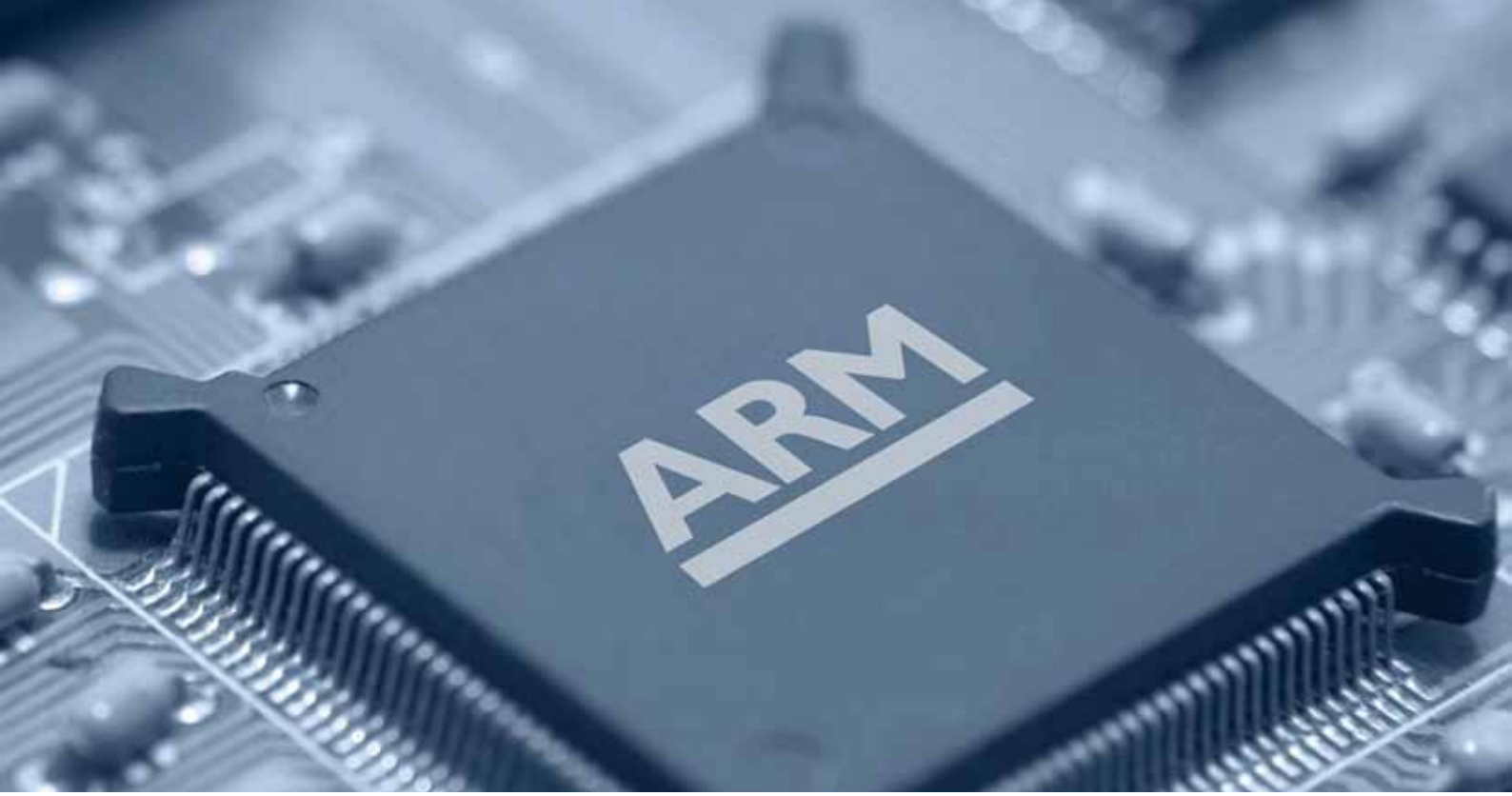


حذف بازتاب در سیستم صوتی سخنرانی و امکان‌سنجی پیاده‌سازی آن با استفاده از میکروکنترلر ARM

امیرهادی پوریامنش/ دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک/ دانشگاه صنعتی سجاد
amir.pouriamanesh@yahoo.com

امیرمسعود امینیان مدرس/ استادیار دانشکده مهندسی برق/ دانشگاه صنعتی سجاد
am_aminian@sadjad.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به روش شبیه‌سازی، فیلتر وفقی برای حذف بازتاب در سیستم صوتی سخنرانی مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا مدل آکوستیکی یک اتاق واقعی با آزمایش عملی بدست آمده است. تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد استفاده در این آزمایش‌ها معرفی و مشخصات ویژه‌ی آنها بیان شده است. سپس مشخصات فنی میکروکنترلر ARM مدل Cortex M4 معرفی شده است. محدودیتهای عملی این میکروکنترلر شامل نرخ نمونه‌برداری و تعداد عملیات ریاضی و منطقی لازم، جهت پیاده‌سازی فیلتر وفقی و الگوریتم NLMS محاسبه و امکان‌پذیری پیاده‌سازی فیلتر وفقی با الگوریتم NLMS روی میکروکنترلر بررسی شده است. مدل عملی بدست آمده با استفاده از تست‌های آکوستیکی، مبنای شبیه‌سازی الگوریتم فیلتر وفقی و رفتار آکوستیکی اتاق با نرم افزار متلب قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بهبود بیشینه ۲۶/۱ دسیبل برای نسبت سیگنال به تداخل می‌باشد. این نتایج تاییدی برای امکان پیاده‌سازی الگوریتم بر روی میکروکنترلر ARM است که در فازهای آتی این پژوهش اجرایی خواهد شد.

کلمات کلیدی: پیاده سازی سخت افزاری، حذف بازتاب صوتی، سیستم صوتی سخنرانی، فیلتر وفقی

۱-مقدمه

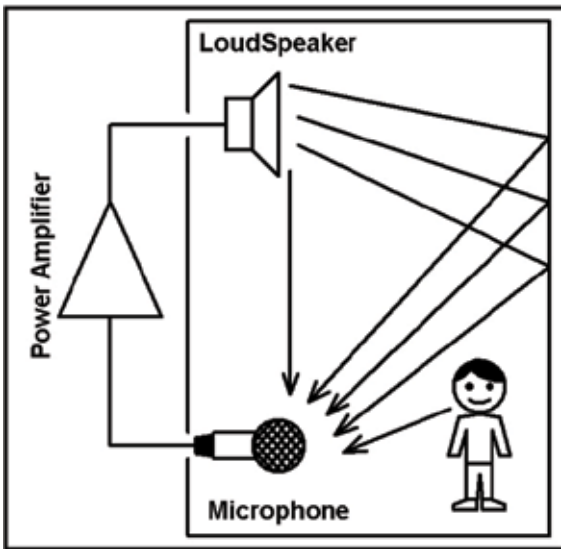
در یک سیستم صوتی سخنرانی شامل میکروفن، آمپلی فایر و بلندگو، همواره بخشی از صدای پخش شده از بلندگو از طریق مسیر مستقیم هوا و نیز از طریق انعکاس با سقف و دیوارها با تاخیرهای مختلف به میکروفن وارد می‌شود. شکل(۱) این موضوع را نشان می‌دهد. در نتیجه، سیگنالی که توسط میکروفن دریافت میشود شامل صدای سخنران و نیز تاخیر یافته‌های آن در لحظات قبل است. این پدیده باعث کاهش کیفیت صدا در سیستم صوتی می‌گردد. حذف بازتاب‌های صوتی را AEC (Acoustic Echo Cancellation) می‌نامند. یکی از روش‌های حذف بازتاب‌های صوتی از سیگنال اصلی استفاده از فیلتر وفقی است[۱].

