

# شکل دهی وفقی پرتو آکوستیکی با روش بهبود یافته تفاضلی

نگار سرشار و مهدی بکرانی

روش‌های شکل دهی پرتو متعددی با استفاده از آرایه‌های میکروفونی خطی [۹] تا [۱۱]، مسطح [۱۲] و [۱۳] و دایروی [۱۴] تا [۱۷] ارائه شده است. شکل دهی پرتو تفاضلی<sup>۲</sup> زیرشاخه‌ای از شکل دهی پرتو است که به دلیل ویژگی‌های آن در آکوستیک اهمیت یافته است. اولین ویژگی این است که الگوهای پرتو تقریباً مستقل از فرکانس هستند که در کاربردهای مرتبط با سیگنال‌های پهن باند نظیر گفتار بسیار مهم است. ویژگی دوم این است که روش‌های تفاضلی بیشترین بهره را در حضور نویز فراهم می‌کنند. این دو ویژگی باعث می‌شود که شکل دهی پرتو تفاضلی در بسیاری از کاربردهای آکوستیکی مفید باشد. با این حال، ضعف اصلی این روش تقویت نویز سفید، به خصوص در فرکانس‌های پایین است [۱۸].

در سال‌های اخیر، روش‌های متعددی برای طراحی با شکل دهنده تفاضلی و هندسه‌های مختلف آرایه میکروفونی ارائه شده است. در [۱۴]، یک شکل دهنده تفاضلی برای آرایه میکروفونی دایروی به صورت دوایر هم‌مرکز ارائه شده است. در این روش با به کارگیری تابع بسل در تابع انتقال فیلتر، صفرهای الگوی پرتو معین می‌شوند و همچنین یک رویکرد مقاوم ارائه شده که حلقه‌های مختلف میکروفون را با شعاع‌های مناسب ترکیب می‌کند؛ به صورتی که مشکل بهره نویز سفید کاهش پیدا کرد. در [۱۲] از بسط ژاکوبی - انگر<sup>۳</sup> استفاده شده تا شکل دهنده تفاضلی برای هر نوع آرایه میکروفونی با هر شکل هندسی مسطحی قابل پیاده‌سازی باشد و سپس در [۱۵] برای آرایه با شکل هندسی دایروی هم‌مرکز، بسط مذکور برای هر حلقه از آرایه میکروفون دایره‌ای هم‌مرکز اعمال می‌گردد. مرتبه بسط در هر حلقه به تعداد میکروفون‌های آن حلقه مرتبط است که در حلقه‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد. این روش، فاکتور جهت‌دهی و بهره نویز سفید را تا حدودی بهبود می‌بخشد. در [۹]، فیلتر شکل دهی پرتو کلی با بهینه‌سازی دو شکل دهنده پرتو فرعی به صورت آنباشی<sup>۴</sup> طراحی شده که باعث کنترل عملکرد و مصالحه بین معیارهای مختلف شکل دهی پرتو می‌شود. در [۱۰] شکل دهی پرتو تفاضلی شامل دو مرحله تفاضلی و فیلتر است که باعث عملکرد بهتر شکل دهی پرتو می‌شود. شکل دهنده پرتو تفاضلی با تقریب الگوهای پرتو در [۱۳] طراحی شدند که الگوهای پرتو می‌توانند به چند جهت مختلف هدایت شوند و همچنین مشکل بهره نویز سفید که در فرکانس‌های پایین وجود دارد، با افزایش تعداد میکروفون‌ها کاهش می‌یابد. روش طراحی شکل دهنده پرتو تفاضلی در [۱۶] فقط نیاز به اطلاعات صفرها از الگوی پرتو دارد و یک ویژگی مهم این روش طراحی این است که می‌توان به کمک آن، شکل دهنده‌های پرتو تفاضلی با هر الگوی پرتو متفاوتی را طراحی کرد. توسعه پردازش سیگنال برای پردازش داده‌ها در حوزه گراف در [۱۹] بررسی شده که میکروفون‌ها با گره‌ها و تعداد میکروفون‌ها با مرتبه گراف

چکیده: شکل دهنده‌های پرتو تفاضلی عملکرد مؤثری در کاربردهای پهن باند نظیر کاربردهای آکوستیکی دارند؛ اما دارای بهره نویز سفید محدودی هستند. در این مقاله به منظور بهبود بهره نویز سفید شکل دهنده پرتو تفاضلی، یک الگوریتم شکل دهنده تفاضلی بر مبنای وزن دهی وفقی ارائه شده که از روش شکل دهی پرتو پاسخ کمینه واریانس بدون اعوجاج (MVDR) بهره می‌گیرد. به این منظور، ابتدا شکل دهی پرتو تفاضلی در دو مرحله اجرا شده که در مرحله اول، تفاضل مکانی مشاهده‌ها به دست آمده و در مرحله دوم شکل دهنده پرتو بهینه گردید. سپس با محاسبه ضرایب و تلفیق شکل دهنده‌های پرتو تفاضلی و MVDR، شکل دهنده پرتو وفقی پیشنهادی به دست آمد. در شکل دهنده پیشنهادی، سهم روش تفاضلی و روش MVDR در ایجاد سیگنال خروجی توسط ضریب تلفیق وفقی که تابع فرکانس، فاصله بین میکروفون‌ها، زاویه هدف و تعداد میکروفون‌ها است، تعیین می‌گردد. شکل دهنده پرتو پیشنهادی با در نظر گرفتن چهار میکروفون و فاصله دو سانتی متری بین میکروفون‌ها منجر به بهبود بهره نویز سفید به مقدار ۳۵ دسی بل و بهره SNR به مقدار ۱۸ دسی بل نسبت به شکل دهنده پرتو تفاضلی در فرکانس ۱ کیلوهرتز می‌شود. همچنین فاکتور جهت‌دهی در الگوریتم وفقی پیشنهادی به میزان ۲/۵ دسی بل نسبت به شکل دهنده پرتو تفاضلی بهبود پیدا کرده است.

کلیدواژه: آرایه میکروفون، بهره نویز سفید، شکل دهی پرتو، فاکتور جهت‌دهی.

## ۱- مقدمه

شکل دهی پرتو آکوستیکی به مفهوم دریافت سیگنال صوتی مطلوب از یک زاویه یا مکان خاص و تضعیف سیگنال‌های تداخلی با استفاده از فیلترهای مکانی و آرایه حسگرهای صوتی است [۱]. روش‌های شکل دهی پرتو آکوستیکی برای مکان‌یابی، ردیابی و شناسایی منابع صوتی متحرک ضروری است [۲] و [۳]. این روش‌ها همچنین به طور گسترده در ارتباطات صوتی و سیستم‌های رابط گفتاری انسان-ماشین استفاده می‌شوند تا سیگنال مطلوب را از مشاهده‌های پرنویز بازیابی کنند [۴]. امروزه، شکل دهی پرتو آکوستیکی کاربردهای گسترده‌ای در ارتباطات صوتی دارد [۲] که از آن جمله می‌توان به تشخیص گفتار، واقعیت مجازی، رباتیک، بازی‌های رایانه‌ای، ارتباط گفتاری دست‌آزاد<sup>۱</sup>، ضبط صدا با کیفیت بالا، نظارت صوتی، کنفرانس از راه دور [۵] و [۶]، حذف پژواک آکوستیکی [۷] و [۸]، تجزیه و تحلیل صحنه‌های صوتی، تلویزیون هوشمند، خانه هوشمند و سمعک اشاره کرد [۲].

