

## ارائه الگوریتمی مقاوم در برابر تغییرات ناگهانی آرایش میکروفونی برای جهت‌یابی منابع صوتی ناپیوسته

عقیل عبیری<sup>۱</sup>، محمدحسین مدنی<sup>۲</sup>\*

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری برق مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، abiriaghil@yahoo.com

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده برق مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، madani1355@yahoo.com

### چکیده

جهت‌یابی صوتی به معنای محاسبه جهت ورود سیگنال صوتی منتشر شده از منبع در آرایه میکروفونی می‌باشد و با توجه به انواع روش‌های موجود که در این مقاله دسته‌بندی شده، صورت می‌گیرد. ساختار آرایش میکروفونی نقش به‌سزایی در دقت جهت‌یابی منابع صوتی دارد و با آسیب یک یا چند میکروفون در آرایه، دقت جهت‌یابی کاهش می‌یابد. در این مقاله، الگوریتمی جدید برای جهت‌یابی منابع صوتی ناپیوسته ارائه گردیده که میزان حساسیت آن در برابر تغییرات ناگهانی آرایش میکروفونی در محیط واقعی کاهش یافته است. الگوریتم پیشنهادی بر مبنای تاخیر زمان ورود سیگنال صوتی ناپیوسته به میکروفون‌ها عمل نموده و با هرگونه تغییر در آرایش میکروفونی منطبق می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، متناسب با آرایش میکروفونی، ماتریس تاخیر زمانی بین میکروفون‌های آرایه در فضای سه بعدی از روش SRP-PHAT با فرض استقرار منبع فرضی در ۵۰۰ متر، شبیه‌سازی می‌گردد. این ماتریس با تغییر آرایش میکروفونی بصورت خودکار و بدون انجام محاسباتی، بروزرسانی می‌گردد. سیگنال ورودی منابع صوتی در محیط نیز که حاوی ماتریس تاخیر زمانی کاندید می‌باشد از روی میزان تطبیق با ماتریس شبیه‌سازی شده مطابق با روش پیشنهادی در این مقاله، جهت‌یابی می‌گردد که دقت آن وابسته به دقت ماتریس شبیه‌سازی می‌باشد. عدم محاسبات پیچیده، ساده‌سازی و وقتی بودن جهت‌یابی با تغییر آرایش میکروفونی، از ویژگی‌های اصلی این الگوریتم به حساب می‌آید. همچنین الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی، در تست‌های محیطی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مراجع مختلف مقایسه گردیده است. نتایج عملکردی دقت ۰٫۱ درجه را در جهت‌یابی منبع صوتی ناپیوسته در فاصله ۵۰۰ متری دارد.

### کلیدواژه

جهت‌یابی، منابع صوتی ناپیوسته، تاخیر زمان ورود، آرایش میکروفونی، الگوریتم SRP-PHAT

### مقدمه

استفاده از یک آرایه میکروفونی دارای دقت کمی می‌باشد لذا در عمل از چندین آرایه میکروفونی بصورت شبکه‌ای بهره می‌برند [۲].

بصورت کلی چینش حسگرهای آکوستیکی با توجه به مراجع بررسی شده به سه دسته عمده ذیل تقسیم‌بندی می‌گردند: الف) استفاده از پراکندگی شبکه‌ای میکروفون‌ها با توجه به ساختار محیط، که تا حدود زیادی بر مشکلات انتشار امواج در چنین محیط‌هایی که مهمترین آن‌ها طنین<sup>۱</sup> و نویز می‌باشد، غلبه کرده است [۳]. در مراجع [۴-۷] نیز برای اخذ سیگنال‌های منابع ناپیوسته صوتی و افزایش دقت در جهت‌یابی از سنسورهای شبکه‌ای پراکنده روی زمین، بهره برده‌اند.

یکی از موضوعات تحقیقاتی در زمینه پردازش سیگنال‌های صوتی، مبحث جهت‌یابی منابع صوتی توسط حسگرهای آکوستیکی می‌باشد. پردازش مشخصه‌های سیگنال ورودی اعم از دامنه، انرژی، فرکانس و تاخیر زمانی ورود سیگنال به آرایه میکروفونی، جهت‌یابی منابع صوتی فعال در محیط را به دنبال دارد. حداکثر فاصله جهت‌یابی منابع صوتی نیز وابسته به فرکانس منبع، متفاوت خواهد بود و هرچه این سیگنال در فرکانس کمتر باشد، قابلیت انتشار تا فواصل طولانی را دارد به شرط آن که توان منبع به اندازه کافی زیاد باشد [۱]. از این رو موقعیت‌یابی منابع صوتی به دو دسته کلی میدان دور و میدان نزدیک طبقه‌بندی می‌گردد. موقعیت‌یابی منابع میدان دور با