اکثر مقالاتی که به مبحث AEC پرداخته‌اند، حذف بازتاب‌های صوتی در سیستم صوتی تلفن همراه و تلفن‌های VOIP را مورد بحث قرار داده‌اند. معروف‌ترین الگوریتم‌های جست‌وجو مورد استفاده در فیلترهای وفقی از خانواده LMS و مشتقات آن مانند NLMS [۲] و[۳]، APA (Affine Projection Algorithm)[۴] و[۵] هستند. گونه‌های بهبود یافته و سریع‌تر نیز مانند الگوریتم SVSSAPA (Variable Step Size APA) طراحی شده‌اند [۶] الی [۹]. سیستمی که از لحاظ توپولوژی شباهت بیشتری به سیستم صوتی سخنرانی داشته باشد سیستم صوتی سمعک است. هر چند که در سمعک هدف اصلی حذف فیدبک مثبت صوتی است لیکن اجزای اصلی آن به غیر از محیط انعکاس‌دهنده با سیستم صوتی سخنرانی شباهت دارد[۱۰] و [۱۱].

تعداد بسیار محدودی از مقالات به کاربرد فیلتر وفقی در سیستم صوتی سخنرانی پرداخته‌اند[۱۲] و [۱۳]. در [۱۲] یک سیستم صوتی سخنرانی با یک بلندگو به همراه فیلتر وفقی پیاده‌سازی شده بر روی پردازنده DSP موضوع تحقیق برای AEC بوده است. در پایان‌نامه کارشناسی ارشد [۱۳] به کمک یک رایانه با پردازنده پنتیوم ۴ و سیستم‌عامل لینوکس و درایور سریع برای کارت صوت یک سخت

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

افزار قدرتمند برای پیاده‌سازی فیلتر وفقی برای حذف بازتاب‌های صوتی در یک سیستم صوتی سخنرانی فراهم شده است.



شکل ۱: پدیده بازتاب در سیستم صوتی سخنرانی

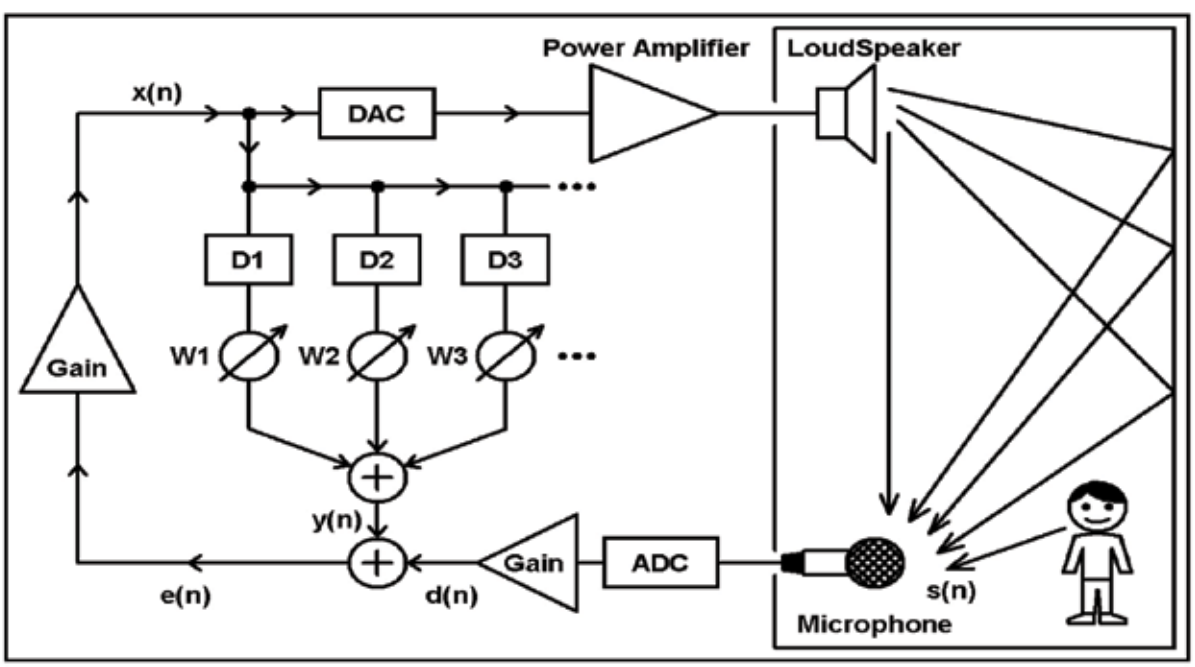
در این پژوهش هدف حذف بازتاب در سیستم صوتی سخنرانی است. برای این منظور ابتدا مدل آکوستیکی یک اتاق واقعی را با استفاده از آزمایش عملی بدست آوردیم. سخت افزارهایی که برای بدست آوردن مدل آکوستیکی اتاق مورد استفاده قرار گرفته‌اند همراه با عکس و اطلاعات فنی در متن مقاله و در بخش مراجع معرفی شده‌اند. سپس مشخصات و قابلیت‌های میکروکنترلر ARM سری CORTEX M4 را مورد مطالعه قرار دادیم و پیاده‌سازی سیستم حذف بازتاب صوتی بر روی آن را بررسی نمودیم. در نهایت برنامه‌ای برای شبیه‌سازی اتاق، سیستم صوتی سخنرانی و فیلتر وفقی توسط نرم‌افزار matlab نوشتیم و در آن مدل تجربی اتاق و محدودیت‌های مربوط به میکروکنترلر را اعمال نمودیم. با محاسبه میزان SIR در قبل و بعد از فیلتر وفقی، میزان بهبود SIR را برای این سیستم بدست آوردیم. نتایج این شبیه سازی تاییدی برای امکان پیاده‌سازی عملی این الگوریتم بر روی میکرو کنترلر ARM مدل Cortex M4 است که در فاز بعدی این پژوهش اجرایی خواهد گردید.

۲- مدل سیستم

شکل۲ اجزای سیستم صوتی همراه با فیلتر وفقی برای حذف بازتابهای صوتی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل اتاق، بلندگو، میکروفن، فیلتر وفقی و تقویت‌کننده صوتی است.

سیگنال صحبت سخنران با s(n) نشان داده شده است. این سیگنال توسط میکروفن دریافت میشود. در خروجی میکروفن سیگنال الکتریکی متناسب با s(n) تولید میگردد. این سیگنال توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌گردد. نام این سیگنال را d(n) میگذاریم. در فیلتر وفقی در آرایش مدلینگ، d(n) نماد سیگنال مطلوب است. به این مفهوم که خروجی فیلتر وفقی سعی دارد سیگنالی مشابه این سیگنال تولید کند. بعد از این مرحله یک بلوک تفاضل قرار دارد. در این مرحله سیگنال خروجی فیلتر وفقی یعنی y(n) از سیگنال d(n) کم شده و سیگنال خطا یعنی e(n) را تولید می‌کند. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در این سیستم فیلتر وفقی سعی در تولید سیگنال‌های بازتاب شده در اتاق را دارد و با حذف این سیگنال ها از سیگنال d(n) سیگنال صدای سخنران یعنی e(n) که در حالت ایده آل کاملا مساوی با s(n) است تولید خواهد شد. در چنین حالتی می توان گفت که فیلتر وفقی کاملا درست عمل نموده است. سیگنال e(n) پس از یک مرحله تقویت به ورودی فیلتر وفقی وارد می‌شود که ما نام آن را در این مرحله x(n) می‌گذاریم.

ورودی‌های فیلتر وفقی سیگنال‌های تاخیریافته‌ی x(n) هستند. بلوک‌های D_1، D_2، D_3 و... جهت تولید سیگنال‌های تاخیر یافته‌ی x(n) بکار گرفته شده‌اند. بلوک‌های w_1، w_2، w_3 و... ضرایب فیلتر



شکل ۲: اجزای سیستم با فیلتر وفقی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

وفقی هستند. سیگنال خروجی فیلتر وفقی یعنی y(n) از رابطه زیر بدست می‌آید:

(۱)

$$y(n) = \sum_{i=1}^{N} w_i(n) x_i(n - D_i)$$

که در آن N تعداد ضرایب فیلتر وفقی است.

سیگنال x(n) همزمان به دو بخش وارد می‌شود. یکی ورودی بلوک‌های تاخیر که در بالا توضیح داده شد و دیگری به ورودی مبدل دیجیتال به آنالوگ، که پس از عبور از این بلوک به سیگنال آنالوگ تبدیل می‌گردد. سیگنال آنالوگ تولید شده در این قسمت به ورودی تقویت‌کننده قدرت وصل می‌شود. تقویت‌کننده قدرت این سیگنال ضعیف را تقویت نموده و توسط بلندگو پخش می‌کند.