این مقاله در تاریخ ۲۲ اسفند ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۸ آبان ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

نگار سرشار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، (email: sarshar.n@qut.ac.ir)

مهدی بکرانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، (email: bekran@qut.ac.ir)

2. Differential Beamforming  
3. Jacobi-Anger  
4. Cascade

شکل دهنده پرتو MVDR<sup>۲</sup> استفاده کرده است. ترکیب شکل دهی پرتو با شبکه عصبی موجب بهینه سازی داده های چندکاناله می شود [۲۷]. در این مقاله، یک روش بهبود یافته شکل دهی پرتو آکوستیکی تفاضلی برای آرایه میکروفنی خطی یکنواخت ارائه می شود. در این روش با استفاده از ترکیب شکل دهنده های پرتو MVDR و تفاضلی به یک شکل دهنده وقتی تفاضلی دست یافتیم که علاوه بر بهبود بهره نویز سفید و نسبت سیگنال به نویز (SNR)<sup>۳</sup> خروجی، فاکتور جهت دهی نیز بهبود یافته است. در شکل دهنده پیشنهادی، سهم روش شکل دهی تفاضلی پرتو و روش MVDR در ایجاد سیگنال خروجی، توسط ضرب تلفیق وقتی که تابع فرکانس، فاصله بین میکروفن ها، زاویه هدف و تعداد میکروفن ها است، تعیین می گردد. با بهبود بهره نویز سفید، الگوریتم پیشنهادی در برابر اثرات غیر ایده آل مثل نویز میکروفن ها، اثرات غیر خطی و اشباع میکروفن ها و فاصله آنها از هم مقاوم تر می شود و همچنین با بهبود فاکتور جهت دهی، تمرکز آرایه روی زاویه مطلوب بهتر می شود و اثرات تداخلی را کاهش می دهد.

## ۲- شکل دهی پرتو آکوستیکی

### ۱-۲ شکل دهی پرتو با آرایه میکروفن خطی یکنواخت

فرض می کنیم یک سیگنال منبع باند باریک  $X(f)$  در میدان دور از زاویه سمت  $\theta$  در یک محیط آکوستیک با سرعت صوت منتشر می شود و به یک آرایه خطی یکنواخت شامل  $M$  میکروفن مطابق شکل ۱ برخورد می کند. در این حالت بردار فرمان متناظر برابر است با

$$d(f, \cos \theta) = [1 \quad e^{-j2\pi f \tau \cos \theta} \quad \dots \quad e^{-j(M-1)2\pi f \tau \cos \theta}]^T \quad (۱)$$

که  $j = \sqrt{-1}$  قسمت موهومی،  $f > 0$  فرکانس،  $\tau = \delta/c$  تأخیر بین دو میکروفن متوالی در  $\theta = 0^\circ$  با  $\delta$  فاصله بین میکروفن ها و  $c$  سرعت صوت است [۲]. سیگنال میکروفن  $y(f)$  به صورت (۲) تعریف می شود

$$y(f) = [Y_1(f) \quad Y_2(f) \quad \dots \quad Y_M(f)]^T = x(f) + v(f) \quad (۲)$$

که  $Y_m(f)$  سیگنال میکروفن  $m$ ام با  $m = 1, \dots, M$  و  $v(f)$  بردار سیگنال نویز جمع شونده می باشد. همچنین سیگنال منبع مطلوب دریافتی توسط میکروفن ها به صورت  $x(f) = d(f, \cos \theta)X(f)$  است. خروجی شکل دهنده پرتو به صورت (۳) بیان می شود

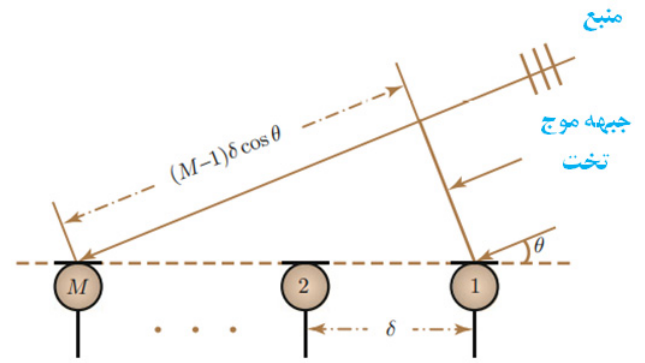
$$Z(f) = \sum_{m=1}^M H_m^*(f) Y_m(f) = h^H(f) y(f) \quad (۳)$$

که در آن علامت \* نماد مزدوج مختلط،  $H_m$  وزن شکل دهنده پرتو و  $h(f)$  بردار ضرایب شکل دهنده پرتو به صورت (۴) است

$$h(f) = [H_1(f) \quad H_2(f) \quad \dots \quad H_M(f)]^T \quad (۴)$$

### ۲-۲ معیارهای ارزیابی شکل دهنده های پرتو

معیارهای متعددی جهت ارزیابی عملکرد شکل دهنده پرتو تعریف شده است. برای ارزیابی میزان کاهش نویز منابع ناخواسته از مقایسه میزان SNR ورودی به آرایه میکروفن و SNR خروجی شکل دهنده پرتو استفاده می شود. میزان SNR ورودی، نسبت توان سیگنال مطلوب به توان نویز ناخواسته تعریف شده که از (۵) حاصل می شود [۱۸]



شکل ۱: آرایه میکروفن خطی یکنواخت [۲].

مطابقت دارد و باعث بهبود فاکتور جهت دهی می شود.

آرایه میکروفنی در مرجع [۲۰] به دو زیرآرایه مستطیلی مجازی تجزیه شده است؛ به طوری که بردار فرمان آرایه مستطیلی کلی، حاصل ضرب کروئکر از بردارهای فرمان دو زیرآرایه مستطیلی مجازی کوچک تر تعریف می شود. این روش برای طراحی شکل دهنده مقاوم پرتو تفاضلی مفید و کاربردی است. در [۲۱] به منظور بهبود عملکرد شکل دهنده پرتو، از ترکیب میکروفن های واقعی و مجازی و استفاده از تابع غیرخطی برای پردازش سیگنال های مجازی استفاده شده است. در [۱۱] با استفاده از آرایه های میکروفن با اندازه کوچک، دو شکل دهنده پرتو فرعی به صورت جداگانه بهینه سازی می شوند که باعث مصالحه بهره نویز سفید و فاکتور جهت دهی شده است. در [۱۷] از آرایه های میکروفن دایره ای هم مرکز استفاده می شود. با جایگزینی بسط ژاکوبی-انگر و برابر ساختن الگوی پرتو طراحی شده با الگوی پرتو هدف، یک معادله خطی ساخته شده و با حل این معادله، فیلتر شکل دهنده پرتو به دست می آید. الگوی پرتو طراحی شده می تواند به هر جهت در صفحه ای که میکروفن ها در آن قرار دارند، هدایت شود. با این حال روش مبتنی بر بسط نیاز به دانستن الگوی پرتو هدف دارد که اغلب در دسترس نیست. در [۲۲] یک شکل دهنده پرتو با پهنای ثابت در امتداد محور عمودی و یک شکل دهنده پرتو فوق هدایت کننده در امتداد محور افقی در نظر گرفته می شود، به طوری که از یک پارامتر قابل تنظیم، یک مصالحه بین بهره نویز سفید و فاکتور جهت دهی با یک پارامتر قابل تنظیم ایجاد می شود.

