیگنال سینوسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$x_s(n) = 2 \cos(\omega_0 T_s) x_s(n-1) - x_s(n-2) \quad (12)$$

که $x_s(n)$ سیگنال سینوسی تولیدی است که دارای مقادیر اولیه‌ای به صورت روابط ۱۳ می‌باشد.

$$x_s(0) = 0$$

$$x_s(1) = A \sin(\omega_0 T_s) \quad (13)$$

به‌طوری‌که A دامنه سیگنال سینوسی است.

همان‌طور که در بخش ۲-۳ اشاره شد، فیلتر شکافی مورد استفاده علاوه بر سیگنال سینوسی، به سیگنال کسینوسی نیز نیاز دارد. با توجه به شکل ۳، سیگنال‌های سینوسی و کسینوسی با 90° اختلاف فاز می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. به همین منظور در این پروژه برای ساخت سیگنال کسینوسی از تأخیر انداختن در سیگنال سینوسی استفاده شده است. سیگنال سینوسی تولید شده توسط رابطه ۱۲ در حافظه ریزکنترل‌کننده‌ی برد آردوینو یونو ذخیره شده و در پله‌های زمانی بعدی به عنوان سیگنال کسینوسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این ایده صرفه‌جویی زیادی در حجم محاسبات می‌شود.

۴- تجهیزات آزمایش تجربی

به منظور پیاده‌سازی روش کنترلی مورد نظر در این پروژه، یک سازه‌ی کانالی شکل به همراه مجموعه‌ای از مدارهای الکتریکی و الکترونیکی، طراحی و ساخته شده است. در این بخش ابتدا به معرفی ویژگی‌های ساختاری سازه کانالی شکل و سپس به معرفی ویژگی‌های مدارهای مورد استفاده، پرداخته شده است.

۴-۱- سازه کانالی شکل

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم مورد نظر برای کنترل فعال نویز باندباریک به روش FxLMS، کانال موجود در شکل ۴ ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. این سازه از لوله پلیکای ۱۱۰ (قطر لوله‌ها برابر ۱۱۰ میلی‌متر) ساخته شده است. همان‌طور که طرح‌واره

ضرایب $w_0(n)$ و $w_1(n)$ به ترتیب از روابط ۸ و ۹ قابل محاسبه هستند.

$$w_0(n+1) = w_0(n) + \mu x'_0(n) e(n) \quad (8)$$

$$w_1(n+1) = w_1(n) + \mu x'_1(n) e(n) \quad (9)$$

که در این روابط، سیگنال‌های $x'_0(n)$ و $x'_1(n)$ به ترتیب فیلتر شده سیگنال‌های $x_0(n)$ و $x_1(n)$ پس از عبور از بلوک تخمینی مسیر ثانویه هستند که به ترتیب به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند.

$$x'_0(n) = \hat{s} * x_0 = \hat{s}_0 x_0(n) + \hat{s}_1 x_0(n-1) \quad (10)$$

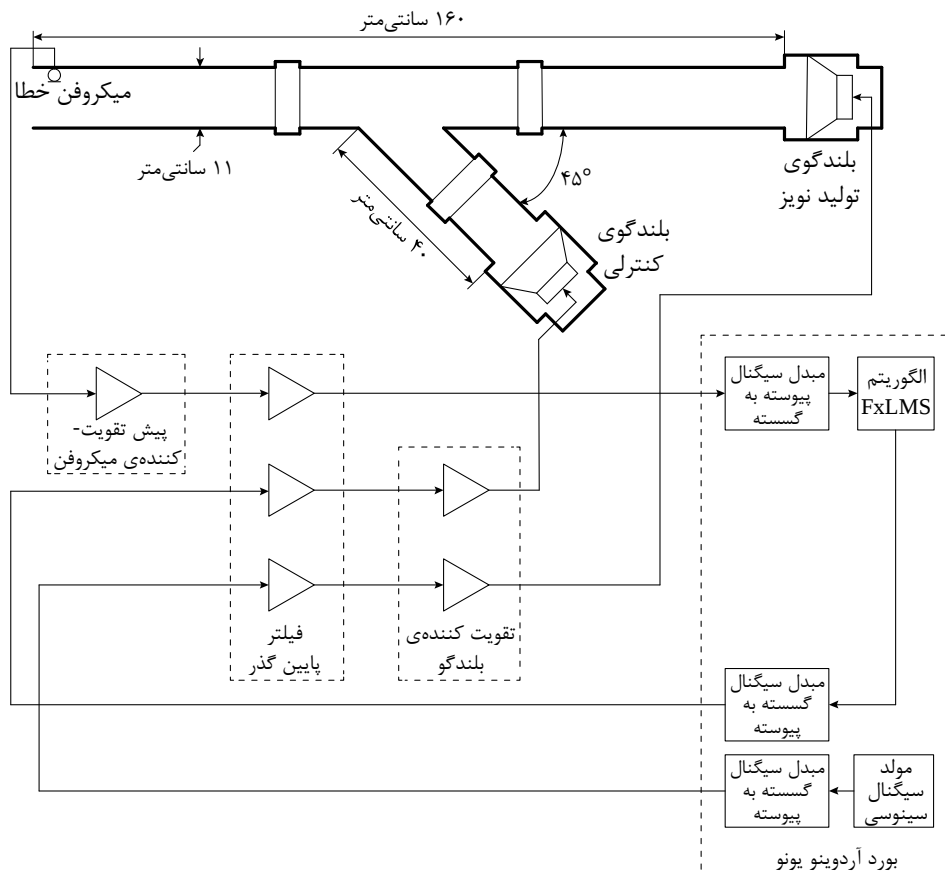
$$x'_1(n) = \hat{s} * x_1 = \hat{s}_0 x_1(n) + \hat{s}_1 x_1(n-1) \quad (11)$$