صدایی که توسط بلندگو پخش می‌شود هم از مسیر مستقیم هوا و هم از طریق انعکاس با سقف و دیوارها با تاخیرها و دامنه‌های مختلفی به میکروفن می‌رسد. در محل میکروفن این اصوات با صدای سخنران ترکیب شده و وارد میکروفن می‌شوند. لذا صدایی که میکروفن دریافت می‌کند ترکیبی از صدای سخنران در همین لحظه و تاخیر یافته‌های صدای او در لحظات پیشین است.

الگوریتم‌هایی که برای جست و جوی ضرایب فیلتر وفقی بکار می‌روند تلاش می‌کنند که ضرایب فیلتر وفقی را به‌گونه‌ای تنظیم کنند تا سیگنالی که در خروجی فیلتر وفقی تولید می‌شود بتواند رفتار آکوستیکی اتاق را شبیه‌سازی نماید. هنگامی که سیگنال خروجی فیلتر وفقی از سیگنال دریافتی از میکروفن کسر گردد باعث حذف سیگنال‌های انعکاسی و در نتیجه تولید سیگنال تمیز e(n) یعنی سیگنالی شبیه به سیگنال صدای سخنران می‌گردد.

۳-طرح پیشنهادی

۳-۱-بررسی عملی رفتار آکوستیکی اتاق

در این بخش با انجام یک سری آزمایش سعی کردیم یک مدل عملی و تقریبی برای رفتار آکوستیکی یک اتاق واقعی پیدا کنیم. ایده اصلی به این صورت بود که یک سری اصوات تک فرکانس (امواج سینوسی با فرکانس ثابت) در محدوده شنوایی انسان به شکل پالسی توسط یک بلندگوی با کیفیت پخش کنیم و با دریافت و ذخیره سازی و تحلیل این امواج و مقایسه ی آن با اصل شکل موج ارسالی بتوانیم مدلی برای رفتار آکوستیکی اتاق پیدا کنیم. برای این منظور به یکسری تجهیزات نیاز داشتیم که مهمترین آنها به این شرح اند: یک دستگاه پخش کننده فایل های صوتی، یک دستگاه امپلی فایر صوتی، یک بلندگو، یک میکروفن به همراه پایه نگهدارنده، یک پیش تقویت کننده صوتی، یک کامپیوتر مجهز به کارت صوت با ورودی استریو. نکته مهم در انتخاب این تجهیزات با کیفیت بودن و در اصطلاح سیستم های صوتی HiFi (مخفف High Fidelity) بودن این تجهیزات است. تجهیزاتی که برای این آزمایش انتخاب شدند همگی دارای این مشخصه بودند.

کارت صوت مورد استفاده در این پروژه به‌صورت onBoard در لبتاپ acer مدل Aspire5738Z مونتاژ شده است. این کارت صوت محصول شرکت Realtech بوده و از چیپست حرفه‌ای و قدرتمندی به نام ALC888S استفاده می‌کند. این کارت صوت دارای ۳ کانال استریو است که هر کانال می‌تواند به‌صورت ورودی یا خروجی Line و یا خروجی headphone پیکره‌بندی شود. یکی از ورودی‌ها که جک آن با رنگ صورتی مشخص شده است قابلیت بایاس و تقویت میکروفن‌های خازنی را نیز دارد. این کارت صوت می‌تواند به‌طور همزمان از تمامی کانال های خود با نرخ ۱۹۲ هزار نمونه برثانیه نمونه برداری کند. رزولوشن هر نمونه می تواند تا ۳۲ بیت نیز باشد. تصاویر موبوط به این کارت صوت در شکل۳ آمده است.

شکل ۳: کارت صوت مورد استفاده در این پژوهش، بالا: ورودی های کارت صوت، پایین: تصویر کارت صوت مجهز به چیپست ALC888S روی مادربرد

شکل ۴: میکسر صوتی مدل WF-4G مورد استفاده در این پژوهش

میکسر صوتی مورد استفاده در این پروژه مدل WF-4G محصول شرکت EAROBE ساخت کشور چین می‌باشد. این میکسر دارای دوکانال ورودی میکروفن دینامیکی با سیستم تقویت‌کننده‌ی تفاضلی در طبقه‌ی اول جهت حذف نویزهای مد مشترک از سیگنال دریافتی از میکروفن و افزایش نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. هرکانال از این میکسر مجهز به مدار تنظیم تن صدا شامل پیچ تنظیم باس (صداهای بم) و پیچ تنظیم تریبل (صداهای زیر) است. این میکسر قابلیت افکت گذاری بر روی صدارا نیز دارد. افکت‌های تکرار و طنین را میتوان توسط این میکسر برروی هر کدام از سیگنال ورودی‌های مربوط به میکروفن اعمال کرد. این دستگاه همچنین قابلیت پخش فایل‌های صوتی با فرمت MP3 و WAV را از حافظه‌ی فلش مموری دارد. سیگنال صوت مربوط به کانال‌های میکروفن را می‌توان با سیگنال فایل‌های صوتی ترکیب نموده و در خروجی اعمال نمود. تقویت سیگنال میکس شده‌ی نهایی در خروجی این میکسر توسط یک ولم قابل تنظیم است. شکل ۴ تصویر این میکسر را نشان می‌دهد.

میکروفن مورد استفاده در این پژوهش از نوع دینامیکی مدل F&M محصول شرکت Empire ساخت کشور چین است. هسته‌ی این میکروفن دارای سیم‌پیچی با امپدانس ۶۰۰ اهم می‌باشد. سیگنال

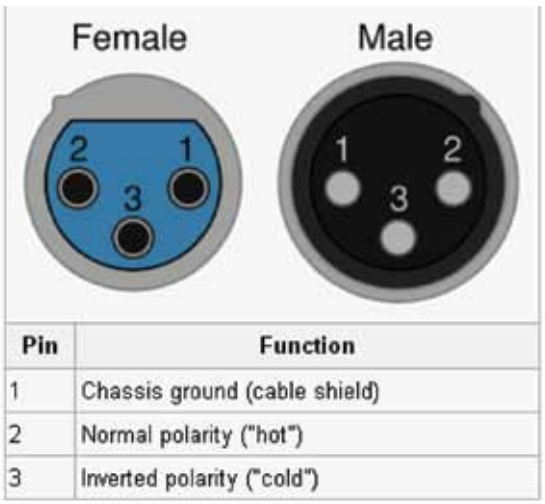
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

خروجی این میکروفن به‌صورت تفاضلی بر روی کانکتور XLR و به‌صورت سه سیمه (سیگنال+، سیگنال- و زمین) و از طریق یک کابل شیلددار با دو سیم به هم تنیده (برای انتقال سیگنال+ و سیگنال-) و شیلد برای اتصال زمین به میکسر منتقل می شود. در شکل ۵ تصویر میکروفن به همراه نمودار پاسخ فرکانسی آن نشان داده شده است. نمودار نشان میدهد که پاسخ فرکانسی میکروفن در محدوده ۱۰۰هرتز تا ۲ کیلو هرتز کاملا یکنواخت و در محدوده ۲ تا ۱۰ کیلوهرتز تقریبا یکنواخت است. تقریبا برای اکثر میکروفن‌های دینامیکی با کیفیت ساخت مرغوب، پاسخ فرکانسی به همین صورت است.

شکل ۵: میکروفن مورد استفاده در این پژوهش، بالا: میکروفن روی پایه نگهارنده، پایین: نمودار پاسخ فرکانسی میکروفن

شکل ۶ ترتیب پایه‌های کانکتورهای نری و مادگی از نوع XLR را که برای انتقال سیگنال میکروفن به شکل تفاضلی است، نشان می‌دهد. استفاده از این نوع کانکتور و کابل شیلددار با دو رشته به هم تنیده در وسط، روش بسیار کارآمدی برای انتقال سیگنال ضعیف میکروفن در فواصل طولانی با کمترین تاثیرپذیری از نویزهای محیطی است.