در [۲۳]، شکل دهنده های پرتو تفاضلی به عنوان تابعی از جهت های صفر پیشنهاد شده است. عملکرد یک شکل دهنده پرتو تفاضلی در صورت وجود صفر نزدیک جهت مطلوب به طور قابل توجهی تخریب می شود که با افزایش مرتبه شکل دهنده پرتو تفاضلی می توان به بهبود عملکرد کمک کرد. در [۲۴] یک عملگر مکانی میانگین چندمرحله ای دوبعدی ارائه شده که مستقلاً بر روی ستون ها و ردیف های سیگنال های مشاهده شده یک آرایه میکروفن مستطیلی یکنواخت عمل می کند. رویکرد چندمرحله ای، انعطاف پذیری بالایی را امکان پذیر می کند و همچنین بهره نویز سفید شکل دهنده پرتو را بهبود می بخشد.

در سال های اخیر روش هایی برای شکل دهی پرتو آکوستیکی بر پایه یادگیری عمیق ارائه شده است [۲۵] تا [۲۷]. برای نمونه در [۲۵] از شبکه عصبی عمیق (DNN) برای تخمین ماسک های لازم برای محاسبه ماتریس کوواریانس منابع مطلوب و نویز استفاده شده است. مرجع [۲۶] از DNN برای تخمین ماتریس های کوواریانس نویز و گفتار برای استفاده در

2. Minimum Variance Distortionless Response  
3. Signal to Noise Ratio  
4. Azimuth Angle

1. Deep Neural Network

تأخیر نسبت به یکدیگر جمع می‌شوند که میزان این تأخیرها بستگی به ساختار فیزیکی آرایه‌های میکروفون دارد. بردار وزن شکل‌دهنده پرتو تأخیر و جمع در (۱۲) تعریف می‌شود

$$h_{DS}(f, \cos \theta) = \frac{d(f, \cos \theta)}{M} \quad (12)$$

پیاده‌سازی سخت‌افزاری شکل‌دهنده‌های پرتو تأخیر و جمع آسان است و نیازی به پردازنده قوی ندارند. با این حال توانایی آنها برای مهار نویز در فرکانس‌های پایین از هر زاویه ورودی، پایین است [۲۸].

### ۲-۴ روش شکل‌دهی پرتو MVDR

شکل‌دهنده پرتو MVDR بردار وزن را به صورتی محاسبه می‌کند که توان خروجی شکل‌دهنده پرتو را تحت یک قید خطی در پاسخ آرایه نسبت به سیگنال مطلوب به حداقل برساند [۱] و [۲۹]. قید خطی مزبور برای به حداکثر رساندن حساسیت شکل‌دهنده پرتو در جهت دریافت سیگنال منبع مطلوب است. بردار وزن شکل‌دهنده پرتو MVDR در (۱۳) تعریف می‌شود که فقط به آمار نویز بستگی دارد [۱۸]

$$h_{MVDR}(f, \cos \theta) = \frac{\Phi_v^{-1}(f)d(f, \cos \theta)}{d^H(f, \cos \theta)\Phi_v^{-1}(f)d(f, \cos \theta)} \quad (13)$$

که  $\Phi_v(f)$  ماتریس چگالی طیف توان (PSD) نویز است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Phi_v(f) = E[v(f)v^H(f)] \quad (14)$$

### ۳- روش‌های شکل‌دهی پرتو تفاضلی

شکل‌دهی پرتو تفاضلی از تفاضل خروجی‌های آرایه میکروفون استفاده می‌کند و شاخه‌ای از روش‌های شکل‌دهی پرتو ثابت (غیروقفی) محسوب می‌شود. بر این اساس، آرایه‌های میکروفونی تفاضلی از نظر فیزیکی به آن دسته از آرایه‌های میکروفون گفته می‌شود که به مشق‌های مکانی یک میدان فشار صوتی مقیاس‌پذیر پاسخ می‌دهند. در عمل فاصله میکروفون،  $\delta$ ، بسیار کوچک‌تر از طول موج صوت است. طول موج صوت را می‌توان با رابطه  $\lambda = c/f$  محاسبه کرد که در آن  $f$  فرکانس صوت و  $c$  سرعت آن است. با این فرض می‌توان تفاضل‌های فشار آکوستیک واقعی را با تفاضل‌های محدود خروجی میکروفون‌ها تقریب زد [۲].

شکل‌دهنده پرتو تفاضلی در ساده‌ترین حالت به صورت دوگوشی (دومیکروفونی) پیاده‌سازی می‌شود. شکل‌دهنده پرتو تفاضلی دومیکروفونی برای طراحی الگوهای پرتو، دو شرط دارد که باید برآورده شوند: پاسخ بدون اعوجاج (بهره یک در  $\theta = 0$ ) و یک صفر در فاصله  $0 < \theta \leq \pi$  [۲]

$$d^H(f, 1)h(f) = 1 \quad (15)$$

$$d^H(f, \alpha)h(f) = 0 \quad (16)$$

که  $\alpha = \cos \theta$  (صفر در زاویه  $\theta$ ) در  $-1 \leq \alpha < 1$  داده می‌شود. پس بردار وزن شکل‌دهنده پرتو تفاضلی دومیکروفونی طبق (۱۷) تعریف می‌شود

$$h(f) = \frac{1}{1 - e^{j\pi f \tau (1-\alpha)}} \begin{bmatrix} 1 \\ -e^{-j\pi f \tau \alpha} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$iSNR(f) = \frac{\phi_X(f)}{\phi_Y(f)} \quad (5)$$

که در آن  $\phi_X(f) = E[|X(f)|^2]$  و  $\phi_Y(f) = E[|v_Y(f)|^2]$  به ترتیب واریانس  $X(f)$  و واریانس  $v_Y(f)$  (اولین عنصر  $v(f)$  بوده و  $E[\cdot]$  امید ریاضی را نشان می‌دهد. همچنین SNR خروجی به صورت (۶) تعریف می‌شود [۱۸]

$$oSNR[h(f)] = \phi_X(f) \frac{|h^H(f)d(f, \cos \theta)|^2}{h^H(f)\phi_Y(f)h(f)} \quad (6)$$

هر شکل‌دهنده پرتو آکوستیکی حساسیت‌های متفاوتی نسبت به امواج صوتی که از جهت‌های مختلف می‌رسد، دارد. الگوی پرتو، حساسیت شکل‌دهنده پرتو را به یک موج تخت (سیگنال منبع) که از جهت  $\theta$  به آرایه برخورد می‌کند، توصیف می‌نماید. در این صورت داریم [۱۸]

$$B[h(f), \cos \theta] = d^H(f, \cos \theta)h(f) = \sum_{m=1}^M H_m(f) e^{j(m-1)\pi f \tau \cos \theta} \quad (7)$$