که در این روابط، $\hat{s}_0$ و $\hat{s}_1$ ضرایب تخمین زده شده مسیر ثانویه توسط الگوریتم LMS هستند.

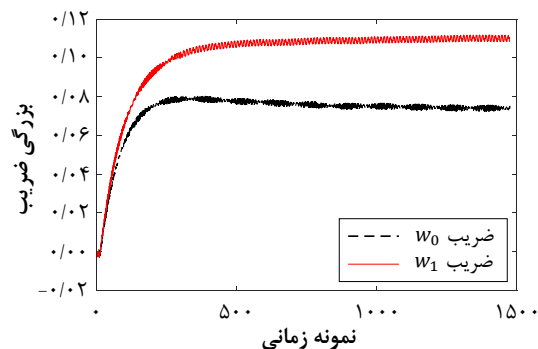
۳- شبیه‌سازی مولد سیگنال سینوسی در برد آردوینو یونو

یکی از محدودیت‌های مهم در استفاده از برد آردوینو یونو، محدودیت حافظه برای اجرای دستورات تعریف شده در ریزکنترل‌کننده موجود در این برد است. همان‌طور که در معرفی فیلتر شکافی بحث شد، سیگنال ورودی به این فیلتر، با آگاهی از بسامد نویز مزاحم، به صورت سینوسی با همان بسامد است. بنابراین استفاده از یک روش کارآمد برای به حداقل رساندن حجم محاسبات برای تولید این سیگنال توسط برد آردوینو یونو یکی از چالش‌های اساسی تلقی می‌شود. به همین منظور از قابلیت وقفه در ریزکنترل‌کننده موجود بر روی برد آردوینو یونو استفاده شده و دستورات تولید سیگنال سینوسی با زمان‌بندی مناسب اجرا می‌شوند. این محاسبات باید به قدری سریع انجام شوند که زمان اجرای کل دستورات، کمتر از زمان نمونه برداری سیگنال تولیدی باشد. این الزام به منظور اجرای به موقع کل دستورات موجود در وقفه و ایجاد بسامد دلخواه دقیق سیگنال است. بنابراین به منظور کاهش تعداد عملیات‌های محاسباتی در ریزکنترل‌کننده، روش

این سازه در شکل ۵ نشان داده شده است، طول کل کانال برابر با ۱۶۰ سانتی‌متر بوده و در ابتدای آن بلندگوی منبع نویز قرار دارد. بلندگوی کنترلی نیز توسط لوله‌ای به طول ۴۰ سانتی‌متر با زاویه‌ی ۴۵° نسبت به راستای لوله‌ی اصلی نصب شده است. امیدانس هر کدام از بلندگوها ۸ اهم و توان آن‌ها نیز برابر ۲ وات انتخاب شده است. یک میکروفن خازنی نیز به منظور دریافت سیگنال خطا بعد از تقاطع مسیر بلندگوی نویز و مسیر بلندگوی کنترلی در ادامه لوله نصب شده است.



ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس



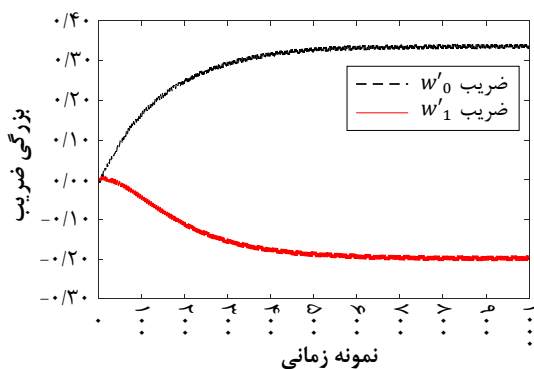
شکل ۷) نمودارهای تغییرات دو ضریب فیلتر شکافی و همگرایی آن‌ها در شناسایی سیستم ناشناخته برای بسامد ۴۰۰ هرتز

جدول ۱) مقادیر نهایی ضرایب فیلتر شکافی در فرایند شناسایی سیستم

بسامد (هرتز)	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰
ضریب w_0	۰/۵۴۶۲	۰/۵۰۵	۰/۱۲۷۴	۰/۱۷۶	-۰/۲۷۷۴	۰/۵۸۸۴	۰/۰۷۴۲
ضریب w_1	۰/۰۵۷۹	۰/۱۱۷۲	-۰/۳۱۲۵	۰/۴۰۷۸	-۰/۱۰۸۷	-۰/۵۰۶۴	۰/۱۱۰۱

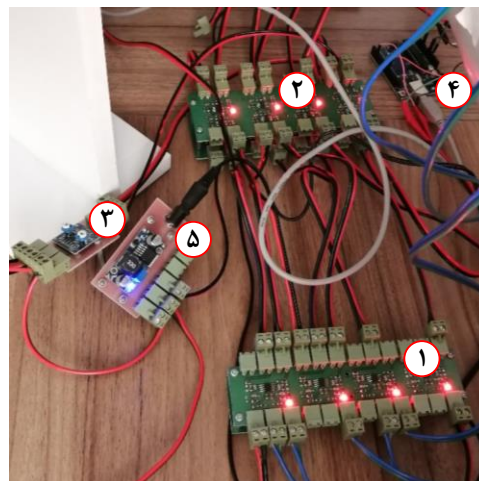
۵-۲- کنترل فعال نویز باندباریک تک بسامد

فرآیند کنترلی طوری برنامه نویسی شده است که پس از تعیین عوامل اصلی به ویژه بسامد مورد نظر و روشن کردن سامانه کنترلی، در ابتدا و در حدود ۶ ثانیه شناسایی سامانه انجام شده و ضرایب به دست آمده در متغیرهای w_0 و w_1 ذخیره شده تا در فرآیند الگوریتم FxLMS مورد استفاده قرار گیرند. سپس ضرایب الگوریتم FxLMS در متغیرهای w'_0 و w'_1 قرار گرفته و روند تغییرات آن‌ها تا همگرایی کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار شکل ۸ روند تغییرات و همگرایی این ضرایب را برای بسامد ۴۰۰ هرتز نشان می‌دهد.



شکل ۸) نمودار همگرایی ضرایب فیلتر شکافی در فرایند کنترل فعال نویز باندباریک تک بسامد با الگوریتم FxLMS برای بسامد ۴۰۰ هرتز

این سامانه برای بازه وسیعی از فرکانس‌های ۴۰۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز قابل پیاده‌سازی می‌باشد. رفتار و سرعت همگرایی این ضرایب بسته به بسامدهای مختلف، دارای واکنش‌های مختلفی بوده است. به طور مثال، در بسامد ۶۵۰ هرتز همگرایی ضرایب به سرعت رخ داده و این در حالی است که در بسامد ۷۵۰ هرتز ضرایب به کندی هم‌گرا می‌شوند.



شکل ۹) مجموعه‌ی مدارهای مورد استفاده: (۱) مدار پیش‌تقویت کننده میکروفن، (۲) مدار فیلتر پایین‌گذر مرتبه‌ی ۵ باتروورت با تحقق سلن-کی، (۳) مدار تقویت کننده بلندگو، (۴) برد آردوینو یونو، و (۵) مدار رگولاتور ولتاژ

۵- نتایج

در این بخش به بررسی نتایج به دست آمده در این پروژه، در قالب سه زیربخش، پرداخته شده است. در زیربخش اول، نتایج به دست آمده به منظور شناسایی و تخمین مسیر ثانویه و در زیربخش دوم، نتایج حاصل از کنترل فعال نویز تک بسامدی معرفی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. در زیر بخش آخر نیز به منظور سنجش میزان قدرت ریزکنترل کننده مورد استفاده، نتایج حاصل از کنترل فعال نویز برای دو تک بسامد به صورت هم‌زمان، بیان و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۱- تخمین مسیر ثانویه