امپلیفایر مورد استفاده در این پژوهش شامل یک ماژول امپلیفایر کلاس D استریو با توان 50W+50W است که در اینجا تنها از یک کانال آن استفاده شده است. منبع تغذیه‌ی این امپلی فایر یک پاور سوییچینگ ۲۴ ولت ۳ امپر است. ماژول امپلی فایر مبتنی بر آی سی تقویت کننده قدرت کلاس D به شماره TPA3116 محصول شرکت TexasInstruments است. این آی‌سی از جدیدترین تکنولوژی‌ها در ساخت مدار مجتمع و از بهترین طرح‌ها برای پیاده‌سازی یک تقویت‌کننده قدرت کلاس D بهره می برد. پهنای باند این تقویت‌کننده ۲۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلو هرتز است و اعوجاج هارمونیکی (THD) در آن کمتر از ۰,۱ درصد است. این تقویت‌کننده علی‌رغم قدرت و توان زیادی که در خروجی خود ارایه می‌دهد به هیت سینک بسیار کوچکی احتیاج دارد. علت آن راندمان بسیار بالا (حدود ۹۲ درصد) و نیز عملکرد در کلاس D می‌باشد. علی‌رغم این که فرکانس کلیدزنی در این تقویت کننده نزدیک به یک مگاهرتز است لیکن میزان تداخل های الکترومغناطیسی (EMI) در اثر استفاده از این تقویت کننده بسیار ناچیز است و علت آن علاوه بر کیفیت مطلوب قطعات روی برد (مخصوصا فیلتر های LC خروجی)، بهره گیری از تکنیک های موثر بکاررفته در طراحی آی سی میباشد. شکل ۷ تصویر ماژول تقویت کننده قدرت مبتنی بر آیسی TPA3116 را نشان می دهد. اطلاعات کامل این آی سی در [۱۴] ارایه شده است.



Pin	Function
1	Chassis ground (cable shield)
2	Normal polarity ("hot")
3	Inverted polarity ("cold")

شکل ۶: نامگذاری پین های کانکتور XLR نری و مادگی

شکل ۷: ماژول تقویت کننده قدرت صوتی مبتنی بر آی سی TPA3116

بلندگوی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت یک باند با جعبه چوبی است. این باند متعلق به یک سیستم پخش صوت HiFi محصول شرکت Gasonic است. این باند دارای یک بلندگوی ووفر با قطر ۱۲ سانتی‌متر برای پخش اصوات با فرکانس ۲۰ تا ۲ کیلوهرتز و یک بلندگوی توییتر با قطر ۴ سانتی‌متر برای پخش اصوات با فرکانس ۲ تا ۲۰ کیلوهرتز است. پهنای باند ۳ دسیبل این جعبه بلندگو ۵۰ هرتز تا ۱۸ کیلوهرتز، امپدانس آن ۴ اهم و توان آن ۲۰ وات می باشد که توسط آمپلی فایر مورد استفاده در این پژوهش به راحتی راه اندازی می‌شود. در این پژوهش برای این که رفتار بلندگو خطی و فاقد اعوجاج باشد سعی می‌شود که حداکثر از نصف ظرفیت توان بلندگو استفاده شود لذا باید توجه داشت که سیگنال خروجی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

آمپلی فایر از ۱۰ وات بیشتر نشود. تصویر این باند در شکل ۸ نشان داده شده است.

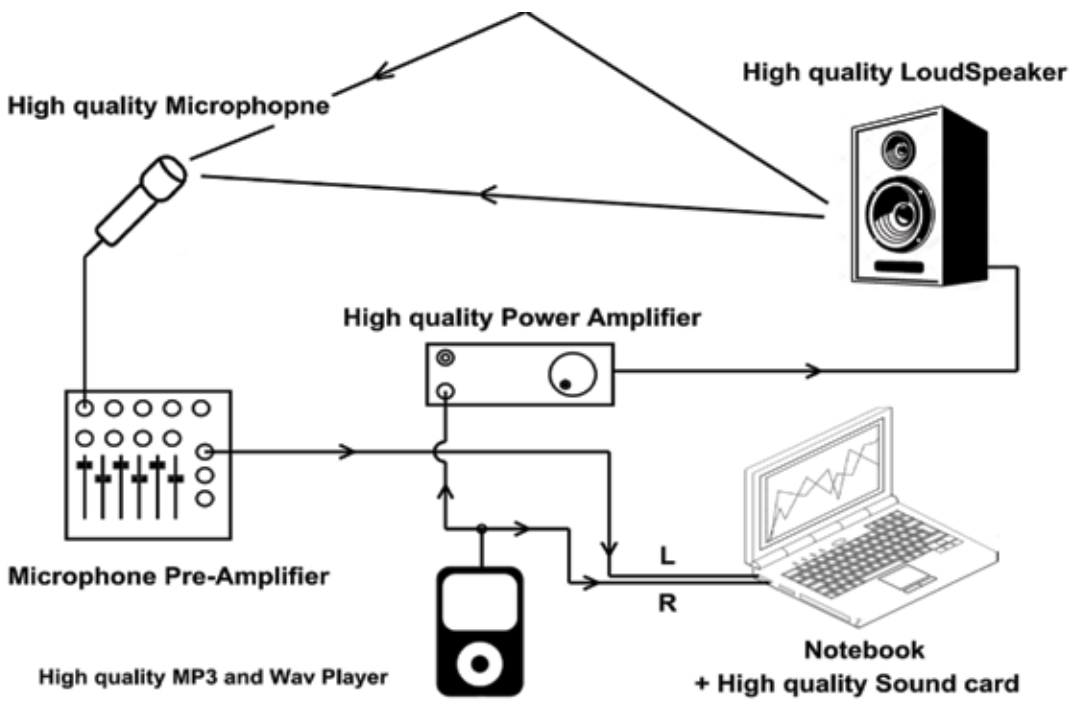
شکل ۸: جعبه بلندگو Gasonic با توان ۲۰ وات و کیفیت HiFi

شکل(۹)چیدمان اجزای سیستم تست آکوستیکی اتاق و نحوه برقراری ارتباط بین آنها را نشان می دهد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان دهنده ی تصاویری از تست های عملی برای یافتن مدل آکوستیکی اتاق می باشند.

برای انجام این آزمایش به یک سری شکل موج‌های خاص احتیاج داشتیم که برای تولید آنها از نرم‌افزار CoolEdit استفاده کردیم. CoolEdit نرم‌افزاری است قدرتمندکه برای ضبط، پخش، ویرایش و افکت گذاری بر روی صدا استفاده می‌شود. در شکل ۱۲ بخش‌های مختلف پنل کاربری نرم‌افزار CoolEdit معرفی شده‌اند. توسط این نرم افزار می‌توان انواع تکنیک‌های میکس و مونتاژ و افکت‌گذاری را روی انواع فایل‌های صوتی انجام داد. یک فایل جدید از طرق منوی فایل به راحتی ایجاد می‌گردد. نرخ نمونه برداری و رزولوشن نمونه‌ها را به سادگی می‌توان برای این فایل جدید تنظیم کرد. حداکثر زمان ضبط صدا به حجم باقیمانده در درایوی که فایل را در آن ذخیره می کنیم بستگی دارد. فرکانس نمونه‌برداری و رزولوشن نمونه‌ها توسط قابلیت‌های کارت صوت محدود می‌گردد. شکل۱۳ تنظیمات مربوط به انتخاب نرخ نمونه‌برداری و رزولوشن نمونه‌ها را در نرم‌افزار CoolEdit v2.1 نشان می‌دهد. در شکل ۱۴ تنظیمات مربوط به تولید یک شکل موج جدید با دامنه، زمان، فرکانس اصلی و فرکانس سیگنال مدوله کننده را نشان می‌دهد.