در شکل‌دهنده‌های پرتو تفاضلی برای اطمینان از اینکه شکل‌دهی به صورت تفاضلی انجام می‌شود، فرض می‌گردد سیگنال منبع مطلوب از زاویه  $\theta = 0^\circ$  (یعنی در راستای جهت آرایه) منتشر می‌شود و به دلیل تقارن بردار فرمان، تنها جهت‌هایی که می‌توان هر نوع الگوی پرتو را طراحی کرد در راستای زاویه‌های صفر ( $0$  و  $\pi$ ) هستند؛ در جهت‌های دیگر، طراحی الگوهای پرتو بسیار محدود است [۲]. بنابراین داریم

$$y(f) = d(f, 1)X(f) + v(f) \quad (8)$$

بهره نویز سفید (WNG)<sup>۱</sup>، معیاری با هدف ارزیابی توانایی آرایه برای کاهش یا حذف نویز ناهمبسته است که در شکل‌دهنده پرتو تفاضلی به صورت (۹) تعریف می‌شود [۷]

$$W[h(f)] = \frac{|h^H(f)d(f, 1)|^2}{h^H(f)h(f)} \quad (9)$$

همچنین فاکتور جهت‌دهی (DF)<sup>۲</sup>، میزان جهت‌دهی زاویه‌ای شکل‌دهنده پرتو را تعیین می‌کند که به صورت (۱۰) تعریف می‌شود

$$D[h(f)] = \frac{|h^H(f)d(f, 1)|^2}{h^H(f)\Gamma_{\cdot, \pi}(f)h(f)} \quad (10)$$

که در آن

$$[\Gamma_{\cdot, \pi}(f)]_{ij} = \frac{\sin[2\pi f(j-i)\tau]}{2\pi f(j-i)\tau} = \text{sinc}[2f(j-i)\tau] \quad (11)$$

و  $i, j = 1, 2, \dots, M$  است [۱۴].

با توجه به (۹) و (۱۰)، تفاوت در معیارهای DF و WNG به ماتریس  $\Gamma_{\cdot, \pi}(f)$  برمی‌گردد و بنابراین حداکثرسازی یک معیار نمی‌تواند منتهی به بهبود معیار دیگر شود؛ بلکه لازم است مصالحه‌ای بین این دو معیار در طراحی شکل‌دهنده پرتو در نظر گرفته شود [۱۱].

### ۳-۲ روش شکل‌دهی پرتو تأخیر و جمع

در شکل‌دهی پرتو تأخیر و جمع<sup>۳</sup>، سیگنال‌های دریافتی صرفاً با اعمال

3. Delay and Sum  
4. Power Spectral Density

1. White Noise Gain  
2. Directivity Factor

$$\overline{h_{c,\ast}}(f) = [\tilde{h}_{MWNG}^T(f) \quad h_{MDF}^T(f)]^T \quad (28)$$

جهت بهره‌مندی از حداکثر بهره نویز سفید از ترکیب (۲۶) استفاده می‌شود. برای به‌حداکثر رساندن فاکتور جهت‌دهی از ترکیب (۲۷) و نیز برای مصالحه بین فاکتور جهت‌دهی و بهره نویز سفید از ترکیب‌های (۲۵) و (۲۸) استفاده می‌شود [۱۱].

#### ۴- روش شکل‌دهی پرتو پیشنهادی

از جمله نقاط ضعف شکل‌دهنده پرتو تفاضلی می‌توان به تقویت نویز سفید، تخریب الگوهای پرتو در فرکانس‌های بالا در صورتی که فاصله بین میکروفن‌ها زیاد باشد و کاهش فاکتور جهت‌دهی در فرکانس‌های بالا اشاره کرد. چنانچه گفته شد، روش تأخیر و جمع توانایی کمی برای مهار نویزهای جهتی در فرکانس‌های پایین دارد؛ ولی بهره نویز سفید خوبی دارد. بهره نویز سفید در روش MVDR در فرکانس‌های پایین کمتر است؛ ولی فاکتور جهت‌دهی خوبی دارد. با توجه به مزایای روش تفاضلی به دیگر روش‌ها، روش شکل‌دهی وقتی تفاضلی بهبودیافته‌ای با تلفیق روش MVDR ارائه می‌کنیم که علاوه بر بهره‌مندی از مزایای آنها بهبود بهره نویز سفید و فاکتور جهت‌دهی را نیز در بر داشته باشد.

بردار وزن شکل‌دهنده پرتو وقتی پیشنهادی با تلفیق شکل‌دهنده پرتو MVDR و شکل‌دهنده پرتو تفاضلی در (۲۹) تعریف می‌شود

$$h(f) = \alpha(f)h_{Diff}(f) + (1 - \alpha(f))h_{MVDR}(f) \quad (29)$$

در اینجا نحوه محاسبه ضرایب تلفیق وقتی شکل‌دهنده پرتو MVDR و شکل‌دهنده پرتو تفاضلی بیان می‌شود. خروجی شکل‌دهنده پرتو تلفیق شده به صورت (۳۰) محاسبه می‌گردد

$$\begin{aligned} z(f) &= h^H(f)y(f) = \\ & (h_{MVDR}^H(f)d(f, \nu) + \tau(f)h_{Diff}^H(f)d(f, \nu))X(f) + \\ & h_{Diff}^H(f)\Delta v(f) + h_{MVDR}^H(f)v(f) \end{aligned} \quad (30)$$

با در نظر گرفتن قید بدون اعوجاج داریم

$$h_{MVDR}^H(f)d(f, \nu) + \tau(f)h_{Diff}^H(f)d(f, \nu) = 1 \quad (31)$$

برای به‌دست آوردن ضریب تلفیق  $\alpha(f)$ ، نحوه وزن‌دهی دو شکل‌دهنده پرتو به صورت (۳۲) و (۳۳) خواهد بود

$$h_{MVDR}^H(f)d(f, \nu) = 1 - \alpha(f) \quad (32)$$

$$\tau(f)h_{Diff}^H(f)d(f, \nu) = \alpha(f) \quad (33)$$

با جاگذاری (۱۸) در (۳۳) ضریب تلفیق  $\alpha(f)$  طبق (۳۴) به‌دست می‌آید

$$\alpha(f) = \sqrt{\frac{\tau(f)}{|\tau(f)|}} d^H(f, \nu)(\Delta\Gamma_{\cdot, \pi}(f)\Delta^T)^{-1}d(f, \nu) \quad (34)$$

با توجه به (۳۴)، ضریب تلفیق به‌دست‌آمده تابع شرایط سیستم بوده و با تغییر فرکانس، فاصله بین میکروفن‌های آرایه، زاویه هدف و تعداد میکروفن‌ها می‌تواند با شرایط جدید سیستم وفق یابد.

لازم به ذکر است که در این مقاله، آرایه میکروفن را به صورت خطی و با فواصل یکنواخت در نظر گرفتیم؛ اما در صورتی که هندسه آرایه میکروفنی تغییر کند، با انجام محاسبات جدید برای بردار فرمان، روش‌های تفاضلی و MVDR می‌توان روش تلفیقی پیشنهاد شده را برای آرایه‌های میکروفنی غیرخطی و غیریکنواخت نیز تعمیم داد. در جدول ۱ شبه‌کد روش پیشنهادی بیان شده است.