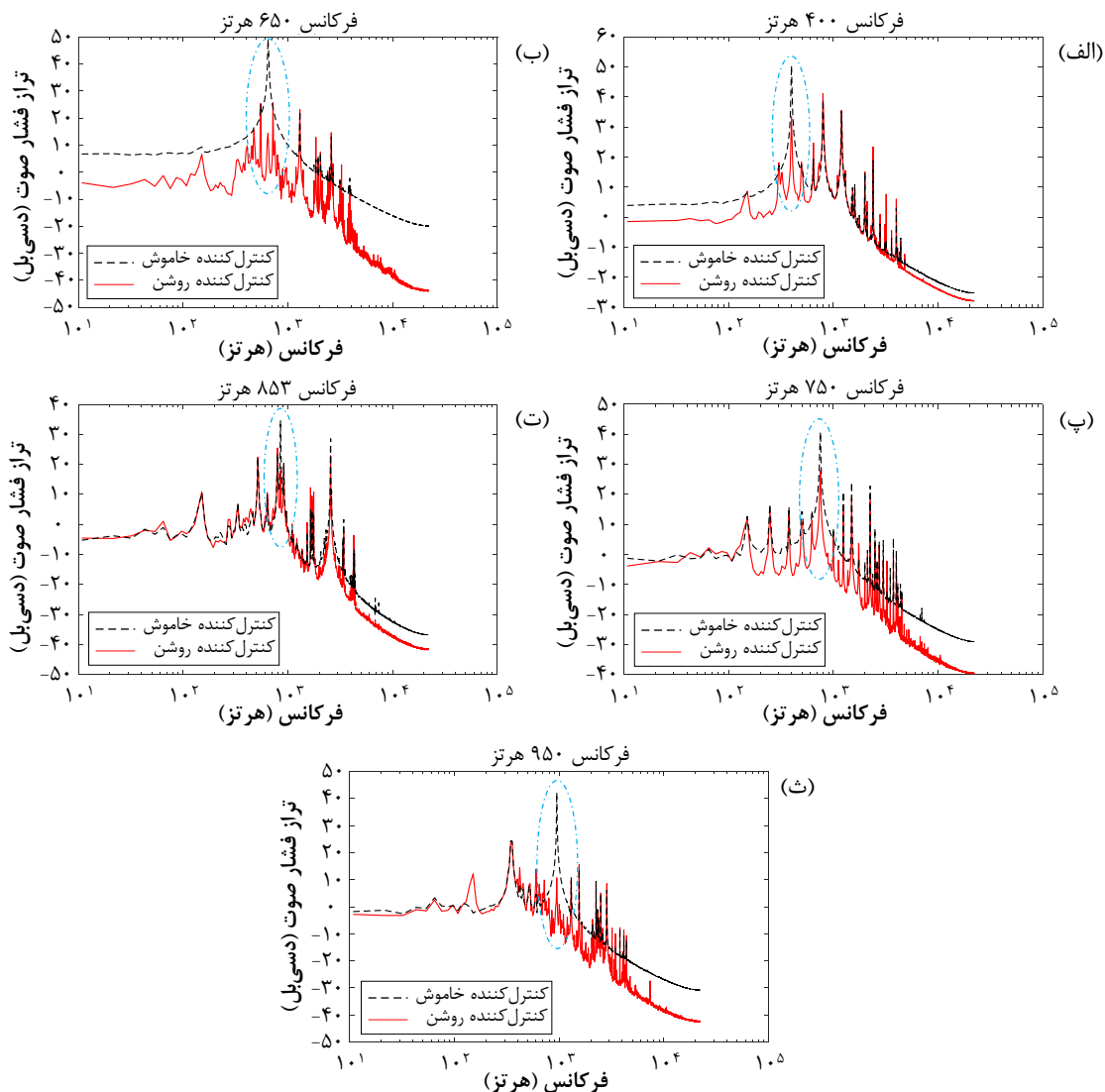
لازمه پیاده‌سازی الگوریتم FxLMS، شناسایی سامانه و تخمین مسیر ثانویه می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از کاربردهای الگوریتم LMS شناسایی سامانه‌های ناشناخته است، از این الگوریتم برای شناسایی سازه کانالی شکل استفاده شده است. لازم به ذکر است که تمام محاسبات این بخش توسط برد آردوینو یونو، که شامل یک ریزکنترل کننده ای وی آر است، پیاده‌سازی شده و تمامی برنامه‌نویسی‌های مورد نیاز در محیط آردوینو آی دی ای (Arduino IDE) انجام گرفته است.