برای انجام تست آکوستیکی اتاق توسط این نرم افزار در هر مرحله یک موج سینوسی تک فرکانس به شکل متقطع تولید شد. به این مفهوم که ۲ ثانیه موج سینوسی سپس ۲ ثانیه سکوت و به همین شکل تا آخر. شکل یک سری فایل صوتی با پسوند WAV با فرکانس‌های مختلف برای موج سینوسی به همین شکل تولید شد. این فایل‌های صوتی را به‌دستگاه پخش کننده فایل صوتی وارد نمودیم. هنگام پخش این اصوات به شکل یکسان بر روی کانال راست و چپ خروجی صوتی این دستگاه ایجاد می‌شوند. خروجی کانال راست این پخش کننده را به ورودی تقویت‌کننده صوتی و خروجی کانال چپ را به ورودی کانال چپ کارت صوت وصل کردیم. خروجی پیش تقویت‌کننده صوتی هم که صدای دریافتی از میکروفن را تقویت می‌کند به ورودی کانال راست کارت صوت وصل کردیم.

با پخش کردن فایل صوتی توسط دستگاه پخش کننده مسیر سیگنال‌ها به این صورت خواهد بود: سیگنال صوتی به آمپلی‌فایر قدرت وارد شده و پس از تقویت تا حدود ۱۰ وات به بلندگو وارد می‌شود. بلندگو سیگنال‌های الکتریکی را به امواج صوتی تبدیل کرده و در فضای اتاق پخش می‌کند. میکروفن که در فاصله ۲۸۰ سانتی‌متری از بلندگو قرار گرفته است امواج صوتی را که هم از طریق



شکل ۹: اجزای سیستم تست آکوستیکی اتاق

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

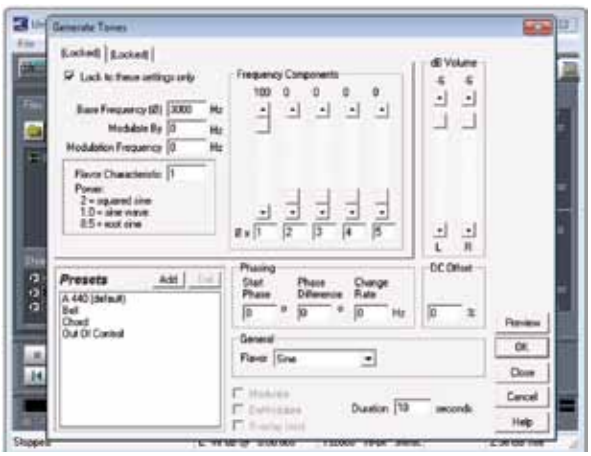
مسیر مستقیم هوا و هم از طریق انعکاس با سقف و دیوارها به محل میکروفن رسیده‌اند.دریافت نموده و آنها را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.

شکل۱۰: تصویری از نخستین تست های آکوستیکی اتاق

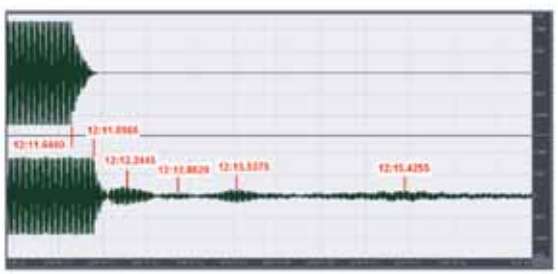
شکل۱۱: تصویر دیگری از تست های آکوستیکی اتاق

شکل۱۳: تنظیمات ایجاد فایل جدید شامل فرکانس نمونه برداری و رزولوشن نمونه ها در نرم افزار CoolEdit

سیگنال خروجی میکروفن توسط پیش تقویت کننده تا حدود یک ولت تقویت شده و به ورودی کانال راست کارت صوت اعمال می‌کند. کارت صوت توسط نرم افزار CoolEdit سیگنال‌های دریافتی از کانال راست و چپ را به سیگنال دیجیتال تبدیل نموده و آن را به‌صورت یک فایل استریو ذخیره می‌کند. این آزمایش در طی تنها ۱۰ ثانیه انجام گرفته و به پایان می‌رسد. نحوه اتصال تجهیزات در شکل ۹ رسم شده است.



شکل۱۴: تنظیمات بخش تولید یک شکل موج دلخواه شامل دامنه، فرکانس، تعداد و نوع هارمونیک هادر نرم افزار CoolEdit



شکل۱۵: سیگنال دریافتی از کارت صوت در فرکانس ۳ کیلو هرتز

هنگامی که فایل صوتی ضبط شده توسط نرم‌افزار CoolEdit را بررسی کنیم اطلاعات مفیدی می توانیم از آن استخراج کنیم. شکل ۱۵ یک نمونه از سیگنال‌های ضبط شده را نشان می دهد. در این آزمایش فرکانس موج سینوسی ۳ کیلوهرتز انتخاب شده است. همان‌طورکه در شکل مشخص است بین لحظه صفر شدن سیگنال کانال چپ و سیگنال کانال راست یک فاصله زمانی وجود دارد. این فاصله زمانی مربوط به مدت زمانی است که طول می‌کشد صدا از بلندگو از مسیر مستقیم هوا به میکروفن برسد. در این آزمایش این زمان حدود ۸ میلی‌ثانیه است که با توجه به فاصله ۲۸۰ سانتی‌متری میکروفن از بلندگو و با فرض سرعت صوت در اتاق مساوی ۳۳۰ متر بر ثانیه این میزان تاخیر کاملا منطقی است. نکته جالب دیگر دریافت سیگنال‌هایی با همان فرکانس و شکل موج توسط میکروفن پس از قطع سیگنال اصلی است. این سیگنال‌ها در واقع انعکاس های سیگنال اصلی هستند که مسیرهای طولانی‌تری را طی نموده و با تاخیر و البته تضعیف بیشتری به میکروفن رسیده‌اند. با اندازه‌گیری مدت زمان تاخیر و با فرض سرعت صوت مساوی ۳۳۰ متر بر ثانیه می‌توان مسافتی را که این امواج طی کرده‌اند را نیز بدست آورد. در این آزمایش ۴ دامنه قابل توجه برای سیگنال‌های منعکس شده مشاهده می‌شود لذا می‌توان نتیجه گرفت که در این اتاق و به ازای همین شرایط و موقعیت مکانی برای میکروفن و بلندگو، صدا علاوه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

شکل۱۲: معرفی بخش های مختلف پنل کاربری نرم افزار CoolEdit V2.1

بر مسیر مستقیم هوا از طریق ۴ انعکاس با تاخیرهای مختلف به میکروفن می‌رسد. دامنه سیگنال‌های انعکاسی به ترتیب ۰/۲۲، ۰/۱۱، ۰/۱۶ و ۰/۱۳ دامنه سیگنال اصلی می‌باشند. تاخیرهای آنها نیز به ترتیب ۱۴ میلی ثانیه، ۲۰ میلی ثانیه، ۲۷میلی ثانیه و ۴۶میلی ثانیه می باشند. با استفاده از نتایج تست می توان مدلی تقریبی برای رفتار آکوستیکی این اتاق به شکل زیر ارایه داد:

$$g(t) = 0.2\ s(t-0.014) + 0.1\ s(t-0.020) + 0.6\ s(t-0.027) + 0.3\ s(t-0.046) \quad (۴)$$

با استفاده از نتیجه این آزمایش می توان یک مدل تجربی و تقریبی برای اتاق به شکل کلی به‌صورت زیر ارایه داد:

$$g(t) = a\ (t-D1) + b\ (t-D2) + c\ (t-D3) + \ldots \quad (۵)$$

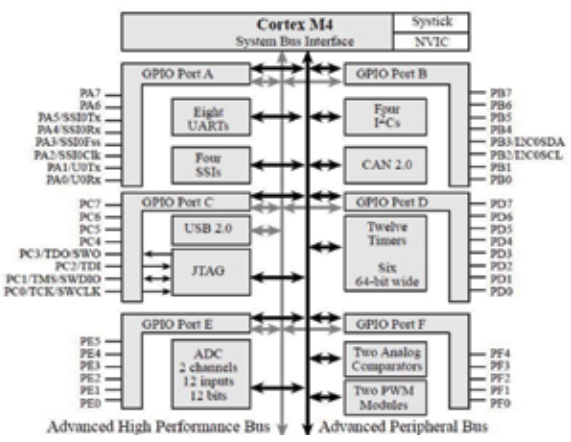
که در آن a، b، c و.... دامنه سیگنال دریافتی و D1، D2، D3 و... میزان تاخیر سیگنالهای دریافتی است.