<sup>۱</sup> Reverberation

در ادامه ضمن دسته‌بندی الگوریتم‌های جهت‌یابی و مقایسه آن‌ها، الگوریتم استفاده شده در این مقاله تشریح گردیده است. همچنین در بخش دیگری جهت‌یابی سیگنال‌های صوتی در محیط بیرونی و حداقل تعداد میکروفون‌های لازم در این زمینه تشریح گردیده است. سرانجام نیز ضمن بیان الگوریتم پیشنهادی به نتایج دقت جهت‌یابی در تست محیطی و مقایسه این نتایج با شبیه‌سازی‌ها و مراجع مختلف، پرداخته شده است.

### دسته‌بندی الگوریتم‌های جهت‌یابی

تاکنون الگوریتم‌های زیادی در زمینه جهت‌یابی منابع صوتی در محیط واقعی بیان شده است و این الگوریتم‌ها کاربرد وسیعی در صنایع نظامی و غیرنظامی دارند. بطور کلی با استفاده از مراجع بررسی شده، الگوریتم‌های جهت‌یابی منابع صوتی به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) روش‌های مبتنی بر شکل‌دهی پرتو و ماکزیمم‌سازی SRP<sup>۲</sup> که در این روش‌ها شکل موج دریافت شده توسط آرایه حسگرهای صوتی، جهت‌دهی شده و توان پاسخ آن برای نقاط کاندید در فضا محاسبه می‌گردد و تخمین موقعیت منبع صوتی بر اساس بیشترین توان خروجی جهت دهنده موج صورت می‌گیرد. لذا به این دسته از روش‌ها، مکان‌یابی مبتنی بر توان پاسخ جهت‌دهی شده یا SRP گفته می‌شود [۲۱]. الگوریتم‌های استفاده شده در این دسته به دلیل پایداری در تخمین موقعیت منبع، در شرایط عملی مورد توجه قرار می‌گیرند ولی باید توجه داشت که این روش‌ها معمولاً به قدرت پردازش بالا نیاز دارند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم Delay And Sum، Capon، MVDR<sup>۳</sup>، MV<sup>۴</sup> و DMAS<sup>۴</sup> اشاره نمود [۲۲]. همچنین روش‌های این دسته برای افزایش قدرت تفکیک زاویه‌ای، نیازمند افزایش تعداد حسگرها می‌باشند.

ب) روش‌های مبتنی بر تخمین طیفی با تفکیک‌پذیری بالا<sup>۵</sup> که به روش‌های مبتنی بر زیر فضا نیز شهرت دارند، از روش‌های مدرن فیلترکردن فضایی استفاده می‌کنند و ایده اصلی آن‌ها از تخمین طیف با تفکیک‌پذیری بالا گرفته شده است. اگر چه این روش‌ها در پردازش آرایه‌های سیگنال‌های باند باریک و منابع راه دور کاربرد فراوان یافته‌اند، ولی استفاده از آن‌ها در مکان‌یابی منابع گفتاری با محدودیت‌هایی مواجه است که کارایی آنها را محدود می‌کند. این محدودیت‌ها عمدتاً در محاسبه ماتریس همبستگی بروز پیدا می‌کند. دلیل این امر غیرایستاد بودن سیگنال‌های صوتی است که متوسط‌گیری بر روی نمونه‌ها را غیر

استفاده از یک آرایه میکروفونی؛ برای اولین بار آقای Fischer و همکارانش، برای تخمین جهت ورود سیگنال‌های منابع ناپیوسته صوتی، تنها از یک آرایه میکروفونی استفاده نمودند [۸]. در مراجع [۹-۱۷] نیز برای اخذ سیگنال‌های منابع ناپیوسته صوتی فقط از یک آرایه میکروفونی با حداقل ۴ تا حداکثر ۱۶ میکروفون استفاده شده است.

ج) استفاده از چندین آرایه میکروفونی در یک شعاعی از محیط؛ برای افزایش دقت در جهت‌یابی و مقابله با مشکلات ناشی از ظنین و نویز محیطی از چند آرایه میکروفونی بصورت همزمان استفاده می‌گردد [۱۸]. مراجع [۱۹-۲۰] نیز به همین صورت، برای اخذ سیگنال منابع ناپیوسته صوتی از شبکه‌ای از آرایه‌های میکروفونی پراکنده در روی زمین، بهره برده‌اند.