روند شناسایی سامانه برای بسامدهای متفاوتی انجام شده و به عنوان نمونه، تغییرات ضرایب فیلتر، که همان اعداد مورد استفاده در الگوریتم FxLMS هستند، برای بسامد ۴۰۰ هرتز در نمودار شکل ۷ نمایش داده شده است. جدول ۱ نیز مقادیر نهایی ضرایب فیلتر را پس از همگرایی کامل برای بسامدهای ۴۰۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز با فواصل ۱۰۰ هرتز نمایش می‌دهد. نتایج این بخش به طور واضح نشان می‌دهد که یکی از مزیت‌های استفاده از برد آردوینو یونو، توانایی این برد ارزان قیمت در پیاده‌سازی این الگوریتم تا مرز بسامد ۱ کیلوهرتز است.

بعضی از بسامدها، می‌تواند قرارگیری مجموعه سامانه کانال و صوت درون آن، در بسامد تشدید بوده باشد. همچنین دلیل دیگر این تفاوت در کارآمدی الگوریتم، می‌تواند ناشی از این موضوع باشد که پاسخ فرکانسی بلندگو برای تولید صوت در بسامدهای مختلف رفتار یکسانی ندارد. افزایش تراز فشار صوت در بعضی از بسامدها نیز به مقدار بسیار ناچیزی رخ داده است که این مقدار بسیار کمتر از کاهش تراز فشار صوت در بسامد هدف بوده و در مجموع اثری بر روی تراز فشار صوت کل ندارد. اما به طور کلی پیاده‌سازی الگوریتم FxLMS برای کنترل فعال نویز توسط ریزکنترل‌کننده ای وی آر موجود بر روی بورد آردوینو یونو موفق بوده است. مقادیر نهایی ضرایب الگوریتم FxLMS و میزان کاهش شدت نویز برای هر بسامد در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

به منظور مشاهده میزان اثربخشی روش کنترل فعال نویز پیاده‌سازی شده، یک میکروفن در انتهای لوله قرار گرفته و نمودارهای تراز فشار صوت بر حسب فرکانس‌های مختلف برای هر کدام از حالت‌های تک بسامد، قبل و بعد از روشن بودن کنترل کننده، در شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تمامی این نمودارها به کمک نرم‌افزار MATLAB ترسیم شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، محدوده‌های مشخص شده در نمودارها، میزان اثربخشی سامانه کنترل فعال نویز پیاده‌سازی شده در بسامدهای مورد نظر را متفاوت نشان می‌دهد. برای مثال، در بسامد ۶۵۰ هرتز و ۹۵۰ هرتز، نویز مزاحم به طور کامل حذف شده ولی در بسامد ۸۵۳ هرتز تقریباً سیستم کنترل فعال نویز، کارآمدی کمتری داشته است. نویز موجود در فرکانس‌های ۴۰۰ هرتز و ۷۵۰ هرتز نیز تا مقدار قابل قبولی کاهش داشته است. دلیل کاهش در میزان کارآمدی این الگوریتم در



شکل ۹) نمودار تراز فشار صوت قبل (نمودار خط چین) و بعد (نمودار خط توپر) از روشن کردن کنترل کننده در فرایند کنترل فعال نویز باندباریک به روش FxLMS برای تک فرکانس‌های (الف) ۴۰۰ هرتز، (ب) ۶۵۰ هرتز، (پ) ۷۵۰ هرتز، (ت) ۸۵۳ هرتز، و (ث) ۹۵۰ هرتز. ناحیه‌ی داخل بیضی خط-نقطه‌ای، بیانگر کاهش تراز فشار صوت در بسامد مورد نظر است.