۳-۲-بررسی میکرو کنترلر ARM- Cortex M4

در این مقاله هدف طراحی فیلتر وفقی به گونه ای است که قابلیت پیاده سازی و عملکرد به شکل Real Time بر روی میکرو کنترلر ARM سری Cortex M4 مدل STM32F407VGT6 را داشته باشد. لذا لازم است که در ابتدا مشخصات فنی و محدودیت های عملی و سخت افزاری این میکروکنترلر را بررسی نموده و سپس طراحی فیلتر صورت گیرد.

میکروکنترلر ARM سری Cortex M4 از میکروکنترلرهای جدید و فراگیر در خانواده ARM هستند. این میکروکنترلرها به نسبت قیمتشان دارای امکانات سخت افزاری فراوان و قدرت پردازشی مناسبی هستند. فرکانس کلاک اصلی در این میکروکنترلر را می توان روی ۱۶۸ مگاهرتز تنظیم نمود. این میکروکنترلر دارای ۱۹۲ کیلو بایت فضای RAM و ۱ مگا بایت فضای EEPROM برای ذخیره سازی کد برنامه است. همچنین داشتن ۳ واحد ADC با ریزولوشن ۱۲ بیت و نرخ نمونه برداری ۲ میلیون نمونه بر ثانیه و ۲ واحد DAC با ریزولوشن ۱۲ بیت و نرخ تبدیل ۲ میلیون نمونه در ثانیه از دیگر امکانات این میکروکنترلر است. اطلاعات کامل این میکروکنترلر در [۱۵] ارایه شده است. شکل ۱۶ طرح بلوک دیاگرام داخل این میکروکنترلر را نشان می دهد. در این میکروکنترلر ساختار پایه‌ها به‌صورت مولتی پلکس است و به هر پایه می توان نقش های مختلفی داد که این نقش به هنگام برنامه‌ریزی میکرو تعیین می‌شود.

میکرو کنترلر ARM مدل Cortex M4 توسط کمپانی‌های مختلفی تولید می‌شود. اما مدلی که مد نظر ما است محصول شرکت ST می‌باشد. شرکت ST برای استفاده سریع و آسان از این میکروکنترلر برد Discovery را تولید کرده است که شامل میکروکنترلر STM32F407VGT6 و سخت‌افزارهای جانبی از جمله انکدر و دیکدر صوتی با رابط I2S ، پورت micro USB برای عملکرد به عنوان Host و یک میکروکنترلر مخصوص و از قبل برنامه‌ریزی شده برای ارتباط با کامپیوتر از طریق رابط USB و برنامه‌ریزی میکروکنترلر اصلی از طریق همین رابط است. شکل ۱۷ تصویر این برد را نشان می‌دهد. اطلاعات کامل این برد در [۱۶]آمده است.



شکل ۱۶: طرح بلوک دیاگرام داخل میکروکنترلر ARM مدل Cortex M4

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

شکل ۱۷: برد Dscovery محصول شرکت ST

در این مقاله هدف حذف بازتاب‌های صوتی در اتاقی به طول ۲۰ متر است و فرض بر این است که بلندترین مسیری که یک سیگنال صوتی انعکاس یافته طی می کند تا به میکروفن برسد ۴۰ متر باشد. در این پژوهش از سیگنال‌هایی که چندین بار انعکاس یافته و دامنه‌ی آنها به شدت تضعیف شده است صرف نظر می‌شود. در دمای اتاق سرعت صوت در هوا حدود ۳۳۰ متر بر ثانیه است. مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیگنال صوت ۴۰ متر را طی کند حدود ۱۲۱ میلی‌ثانیه است. از این‌رو فیلتر وفقی باید بتواند هرگونه سیگنال تاخیر یافته‌ای که مدت زمان تاخیر آن بین صفر تا ۱۲۱ میلی‌ثانیه باشد را شبیه‌سازی نماید. تعداد ضرایب (tap های) فیلتر وفقی بستگی به حداکثر طول تاخیر و نیز نرخ نمونه‌برداری از سیگنال صوتی در واحد ADC دارد. اگر حداکثر زمان تاخیر مورد نظر را بر نرخ نمونه‌برداری تقسیم کنیم تعداد ضرایب فیلتر وفقی بدست می آید. در این پژوهش نرخ نمونه برداری را ۱۱۰۲۵ نمونه بر ثانیه درنظر گرفته‌ایم که برای سیگنال‌های صوتی مربوط به صدای انسان مناسب است. لذا تعداد ضرایب (tap های) فیلتر وفقی بدست می‌آید:

$$\frac{LongestDelay}{SamplingTime}=\frac{121ms}{1/11025s/sec.}=1334 \qquad (۲)$$

جدول ۱: خلاصه مراحل الگوریتم NLMS

ورودی‌های الگوریتم	بردار ضرایب W(n)، بردار سیگنال ورودی X(n) و خروجی مطلوب d(n)
خروجی‌های الگوریتم	خروجی فیلتر y(n)، بردار به روز رسانی شده ی ضرایب فیلتر وفقی w(n+۱)
مرحله ۱: فیلترینگ	y(n)=WT(n)X(n)
مرحله ۲: تخمین خطا	e(n)=d(n)-y(n)
مرحله ۳: تطبیق و بروزرسانی بردار ضرایب	W(n+1)=W(n)+(μ/(XT(n)X(n)+ψ)e(n)X(n)

در این پژوهش ما تعداد ضرایب فیلتر وفقی را ۱۵۰۰ ضریب در نظر گرفته ایم تا فیلتر حتما بتواند شرایط و نیاز های سیستم را پاسخگو باشد. پس از این مرحله نوبت به انتخاب الگوریتم جست و جو برای یافتن ضرایب فیلتر وفقی میباشد. معمول ترین الگوریتم ها از خانواده LMS می باشند و یکی از الگوریتم های سادهی آن که هم سرعت همگرایی بالا و هم دقت مناسبی در یافتن ضرایب دارد، الگوریتم NLMS است. در جدول۱ فهرستی از عملیات ریاضی که باید انجام گیرد تا یک بار الگوریتم NLMS اجرا شود آورده شده است [۱].

چنانچه این الگوریتم را به زبان برنامه نویسی ترجمه کنیم، می توان تعداد عملیات ریاضی و منطقی مورد نیاز برای یک بار اجرای حلقه را محاسبه کرد.

میکرو کنترلرSTM32F407 قادر است که هرکدام از چهار عمل اصلی ریاضی را به شکل ۱۶ بیتی در مدت زمان یک کلاک انجام دهد. لذا قادر است که در هر ثانیه تا ۱۶۸ میلیون ضرب ۱۶ بیتی در ۱۶ بیتی را انجام دهد. برای سایر عملیات و حلقه‌های For، if و... نیز تعداد کلاک‌های تقریبی توسط شرکت سازنده در برگه‌های اطلاعاتی این میکروکنترلر ارایه شده است[۱۵].

در جدول۲ فهرست عملیات مهم ریاضی و منطقی که در یک بار اجرای الگوریتم NLMS مورد نیازاند برای میکروکنترلر STM32F407 بر حسب تعداد کلاک آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای اجرای یک بار الگوریتم NLMS به حدود ۱۰۷۰۴ کلاک احتیاج است. مجموع زمان مورد نیاز برای اجرای یک بار حلقه‌ی الگوریتم جست و جو به روش NLMS توسط میکروکنترلر در فرکانس کلاک ۱۶۸مگاهرتز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$algorithmTime = ClkNumbers \times Clkfreq^{-1} \qquad (۳)$$

$$algorithmTime = 10704 \times 168MHz^{-1} = 63.7uS$$

جدول ۲: تعیین مدت زمان اجرای الگوریتم NLMS توسط میکروکنترلر ARM- Cortex M4

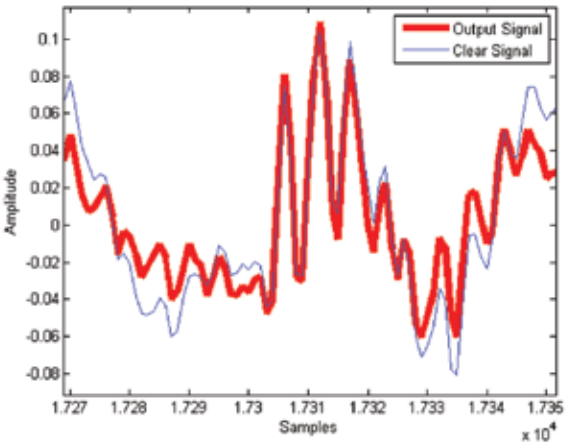
عملیات	تعداد کلاک مورد نیاز
Get ADC	About ۱۰۰
For(i=1500; i<2; i--)	۱۴۹۹
Buff[i]=buff[i-1]	۱۴۹۹
end	۱
y(i)=W'*X	۱۵۰۰+۱۵۰۰
e(i)=d(i)-y(i)	۱
x(i)=k*e(i)	۱
W=W+(u/(X'*X+si))*e(i)*X	۴۵۰۳
DAC	About ۱۰۰
جمع کل	About ۱۰۷۰۴