شکل‌دهنده پرتو تفاضلی فوق را می‌توان به حالت‌های چندمیکروفنی تعمیم داد. در این حالت بردار وزن شکل‌دهنده پرتو تفاضلی در (۱۸) تعریف می‌شود [۱۰]

$$h_{Diff}(f) = \frac{\tau(f)(\Delta\Gamma_{\cdot, \pi}(f)\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)}{\sqrt{|\tau(f)|} d^H(f, \nu)(\Delta\Gamma_{\cdot, \pi}(f)\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)} \quad (18)$$

که در رابطه بالا  $\Delta$  عملگر تفاضل مکانی پیشرو<sup>۱</sup> می‌باشد که با تعریف  $p$  به‌عنوان مرتبه آرایه میکروفن با  $1 \leq p < M$ ، عملگر  $\Delta$  با ابعاد  $(M-p) \times M$  به‌صورت (۱۹) تعریف می‌شود

$$\Delta = \begin{bmatrix} q^T & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & q^T & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdots & q^T \end{bmatrix} \quad (19)$$

و  $q$  برداری به طول  $p+1$  به‌صورت رابطه زیر است [۱۰]

$$q = [(-1)^p \binom{p}{\cdot} \quad (-1)^{p-1} \binom{p}{1} \quad \cdots \quad (-1)^1 \binom{p}{p-1} \quad 1]^T \quad (20)$$

در [۱۱] چند روش شکل‌دهنده پرتو تفاضلی که بین فاکتور جهت‌دهی و بهره نویز سفید مصالحه برقرار می‌کند، ارائه شده که در این روش‌ها آرایه میکروفنی به دو زیرآرایه تجزیه می‌شود. برای استخراج شکل‌دهنده‌های پرتو بهینه می‌توان از حداکثرسازی معیار WNG و یا DF استفاده کرد. با به‌حداکثر رساندن WNG، شکل‌دهنده پرتو تفاضلی  $h'_{MWNG}(f)$  به‌دست می‌آید [۱۱]

$$h'_{MWNG}(f) = \frac{(1 - \alpha)(\Delta\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)}{\tau^*(f)d^H(f, \nu)(\Delta\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)} \quad (21)$$

که  $\tau(f) = e^{-j\nu\pi f\delta/c} - 1$  و  $\alpha$  ثابتی است که برای مصالحه بین فاکتور جهت‌دهی و بهره نویز سفید در نظر گرفته شده و با حداکثر کردن DF، شکل‌دهنده پرتو تفاضلی  $h'_{MDF}(f)$  به‌دست می‌آید [۱۱]

$$h'_{MDF}(f) = \frac{(1 - \alpha)(\Delta\Gamma_{\cdot, \pi}(f)\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)}{\tau^*(f)d^H(f, \nu)(\Delta\Gamma_{\cdot, \pi}(f)\Delta^T)^{-1}d(f, \nu)} \quad (22)$$

شکل‌دهنده پرتو در حالت غیرتفاضلی برای بهره‌مندی از حداکثر بهره نویز سفید از شکل‌دهنده پرتو تأخیر و جمع استفاده می‌کند که با  $\tilde{h}(f)$  نشان داده می‌شود [۱۱]

$$\tilde{h}_{MWNG}(f) = \alpha d(f, \nu) \quad (23)$$

در شکل‌دهنده پرتو  $\tilde{h}(f)$  همچنین می‌توان DF را حداکثر کرد که شکل‌دهنده پرتو MDF به‌دست می‌آید [۱۱]

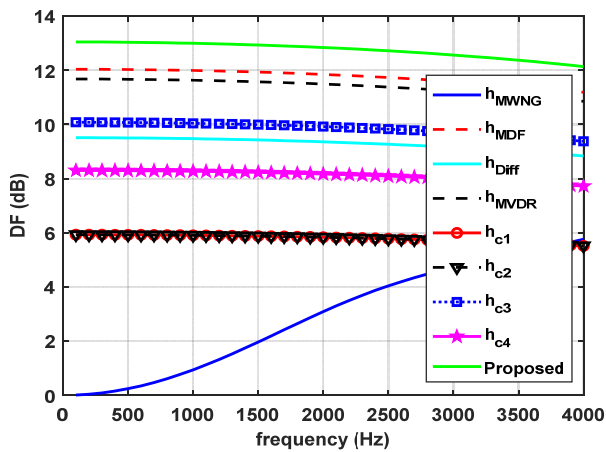
$$\tilde{h}_{MDF}(f) = \frac{\alpha\Gamma_{\cdot, \pi}^{-1}(f)d(f, \nu)}{d^H(f, \nu)\Gamma_{\cdot, \pi}^{-1}(f)d(f, \nu)} \quad (24)$$

و در نهایت چهار نوع ترکیب شکل‌دهنده پرتو تفاضلی به فرم‌های زیر به‌دست می‌آید

$$\overline{h_{c,\ast}}(f) = [\tilde{h}_{MDF}^T(f) \quad h_{MWNG}^T(f)]^T \quad (25)$$

$$\overline{h_{c,\ast}}(f) = [\tilde{h}_{MWNG}^T(f) \quad h_{MWNG}^T(f)]^T \quad (26)$$

$$\overline{h_{c,\ast}}(f) = [\tilde{h}_{MDF}^T(f) \quad h_{MDF}^T(f)]^T \quad (27)$$



شکل ۱: نمودار DF شکل دهنده پرتو در حالت چهار میکروفن.

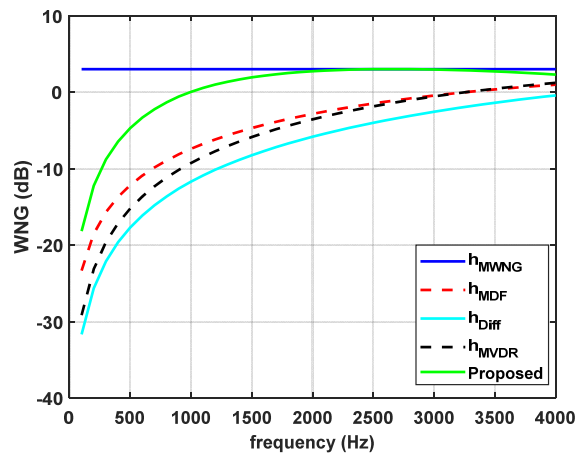
جدول ۱: شبه کد روش پیشنهادی.