هرتز چندان عملکرد مناسبی نداشته است و تنها با کاهش ۱ دسی‌بل از شدت نویز، تغییر چندان زیادی ایجاد نکرده است. این نتیجه به دلیل مشکل کمبود فضای حافظه در مورد آردوینو یونو ایجاد شده است و دقیقاً همین مسئله توانایی نسبتاً کمتر این مورد برای پیاده‌سازی کنترل فعال نویز در بیش از دو بسماد به صورت همزمان را بیان می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پیاده‌سازی کنترل فعال نویز باندباریک به روش FxLMS توسط مورد ارزان قیمت آردوینو یونو پرداخته شد. به منظور تنظیم دقیق بسماد سیگنال سینوسی، از قابلیت وقفه در ریزکنترل‌کننده‌ی موجود استفاده شد. سیگنال کسینوسی نیز به کمک ذخیره‌سازی در حافظه و ایجاد تأخیر در سیگنال کسینوسی ایجاد شد و در فیلتر شکافی مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند کنترلی ابتدا برای نویز تک بسماد انجام شد و تراز فشار صوت در بسمادهای مختلف بین ۱۳ دسی‌بل تا ۳۴ دسی‌بل کاهش پیدا کرد. سپس همین فرایند برای نویز دو بسمادی به صورت همزمان انجام شد و در یکی از این دو بسماد تا حدود ۱۸ دسی‌بل کاهش شدت نویز مشاهده شد. نتایج حاصل نمایانگر موفقیت پیاده‌سازی توسط مورد آردوینو یونو است که می‌تواند برای کاهش آلودگی صوتی و حذف نویزهای مزاحم در ماشین‌آلات دوار مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه این پروژه پیشنهاد می‌شود که الگوریتم معرفی شده بر روی تجهیزات کاربردی مانند ماشین‌آلات دوار پیاده‌سازی شود. همچنین به دلیل اینکه نویز تولیدی توسط اکثر تجهیزات از نوع باندپهن است، پیشنهاد می‌شود الگوریتم FxLMS باندپهن با حذف اثر فیدبک، به کمک سامانه‌های ارزان قیمت مانند آردوینو یونو پیاده‌سازی شود.

فهرست علائم

A	دامنه‌ی سیگنال سینوسی
A_d	دامنه‌ی سیگنال نویز
$d(n)$	سیگنال خروجی از سیستم ناشناخته
$e(n)$	سیگنال خطا
L	تعداد ضرایب فیلتر دیجیتال
$P(z)$	تابع تبدیل سیستم ناشناخته
$S(z)$	تابع تبدیل مسیر ثانویه
$\hat{S}(z)$	تابع تبدیل مسیر ثانویه‌ی تخمین‌زده‌شده
$s(n)$	پاسخ ضربه‌ی مسیر ثانویه‌ی $S(z)$
$\hat{s}(n)$	پاسخ ضربه‌ی مسیر ثانویه‌ی تخمینی $\hat{S}(z)$
T_s	زمان نمونه برداری (s)
$W(z)$	تابع تبدیل فیلتر دیجیتال
$w_1(n)$	ضرایب فیلتر دیجیتال
$x(n)$	سیگنال تولیدی از منبع نویز

جدول ۲) مقادیر نهایی ضرایب فیلتر شکافی و میزان کاهش شدت نویز در فرایند کنترل فعال نویز باندباریک تک بسماد به روش FxLMS

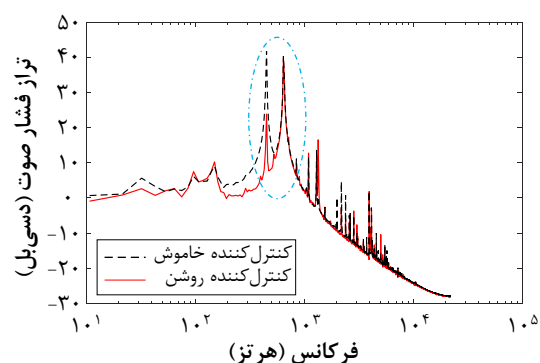
بسماد (هرتز)	۴۰۰	۶۵۰	۷۵۰	۸۵۳	۹۵۰
ضریب w'_0	-۰/۳۳۸۷	-۰/۱۲۸۵	۰/۰۳۱۴	-۰/۰۱۱۰	-۰/۰۷۴۷
ضریب w'_1	-۰/۱۹۹۸	۰/۰۰۴۸	-۰/۰۵۱۱	-۰/۰۰۴۲	-۰/۰۱۵۴۶
شدت کاهش صوت (دسی‌بل)	۱۷/۰۸	۳۴/۶۹	۱۲/۸۴	۱۶/۹۰	۳۱/۵۹

۵-۳- کنترل فعال نویز باندباریک به طور همزمان برای دو بسماد

نویز تولیدی از ماشین‌آلات دوار ممکن است به غیر از بسماد اصلی، حاوی بسمادهای دیگر از جمله هارمونیک‌های بسماد اول باشد. بنابراین روش کنترل فعال نویز باید بتواند دو یا چند تک بسماد را به صورت همزمان حذف کند. برای اینکه بتوان به صورت همزمان فرایند کنترل فعال نویز و عمل حذف نویز مزاحم را در دو بسماد انجام داد، حجم برنامه باید دو برابر شود. با زیاد شدن حجم برنامه ممکن است ریزکنترل‌کننده فرصت کافی برای انجام دستورات وقفه پیدا نکرده و فرایندکنترل ناکام بماند. لذا در این بخش کنترل همزمان دو بسماد اغتشاش بررسی می‌شود.