همان‌طور که مشاهده می‌شود این مقدار کمتر از مدت زمان نمونه‌برداری یعنی ۹۰/۷ میکروثانیه است لذا می‌توان گفت که این میکروکنترلر قادر است به شکل RealTime فیلتر وفقی با الگوریتم جست و جوی NLMS را جهت حذف بازتاب‌های صوتی در سیستم صوتی سخنرانی پیاده‌سازی نماید.

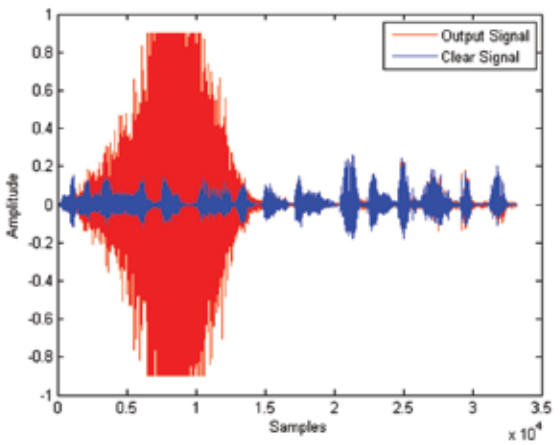
۳-۳-شبیه سازی با نرم افزار Matlab

در این پژوهش به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد فیلتر وفقی جهت حذف بازتاب‌های صوتی، برنامه‌ای توسط نرم‌افزار Matlab نوشته شد. در این برنامه یک فایل صوتی با فرمت wav به‌عنوان ورودی به سیستم داده می‌شود. این فایل حاوی صدای یک گوینده رادیو است که به شکل خوب و با کیفیت ۱۱۰۲۵ نمونه برثانیه ضبط شده است. محیط اتاق با مدلی که در بخش ۳-۲ بدست آمد، شبیه‌سازی شده است. فیلتر وفقی شامل ۱۵۰۰ ضریب است. در این شبیه‌سازی بهره ولتاژ تقویت‌کننده مساوی ۴۰۰ و بهره آکوستیکی بلندگو را

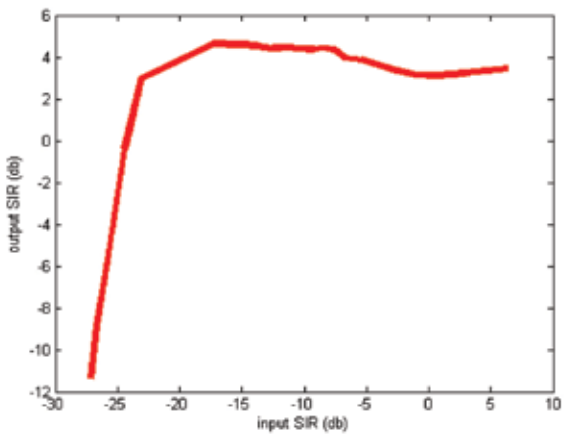
[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]



شکل ۱۸: ردیابی سیگنال تمیز توسط سیگنال خروجی فیلتر وفقی

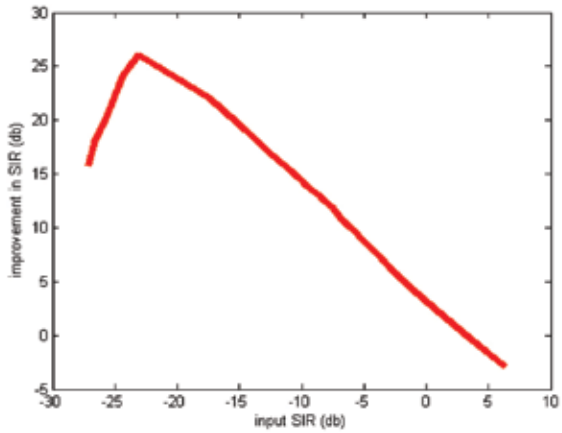


شکل ۱۹: همگرایی فیلتر وفقی پس از حدود ۳۶/۱ ثانیه



شکل ۲۰: تغییرات SIR خروجی فیلتر وفقی نسبت به تغییرات SIR ورودی

مساوی ۵ درصد فرض نموده‌ایم که در عمل نیز برای اکثر بلندگوهای با پهنای باند وسیع به همین‌گونه است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. فیلتر وفقی بعد از حدود ۱۵۰۰۰ بار اجرای حلقه پایدار شده است. با فرض این که نرخ نمونه‌برداری و اجرای حلقه ۱۱۰۲۵ بار در ثانیه باشد، سیستم پس از حدود ۱/۳۶ ثانیه به پایداری رسیده است و بعد از آن هم پایدار باقی مانده است. برای بررسی عملکرد فیلتر وفقی معیار SIR (نسبت توان سیگنال تمیز به توان سیگنال تداخل ناشی از بازتاب) در قبل و بعد از فیلتر وفقی محاسبه شده است. در قبل از فیلتر وفقی و در محل میکروفن، SIR به‌صورت توان سیگنال تمیز یعنی صدای سخنران به توان سیگنال‌های انعکاس یافته در محل میکروفن تعریف می‌شود. در بعد از فیلتر وفقی آنچه که وجود دارد عبارت است از سیگنال تمیز به علاوه درصدی از سیگنال‌های انعکاس یافته که هنوز باقی مانده‌اند. از تفاضل سیگنال خروجی فیلتر وفقی با سیگنال تمیز (یعنی صدای سخنران) سیگنال تداخل باقی مانده بدست می‌آید. تفاضل SIR در خروجی و ورودی فیلتر وفقی میزان بهبود این پارامتر را که به مدد فیلتر وفقی حاصل شده است را نشان خواهد داد. شکل ۲۰ نمودار تغییرات SIR خروجی را نسبت به تغییرات SIR ورودی نشان می‌دهد. برای ایجاد SIR های مختلف در ورودی، توان تقویت‌کننده قدرت بین ۲۰ تا ۸۰۰ تغییر داده شد و در هر مرحله SIR ورودی و SIR خروجی محاسبه گردید. با تغییر توان تقویت‌کننده توان سیگنال‌های انعکاسی دریافتی در محل میکروفن بیشتر و میزان SIR در ورودی کاهش می‌یابد.



شکل ۲۱: بهبود SIR نسبت به تغییرات SIR ورودی

شکل (۲۱) میزان بهبود SIR (که از تفاضل SIR ورودی و SIR خروجی بدست می‌آید) نسبت به تغییرات SIR ورودی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل۹ دیده میشود فیلتر وفقی در این شبیه‌سازی توانسته است تا ۲۶/۱ دسیبل بهبود در SIR ایجاد کند. به عبارت دیگر SIR خروجی فیلتر وفقی در بهترین حالت به میزان ۲۶/۱ دسیبل از SIR ورودی بیشتر شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به روش شبیه‌سازی، حذف بازتاب‌ها در سیستم صوتی سخنرانی مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده بهبود تا ۲۶/۱ دسیبل برای نسبت سیگنال به تداخل می‌باشند. مدل اتاق با استفاده از آزمایش عملی بدست آمد و در شبیه‌سازی بکار گرفته شد. تجهیزات مورد استفاده در تست‌ها با ارایه تصویر و توضیحات تشریح شده و مشخصات ویژه‌ی آنها بیان گردید. با استفاده از برگه‌های اطلاعاتی میکروکنترلر تعداد کلاک مورد نیاز برای اجرای الگوریتم NLMS محاسبه شد و امکان پیاده سازی فیلتر وفقی بر روی میکروکنترلر بررسی گردید. در شبیه‌سازی محدودیت‌های عملی میکروکنترلر ARM سری Cortex M4 لحاظ گردید تا نتایج آن برای فاز بعدی پژوهش که پیاده‌سازی عملی بر روی میکروکنترلر است، قابل استفاده باشد. برد Discovery محصول شرکت ST جهت استفاده آسان و سریع از میکروکنترلر ARM سری

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]

Cortex M4 معرفی شد و به‌عنوان یک سخت‌افزار مناسب برای ادامه این پژوهش و پیاده‌سازی عملی فیلتر وفقی بر روی میکروکنترلر ARM انتخاب گردید.