مرحله	محاسبات
۱	مقادیر اولیه پیش فرض: $x(f), v(f), c, \delta, \theta$ بردار فرمان و چگالی طیف توان نویز
۲	$d(f, \cos \theta) = [1 \quad e^{-j\pi f \tau \cos \theta} \quad \dots \quad e^{-j(M-1)\pi f \tau \cos \theta}]^T$ $\Phi_v(f) = E[v(f)v^H(f)]$ تابع شکل دهی پرتو MVDR
۳	$h_{MVDR}(f, \cos \theta) = \frac{\Phi_v^{-1}(f)d(f, \cos \theta)}{d^H(f, \cos \theta)\Phi_v^{-1}(f)d(f, \cos \theta)}$ محاسبه $\Delta$ از (۱۹) و (۲۰)
۴	$\tau_c(f) = e^{-\frac{j\pi f \delta}{c} - 1}$ $[\Gamma_{\tau, \pi}(f)]_{ij} = \frac{\sin[\pi f(j-i)\tau_c]}{\pi f(j-i)\tau_c}$ تابع شکل دهی تفاضلی
۵	$h_{Diff}(f) = \frac{\tau_c(f)(\Delta \Gamma_{\tau, \pi}(f) \Delta^T)^{-1} d(f, \nu)}{\sqrt{\tau_c(f)^T d^H(f, \nu) (\Delta \Gamma_{\tau, \pi}(f) \Delta^T)^{-1} d(f, \nu)}}$ ضریب تلفیق پیشنهادی
۶	$\alpha(f) = \sqrt{\tau_c(f)^T d^H(f, \nu) (\Delta \Gamma_{\tau, \pi}(f) \Delta^T)^{-1} d(f, \nu)}$ تابع شکل دهنده پرتو
۷	$h(f) = \alpha(f)h_{Diff}(f) + (1 - \alpha(f))h_{MVDR}(f)$ خروجی شکل دهنده پرتو
۸	$z(f) = h^H(f)y(f)$

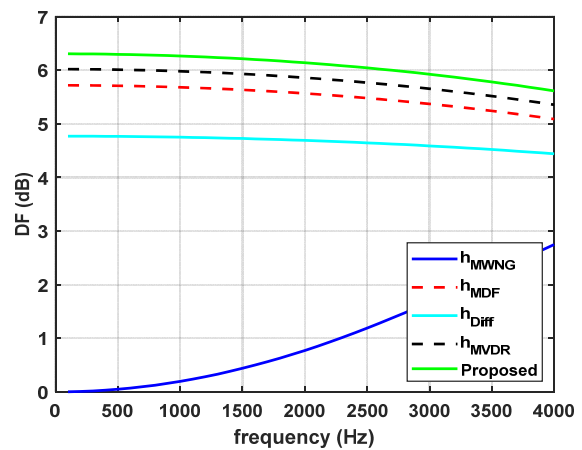
جدول ۲: پارامترهای شبیه سازی.

پارامترها	توضیحات	مقادیر
$f$	فرکانس	۲۰ تا ۴۰۰۰ هرتز
$c$	سرعت صوت	۳۴۰ m/s
$\delta$	فاصله بین میکروفن ها	۲ cm
$M$	تعداد میکروفن ها	۲ و ۴
$\theta$	زاویه هدف	۰ درجه

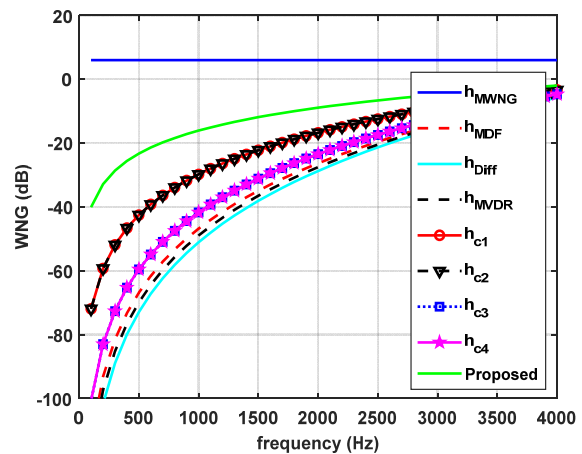
در شکل های مذکور،  $h_{MWNG}$  شکل دهنده پرتو غیرتفاضلی با حداکثر DF،  $h_{MDF}$  شکل دهنده پرتو غیرتفاضلی با حداکثر  $h_{Diff}$ ،  $h_{MVDR}$  تفاضلی،  $h_{MVDR}$  روش MVDR و  $h_{c1}$  تا  $h_{c4}$  چهار نوع شکل دهنده ترکیبی اشاره شده در (۲۵) تا (۲۸) است. لازم به ذکر است که روش های ترکیبی نیاز به حداقل ۴ میکروفن دارند و بنابراین در نمودارهای حالت دومیکروفنی شکل ۲ و ۳ جهت مقایسه وارد نشده اند.



شکل ۲: نمودار WNG شکل دهنده پرتو در حالت دو میکروفن.



شکل ۳: نمودار DF شکل دهنده پرتو در حالت دو میکروفن.

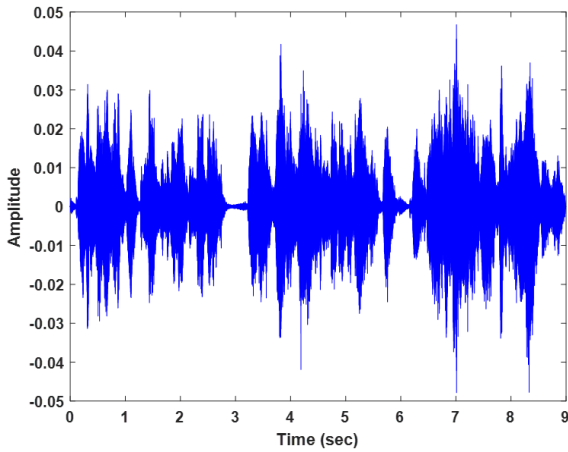


شکل ۴: نمودار WNG شکل دهنده پرتو در حالت چهار میکروفن.

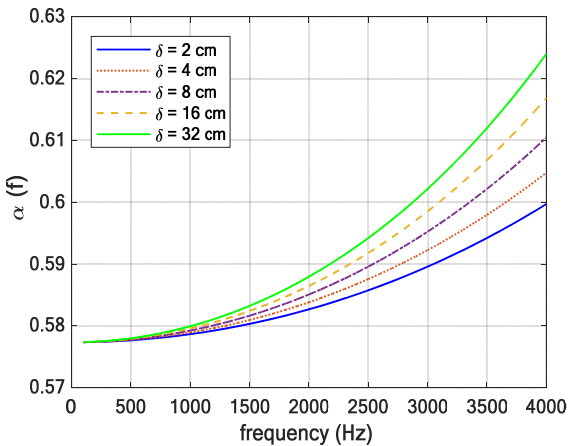
### ۵- نتایج شبیه سازی

در جدول ۲ پارامترهای شبیه سازی آمده اند. جهت ارزیابی روش ها از معیارهای بهره نویز سفید، فاکتور جهت دهی و نسبت سیگنال به نویز استفاده می شود.

همچنین در شبیه سازی ها نویز سفید اعمال خواهد شد. چگالی طیف توان نویز با توجه به (۱۴) با استفاده از تخمین زمانی ماتریس کوواریانس سیگنال نویز محاسبه می شود. نمودارهای بهره نویز سفید و فاکتور جهت دهی این شکل دهنده پرتو پیشنهادی در حالت دو میکروفنی و چهار میکروفنی به صورت شکل های ۲ تا ۵ به دست آمد.