پیاده‌سازی این بخش به این صورت است که در ابتدا به مدت حدود ۱۲ ثانیه فرایند شناسایی سامانه برای دو فرکانس، که در این مقاله فرکانس‌های ۴۵۰ هرتز و ۶۵۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفته، انجام شده و سپس به کمک الگوریتم FxLMS و همگرایی چهار ضریب در فیلتر موجود، کنترل فعال نویز برای دو بسماد مربوطه به کار برده شده است. به عبارت دیگر، این فرآیند دقیقاً همان استفاده موازی از دو فیلتر همزمان برای تک بسماد است. به منظور بررسی اثر بخشی پیاده‌سازی کنترل فعال نویز، نمودار تراز فشار صوت بر حسب فرکانس‌های مختلف برای این حالت، قبل و بعد از روشن بودن کنترل‌کننده، در شکل ۱۰ آورده شده است.

نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که این سامانه کنترل فعال نویز برای بسماد ۴۵۰ هرتز به خوبی عمل کرده و شدت نویز مزاحم موجود در این بسماد را تا حدود ۱۸ دسی‌بل کاهش داده اما برای بسماد ۶۵۰



شکل ۱۰) نمودار تراز فشار صوت قبل (نمودار خط‌چین) و بعد (نمودار خط توپر) از روشن کردن کنترل‌کننده در فرایند کنترل فعال نویز باندباریک به روش FxLMS برای دو بسماد ۴۵۰ هرتز و ۶۵۰ هرتز به صورت همزمان. ناحیه‌ی داخل بیضی خط-نقطه‌ای، بیانگر کاهش تراز فشار صوت در بسماد مورد نظر است.

performance analysis of a smart doubly curved sandwich structure considering sensor and actuator layers. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2021;23(5):1453-80.

11- Lueg P. Process of silencing sound oscillations. US patent 2043416. 1936.

12- B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, NJ, Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1985.

13- Kuo SM, Morgan DR. Active noise control systems. Wiley, New York; 1996.

14- Morgan D. An analysis of multiple correlation cancellation loops with a filter in the auxiliary path. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1980;28(4):454-67.

15- Xiao Y, Ikuta A, Ma L, Khorasani K. Stochastic analysis of the FXLMS-based narrowband active noise control system. IEEE transactions on audio, speech, and language processing. 2008;16(5):1000-14.

16- Xiao Y, Ma L, Hasegawa K. Properties of FXLMS-based narrowband active noise control with online secondary-path modeling. IEEE Transactions on Signal Processing. 2009;57(8):2931-49.

17- Wang L, Gan WS. Convergence analysis of narrowband active noise equalizer system under imperfect secondary path estimation. IEEE transactions on audio, speech, and language processing. 2009;17(4):566-71.

18- Samarasinghe PN, Zhang W, Abhayapala TD. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: Toward quieter cars. IEEE Signal Processing Magazine. 2016;33(6):61-73.

19- Loiseau P, Chevrel P, Yagoubi M, Duffal JM. Robust active noise control in a car cabin: Evaluation of achievable performances with a feedback control scheme. Control Engineering Practice. 2018; 81:172-82.

20- Elliot SJ, Nelson PA, Stothers IM, Boucher CC. In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise. Journal of Sound and Vibration. 1990;140(2):219-38.

21- Kochan K, Sachau D, Breitbach H. Robust active noise control in the loadmaster area of a military transport aircraft. The Journal of the Acoustical Society of America. 2011;129(5):3011-9.

22- Chang CY, Siswanto A, Ho CY, Yeh TK, Chen YR, Kuo SM. Listening in a noisy environment: Integration of active noise control in audio products. IEEE Consumer Electronics Magazine. 2016;5(4):34-43.

23- Kuo SM, Mitra S, Gan WS. Active noise control system for headphone applications. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2006 ;14(2):331-5.

24- Toochinda V, Hollot CV, Chait Y. On selecting sensor and actuator locations for anc in ducts. InProceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228) 2001 (Vol. 3, pp. 2593-2598). IEEE.