مراجع

[1] Behrouz Farhang-Boroujeny, Adaptive Filters - Theory and Applications. John Wiley & Sons, pp. 492-524, 2013.

[2] Radhika Chinaboina, D.S.Ramkiran, Habibulla Khan, M.Usha,B.T.P Madahav K.Phani Srinivas & G.V.Ganesh,"Adaptive algorithms for acoustic echo cancellation in speech processing" International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences,Volume 7, Issue 1 April,2011.

[3] V R Metkewar, A N Kamthane, Aqeel Ahemad and S A Hashmi,"Adaptive LMS and NLMS algorithms for cancellation of Acoustic Echo",IJCA Proceedings on National Conference on Advancement in Electronics & Telecommunication Engineering NCAETE(4):25-27, May 2012.

[4] Paulo.S.R,Diniz,"Adaptive filtering- Algorithms and practical implementation",Fourth Edition, 2013.

[5] Simon Haykin and Bernard Widrow, Least mean square adaptive filters, 2003.

[6] C.Paleologu, J.Benesty, and S.Ciochina, —A variable step-size affine projection algorithm designed for acoustic echo cancellation,IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing vol. 16, pp. 597-600,Nov. 2008.

[7] Albu, Felix, Constantin Paleologu, and Silviu Ciochina. "New variable step size affine projection algorithms", 2012 9th International Conference on Communications (COMM), 2012.

[8] J.Satyanarayana, G. Amjad Khan,"Affine projection algorithm applied to adaptive noise cancellation",Vol.3,Issue 1,March 2012.

[9] J. Benesty, T. Gaensler, D. R. Morgan, M. M. Sondhi, and S. L. Gay,Advances in Network and Acoustic Echo Cancellation. Berlin,Germany: Springer-Verlag, 2001.

[10] Tran, L. T. T., et al. "Acoustic Feedback Cancellation in hearing aids using two microphones employing variable step size affine projection algorithms." 2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP). IEEE, 2015.

[11] Rotaru, Marius, Felix Albu, and Henri Coanda. "A variable step size modified decorrelated NLMS algorithm for adaptive feedback cancellation in hearing aids." Proc. of ISETC 2012 (2012): 263-266.

[12] Özbay, Yüksel, and Ahmet Reşit Kavsaoğlu. "An optimum algorithm for adaptive filtering on acoustic echo cancellation using TMS320C6713 DSP." Digital Signal Processing 20.1 (2010), pp. 133-148.

[13] Berdahl, Edgar. "Acoustic Feedback Cancellation For Public Address Systems."

[14] http://www.ti.com/product/TPA3116D2

[15] POR, PDR. "ARM Cortex-M4 32b MCU+ FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+ 4KB RAM", June 2013, http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f4-series/stm32f407-417/stm32f407vg.html

[16] http://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html

***

ادامه از صفحه۴۱

6 Vector Routing
7 Pipe Routing
8 SourceRouting
9 projection

مراجع

[1]N. Z. Zenia, M. Aseeri, M. R. Ahmed, Z. I. Chowdhury, and M. Shamim Kaiser, «Energy-efficiency and reliability in MAC and routing protocols for underwater wireless sensor network: A survey,» Journal of Network and Computer Applications, vol. 71, pp. 72-85, 8// 2016.

[2]M. T. Kheirabadi and M. M. Mohamad, «Greedy routing in underwater acoustic sensor networks: a survey,» International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2013, 2013.

[3] Ashutosh Kumar Singh, N Purohit, Sandeep Goutele and S.verma. (2012). An Energy Efficient Approach for Clustering in WSN using Fuzzy Logic. International Journal of Computer Applications, (44)18, 8-12.

[4] Bushra Rashid, Mubashir Husain Rehmani. (2016). Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. Journal of Network and Computer Applications (60), 192-219.

[5] HumairaAbdusSalam, BilalMuhammadKhan. (2016). Use of wireless system in healthcare for developing countries. Digital Communications and Networks (2)1, 35-46.

[6]Feng Li, Yun Li, Weiliang Zhao, Qianbin Chen, Weiwen Tang. (2006). An Adaptive Coordinated MAC Protocol Based on Dynamic Power Management for Wireless Sensor Networks. IWCMC, pp. 1073 – 1077.

[7]P. Xie, J.-H. Cui, and L. Lao, «VBF: vector-based forwarding protocol for underwater sensor networks,» in Networking 2006. Networking technologies, services, and protocols; performance of computer and communication networks; mobile andwireless communications systems, ed: Springer, 2006, pp. 1216-1221.

[8]M. R. Khosravi, H. Rostami, and H. Basri, «Enhanced VBF for Delay-aware Routing in UWSNs,» International Journal, vol. 5, 2015.

[9] Tanveer Khan1, Israr Ahmad1, Waqas Aman1, Irfan Azam1, Zahoor Ali Khan2,3, Umar Qasim4, Sanam Avais5, Nadeem Javaid1,*. (2016). Clustering depth based routing for underwater wireless sensor networks. 2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. DOI 10.1109/AINA.2016.168

[10] P. Xie, Z. Zhou, N. Nicolaou, A. See, J.-H. Cui, and Z. Shi, «Efficient vector-based forwarding for underwater sensor networks,» EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2010, pp. 1-13, 2010.

[11] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, «Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks,» ACM Sigbed Review, vol. 1, pp. 3-8, 2004.

[12] J. Jiang, G. Han, H. Guo, L. Shu, and J. J. P. C. Rodrigues, «Geographic multipath routing based on geospatial division in duty-cycled underwater wireless sensor networks,» Journal of Network and Computer Applications, vol. 59, pp. 4-13, 1// 2016.

[13] S. Souiki, M. Feham, M. Feham, and N. Labraoui, «Geographic routing protocols for underwater wirelesssensor networks: a survey,» arXiv preprint arXiv:1403.3779, 2014.

[14] C. Namesh and B. Ramakrishnan, «Analysis of VBF protocol in Underwater Sensor Network for Static and Moving Nodes,» International Journal of Computer Networks and Applications, vol. 2, pp. 20-26, 2015.

[15] N. Nicolaou, A. SEE, P. Xie, J.-H. Cui, and D. Maggiorini, «Improving the robustness of location-based routing for underwater sensor networks,» in OCEANS 2007-Europe, 2007, pp. 1-6.

[16] K. M. Pouryazdanpanah, M. Anjomshoa, S. A. Salehi, A. Afroozeh, and G. M. Moshfegh, «DS-VBF: dual sink vector-based routing protocol for underwater wireless sensor network,» in Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2014 IEEE 5th, 2014, pp. 227-232.

[17] S. EL-Rabaie, D. Nabil, R. Mahmoud, and M. A. Alsharqawy, «Underwater Wireless Sensor Networks (UWSN), Architecture, Routing Protocols, Simulation and Modeling Tools, Localization, Security Issues and Some Novel Trends,» Networkingand Communication Engineering, vol. 7, pp. 335-354, 2015.

[18] P. Xie, Z. Zhou, Z. Peng, J.-H. Cui, and Z. Shi, «Void avoidance in three-dimensional mobile underwater sensor networks,» in Wireless Algorithms, Systems, and Applications, ed: Springer, 2009, pp. 305-314.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-09-10]