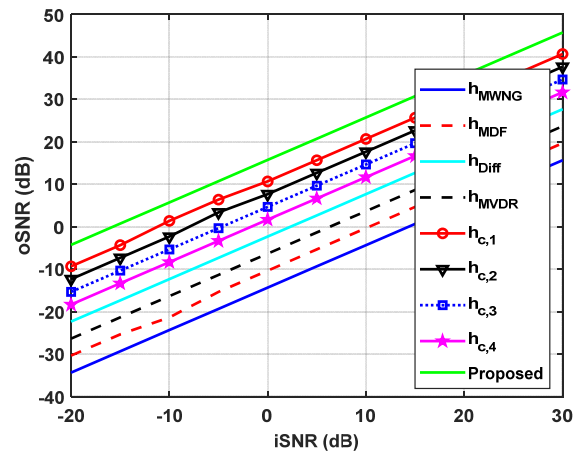


شکل ۹: نمودار خروجی شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی.

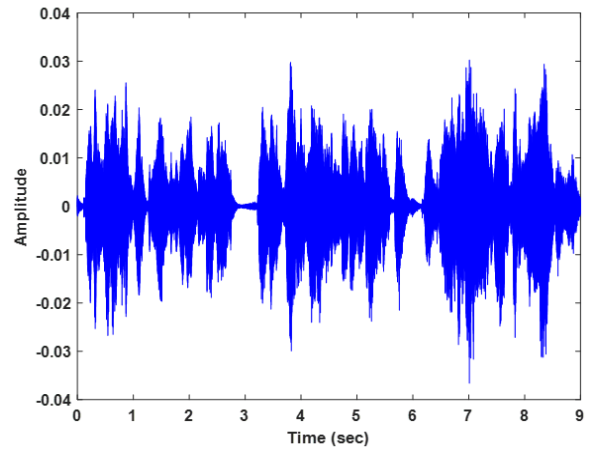
شکل ۱۰: نمودار  $\alpha(f)$  برحسب فرکانس به‌ازای مقادیر مختلف  $\delta$ .

شکل ۶ میزان SNR خروجی را در روش‌های مورد بررسی در حالت چهارمیکروفنه به‌ازای SNR ورودی در بازه ۲۰- تا ۳۰ دسی‌بل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، SNR خروجی شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها بالاتر است و به‌طور میانگین، حدود ۵ دسی‌بل نسبت به روش ترکیبی  $h_{c,1}$  بهبود بیشتری نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بهبودهای حاصل در میزان SNR خروجی، بهره نویز سفید و فاکتور جهت‌دهی در شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی نسبت به سایر شکل‌دهنده‌های پرتو منجر به افزایش پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی شده است. افزایش پیچیدگی محاسباتی، ناشی از تلفیق الگوریتم شکل‌دهنده تفاضلی و MVDR و همچنین مربوط به محاسبه ضرایب تلفیق می‌باشد.

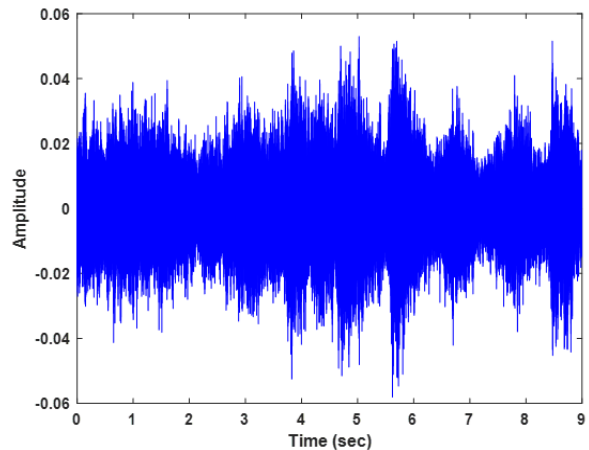
در ادامه از سیگنال‌های صوتی استفاده می‌کنیم. در شبیه‌سازی‌ها فرکانس نمونه‌برداری برابر  $f_s = 16 \text{ KHz}$  در نظر گرفته شد. تبدیل STFT از پنجره‌های Hann با تعداد  $N_{STFT} = 512$  نمونه و با ۵۰ درصد همپوشانی بین پنجره‌ها در نظر گرفته شد. از فایل‌های ضبط‌شده آزمایشگاه بخش مهندسی برق (ESAT) در KU Leuven استفاده شده است [۳۰]. در شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی مقدار SNR ورودی، ۱۵ دسی‌بل در نظر گرفته می‌شود. نمودارهای سیگنال اولیه، شکل موج ورودی نویزدار و خروجی شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی به‌صورت شکل‌های ۷ تا ۹ خواهد شد. با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که میزان نویز سیگنال منبع به‌خوبی کاهش یافته است. در نمونه مورد بررسی، میزان SNR سیگنال خروجی شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی به ۳۱ دسی‌بل رسیده



شکل ۶: نمودار SNR خروجی برحسب SNR ورودی شکل‌دهنده‌های پرتو در فرکانس ۱ کیلوهرتز.



شکل ۷: سیگنال صوتی منبع مطلوب.



شکل ۸: شکل موج ورودی نویزدار شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی در یک میکروفن.

در شکل ۲، روش پیشنهادی نسبت به روش‌های تفاضلی، MVDR و شکل‌دهنده با حداکثر DF، بهره نویز سفید بالاتری دارد. از طرفی در مقایسه با روش غیرتفاضلی  $h_{MWNG}$  که WNG را به حداکثر می‌رساند و در تمام فرکانس‌ها عملکرد یکسانی برای WNG دارد، شکل‌دهنده پرتو پیشنهادی متناسب با ضریب تلفیق محاسبه‌شده، موجب مصالحه بین WNG و DF می‌شود و بنابراین نسبت به  $h_{MWNG}$ ، بهره نویز سفید کمتری دارد. مطابق شکل‌ها مشاهده می‌شود بهره نویز سفید و فاکتور جهت‌دهی روش پیشنهادی نسبت به روش‌های تفاضلی و روش MVDR بهبود یافته است.