25- Sawada Y, Ohsumi A. Active noise control of sound wave in a one-dimensional duct. InProceedings of the 2000 American control conference. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334) 2000 (Vol. 5, pp. 3013-3017). IEEE.

26- Chen KC, Chang CY, Kuo SM. Active noise control in a duct to cancel broadband noise. InIOP conference

ضرایب فیلتر دیجیتال	$w_i(n)$
سیگنال تولیدی از منبع نویز	$x(n)$
سیگنال سینوسی تولیدی	$x_s(n)$
سیگنال خروجی از فیلتر دیجیتال	$y(n)$
اندازه‌ی گام در الگوریتم FxLMS	μ
فاز سیگنال نویز (rad)	ϕ_d
بسامد مرجع سیگنال $d(n)$ (rads^{-1})	ω_0
کانولوشن خطی	$*$

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

تعارض منافع: این مقاله هیچگونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

منابع مالی: کلیه هزینه‌ها از محل حمایت مالی شرکت پیشتازان نوین مکعب سبز سپاهان (گروه صنعتی انتخاب) به شماره قرارداد PNMSS/9501 پرداخت شده است.

منابع

- 1- Fink D. Ambient Noise Is "The New Secondhand Smoke". Acoustics Today. 2019 Oct;15(3):38-46.
- 2- Who Regional Office for Europe. What is the evidence on existing policies and linked activities and their effectiveness for improving health literacy at national, regional and organizational levels in the WHO European region?.
- 3- Peris E. Environmental noise in Europe: 2020. Eur. Environ. Agency. 2020; 1:104.
- 4- Tao Y, Ren M, Zhang H, Peijs T. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies-A review. Applied Materials Today. 2021; 24:101141.
- 5- Zarastvand MR, Asadijafari MH, Talebitooti R. Improvement of the low-frequency sound insulation of the poroelastic aerospace constructions considering Pasternak elastic foundation. Aerospace Science and Technology. 2021; 112:106620.
- 6- Elliott SJ, Nelson PA. Active noise control. IEEE signal processing magazine. 1993;10(4):12-35.
- 7- Kuo SM, Morgan DR. Active noise control: a tutorial review. Proceedings of the IEEE. 1999;87(6):943-73.
- 8- Gohari HD, Zarastvand MR, Talebitooti R, Loghmani A, Omidpanah M. Radiated sound control from a smart cylinder subjected to piezoelectric uncertainties based on sliding mode technique using self-adjusting boundary layer. Aerospace Science and Technology. 2020; 106:106141.
- 9- Talebitooti R, Darvish Gohari H, Zarastvand M, Loghmani A. A robust optimum controller for suppressing radiated sound from an intelligent cylinder based on sliding mode method considering piezoelectric uncertainties. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2019;30(20):3066-79.
- 10- Darvishgohari H, Zarastvand M, Talebitooti R, Shahbazi R. Hybrid control technique for vibroacoustic

- series: materials science and engineering 2017 (Vol. 237, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- 27- Zia MK, Ahmed A, Tufail M. A duct based experimental setup for active noise control. In 2014 12th International conference on frontiers of information technology 2014 (pp. 139-143). IEEE.
- 28- Ross CF. An algorithm for designing a broadband active sound control system. Journal of sound and vibration. 1982;80(3):373-80.
- 29- Kuo SM, Panahi I, Chung KM, Horner T, Nadeski M, Chyan J. Design of active noise control systems with the TMS320 family. Texas Instruments. 1996.
- 30- Boucher S, Bouchard M, L'esperance A, Paillard B. Implementing a single channel active adaptive noise canceller with the TMS320C50 DSP starter kit. Application report: SPRA285. 1997.
- 31- Leva A, Piroddi L. FPGA-based implementation of an active vibration controller. IFAC Proceedings Volumes. 2008;41(2):5077-82.
- 32- Ramachandran VR, Panahi IM, Perez E. Active reduction of high-level acoustic noise on a fMRI test-bed using labview and FPGA platforms. In 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing 2008 (pp. 1517-1520). IEEE.
- 33- Shi D, He J, Shi C, Murao T, Gan WS. Multiple parallel branch with folding architecture for multichannel filtered-x least mean square algorithm. In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2017 (pp. 1188-1192). IEEE.
- 34- Shi D, Gan WS, He J, Lam B. Practical implementation of multichannel filtered-x least mean square algorithm based on the multiple-parallel-branch with folding architecture for large-scale active noise control. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 201;28(4):940-53.