- [15] G. Huang, I. Cohen, J. Chen, and J. Benesty, "Continuously steerable differential beamformers with null constraints for circular microphone arrays," *J. of the Acoustical Society of America*, vol. 148, no. 3, pp. 1248-1258, Sept. 2020.
- [16] G. Huang, J. Chen, and J. Benesty, "Insights into frequency-invariant beamforming with concentric circular microphone arrays," *IEEE/ACM Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 26, no. 12, pp. 2305-2318, Dec. 2018.
- [17] G. Huang, J. Benesty, and J. Chen, "Design of robust concentric circular differential microphone arrays," *J. of the Acoustical Society of America*, vol. 141, no. 5, pp. 3236-3249, May 2017.
- [18] J. Benesty, I. Cohen, and J. Chen, *Fundamentals of Signal Enhancement and Array Signal Processing*, John Wiley & Sons, Dec. 2017.
- [19] G. Huang, J. Benesty, I. Cohen, and J. Chen, "Differential beamforming on graphs," *IEEE/ACM Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 28, pp. 901-913, Feb. 2020.
- [20] G. Huang, J. Benesty, J. Chen, and I. Cohen, "Robust and steerable kronecker product differential beamforming with rectangular microphone arrays," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'20*, pp. 211-215, Barcelona, Spain, 4-8 May 2020.
- [21] M. Bekrani, A. H. T. Nguyen, and A. W. H. Khong, "An adaptive non-linear process for under-determined virtual microphone beamforming," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'21*, pp. 4495-4499, Toronto, Canada, 6-11 Jun. 2021.
- [22] G. Itzhak and I. Cohen, "Differential and constant-beamwidth beamforming with uniform rectangular arrays," in *Proc. Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement, WAENC'22*, 5 pp., Bamberg, Germany, 5-8 Sept. 2022.
- [23] X. Wang, I. Cohen, J. Benesty, and J. Chen, "Study of the null directions on the performance of differential beamformers," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'22*, pp. 4928-4932, Singapore, Singapore, 23-27 May 2022.
- [24] G. Itzhak, I. Cohen, and J. Benesty, "Multistage approach for steerable differential beamforming with rectangular arrays," *Speech Communication*, vol. 142, pp. 61-76, Jul. 2022.
- [25] A. A. Nugraha, K. Sekiguchi, M. Fontaine, Y. Bando, and K. Yoshii, "DNN-free low-latency adaptive speech enhancement based on frame-online beamforming powered by block-online FastMNMF," in *Proc. Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement, IWAENC'22*, 5 pp., Bamberg, Germany, 5-8 Sept. 2022.
- [26] H. Kim, K. Kang, and J. W. Shin, "Factorized MVDR deep beamforming for multi-channel speech enhancement," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 29, pp. 1898-1902, 2022.
- [27] X. Xiao, et al., "Deep beamforming networks for multi-channel speech recognition," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'16*, pp. 5745-5749, Shanghai, China, 20-25 Mar. 2016.
- [28] I. McCowan, *Microphone Arrays: A Tutorial*, Queensland University, Australia, pp. 1-38, Apr. 2001.
- [29] E. A. P. Habets, J. Benesty, I. Cohen, S. Gannot, and J. Dmochowski, "New insights into the MVDR beamformer in room acoustics," *IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 158-170, Jun. 2009.
- [30] T. Dietzen, S. Doclo, M. Moonen, and T. V. Waterschoot, "Integrated sidelobe cancellation and linear prediction Kalman filter for joint multi-microphone speech dereverberation, interfering speech cancellation, and noise reduction," *IEEE/ACM Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 28, pp. 740-754, 2020.

**نگار سرشار** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ از دانشگاه‌های تربیت دبیر شهید رجایی و صنعتی قم به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال، پردازش تصویر و افزاره‌های نوری گرافن.

**مهدی بکرانی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه فردوسی مشهد و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق، به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است. وی در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ به عنوان دستیار پژوهشی در دانشگاه صنعتی نایب‌انگ مشغول به فعالیت بود و از سال ۱۳۹۱ تاکنون عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی قم می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال‌های آکوستیکی و فراصوتی، و الگوریتم‌های وقتی.

است.

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات ضریب تلفیق  $\alpha(f)$  بر حسب فرکانس به‌ازای فواصل مختلف بین میکروفن‌ها رسم شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس و همچنین با افزایش فاصله بین میکروفن‌ها، ضریب تلفیق  $\alpha(f)$  افزایش می‌یابد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های شکل‌دهی پرتو تأخیر و جمع، MVDR و تفاضلی بررسی شد. دو معیار مهم در شکل‌دهی پرتو، بهره نویز سفید و فاکتور جهت‌دهی هستند که برای شکل‌دهنده‌های پرتو تأخیر و جمع، MVDR و تفاضلی بررسی گردید. همچنین روش بهبودیافته شکل‌دهی پرتو تفاضلی ارائه شد که علاوه بر مزایای روش تفاضلی از مزایای روش MVDR برخوردار باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شکل‌دهنده پرتو پیشنهادشده دارای بهره نویز سفید، SNR خروجی و فاکتور جهت‌دهی بهتر نسبت به شکل‌دهنده‌های پرتو تفاضلی و MVDR می‌باشد.

## مراجع

- [1] T. Tripathy and C. Novak, *Acoustic Beamforming: Automotive Applications for Noise, Vibrations and Harshness*, University of Windsor, 2017.
- [2] J. Benesty, C. Pan, and J. Chen, *Fundamentals of Differential Beamforming*, Singapore: Springer, Apr. 2016.
- [3] U. Michel, "History of acoustic beamforming," in *Proc. 1st Berlin Beamforming Conf.*, 17 pp., Berlin, Germany, 21-22 Nov. 2006.
- [4] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, *Microphone Array Signal Processing*, Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [5] M. Bekrani and M. Lotfzad, "A modified wavelet-domain adaptive filtering algorithm for stereophonic acoustic echo cancellation in the teleconferencing application," in *Proc. Int. Symp. on Telecommunications*, pp. 548-554, Tehran, Iran, 27-28 Aug. 2008.
- [6] M. Bekrani, A. W. H. Khong, and M. Lotfzad, "Neural network based adaptive echo cancellation for stereophonic teleconferencing application," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo, Singapore*, Singapore, pp. 1172-1177, 19-23 Jul. 2010.
- [7] م. بکرانی، "طراحی و تحلیل یک الگوریتم وقتی LMS/Newton بهبودیافته در کاربرد حذف پژواک آکوستیکی،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ب- مهندسی کامپیوتر*، سال ۱۸، شماره ۲، صص. ۱۱۶-۱۰۵، تابستان ۱۳۹۹.
- [8] M. Bekrani and H. Zayyani, "A weighted soft-max PNLM algorithm for sparse system identification," *International J. of Information and Communication Technology Research*, vol. 8, no. 3, pp. 7-14, Summer 2016.
- [9] W. Yang, G. Huang, J. Benesty, and J. Chen, "On the design of flexible kronecker product beamformers with linear microphone arrays," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'19*, pp. 441-445, Brighton, UK, 12-17 May 2019.
- [10] G. Huang, J. Benesty, I. Cohen, and J. Chen, "A simple theory and new method of differential beamforming with uniform linear microphone arrays," *IEEE/ACM Trans. on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 28, pp. 1079-1093, 2020.
- [11] G. Huang, Y. Wang, J. Benesty, I. Cohen, and J. Chen, "Combined differential beamforming with uniform linear microphone arrays," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'21*, pp. 781-785, Toronto, Canada, 6-11 Jun. 2021.
- [12] G. Huang, J. Chen, J. Benesty, I. Cohen, and X. Zhao, "Steerable differential beamformers with planar microphone arrays," *EURASIP J. on Audio, Speech, and Music Processing*, vol. 2020, Article ID: 15, 18 pp., 2020.
- [13] G. Huang, J. Chen, and J. Benesty, "On the design of differential beamformers with arbitrary planar microphone array geometry," *J. of the Acoustical Society of America*, vol. 144, no. 1, Article ID: EL66, Jul. 2018.
- [14] X. Wang, G. Huang, I. Cohen, J. Benesty, and J. Chen, "Robust steerable differential beamformers with null constraints for concentric circular microphone arrays," in *Proc. Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'21*, pp. 4465-4469, Toronto, Canada, 6-11 Jun. 2021.