مطابق با این مراجع بررسی شده، میزان دقت در جهت‌یابی منابع ناپیوسته صوتی به عواملی چون تعداد حسگرهای آکوستیکی، نحوه چیدمان حسگرها، فاصله حسگرها، حساسیت حسگرها، میزان SNR محیطی، سرعت نمونه‌برداری و انتخاب تعداد بیت‌ها، کیفیت دیجیتالیزر در انتقال همزمان سیگنال‌های صوتی، انتخاب الگوریتم‌ها و راهکارهای مناسب برای حذف نویزهای محیطی، انتخاب الگوریتم جهت‌یابی بستگی دارد. انتخاب تعداد آرایه‌ها و چیدمان هر آرایه نیز از نکات کلیدی در میزان دقت جهت‌یابی منابع ناپیوسته صوتی محسوب می‌گردد. برای هر نوع آرایش میکروفونی، محاسبات مربوط به جهت‌یابی منابع صوتی تغییر خواهد نمود و در صورتی که یک یا چند حسگر در آرایش میکروفونی آسیب ببینند، میزان محاسبات جهت‌یابی با خطا صورت خواهد گرفت.

با ابتکاری در این مقاله، جهت‌یابی منابع ناپیوسته صوتی متناسب با نوع آرایش میکروفونی، بصورت وقتی تعیین می‌گردد و با تغییر تعداد و نوع آرایش میکروفونی نیازی به محاسبات ریاضی و اعمال شرایط محدودده‌ای نخواهد بود. همچنین با آسیب یک یا چند حسگر از آرایه میکروفونی، جهت‌یابی منبع صوت به درستی صورت می‌گیرد و سامانه جهت‌یاب دچار خطای محاسباتی نخواهد شد.

در الگوریتم ارائه شده این مقاله، از حسگرهای آکوستیکی (میکروفون) بصورت یک آرایه هشت میکروفونی استفاده شده است. از آنجا که کاربرد این الگوریتم، برای استفاده در سامانه‌های جهت‌یاب در محیط واقعی می‌باشد، ابتکار این مقاله در زمینه ارائه الگوریتمی برای برطرف نمودن مشکلات عدیده این سامانه‌ها در محیط بیرونی، رفع پیچیدگی محاسباتی در افزایش تعداد میکروفون‌ها، جهت‌یابی با آرایش جدید میکروفونی در صورت آسیب دیدگی یکی از حسگرها بصورت وقتی و افزایش میزان دقت در جهت‌یابی می‌باشد.

<sup>۲</sup> Steered Response Power (SRP)

<sup>۳</sup> Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)

<sup>۴</sup> Delay-Multiply-and-Sum

<sup>۵</sup> High Resolution Spectral Estimation

## الگوریتم SRP-PHAT استاندارد

اساس کلی این الگوریتم، ماکزیمم کردن خروجی شکل دهنده پرتو است. اگر مدل سیگنال میکروفونی بصورت زیر باشد:

$$x_m(t) = \frac{1}{r_m} s(t - \tau_m) * \gamma_m(d(s), t) + v_m(t) \quad (1)$$

که در آن  $x_m(t)$  سیگنال دریافت شده توسط میکروفون  $m$ ،  $\tau_m$  تاخیر ایجاد شده در سیگنال هنگام رسیدن از منبع به میکروفون  $m$ ،  $r_m$  فاصله منبع تا میکروفون  $m$ ،  $\gamma_m$  پاسخ ضربه بین منبع و میکروفون  $m$ ،  $d(s)$  مکان منبع،  $v_m(t)$  نیز نویز موجود و جمع شونده با سیگنال عبوری از کانال  $m$  می باشد. این رابطه به وضوح نشان می دهد که یک ویرایش فیلتر شده و تاخیر یافته از سیگنال منبع در سیگنال میکروفونی وجود دارد. با همزمان سازی نمونه های تاخیر یافته از  $s(t)$  سیگنال های خروجی می توانند با هم جمع شوند. از این رو خروجی شکل دهنده پرتو می تواند بصورت زیر تعریف شود:

$$y(t, \Delta_1, \dots, \Delta_m) = \sum_{m=1}^M x_m(t - \Delta_m) \quad (2)$$

که  $\Delta_1, \dots, \Delta_m$  تعداد  $M$  تاخیر هدایت شده می باشد که به منظور جهت دهی آرایه به سمت مکان سه بعدی منبع انتخاب می شود. خروجی این شکل دهنده پرتو با  $M$  میکروفون در حوزه فرکانس بصورت زیر تعریف می شود:

$$Y(t, \Delta_1, \dots, \Delta_m) = \sum_{m=1}^M G_m(\omega) X_m(\omega) e^{-j\omega \Delta_m} \quad (3)$$

که  $X_1(\omega), \dots, X_m(\omega)$  تبدیل فوریه سیگنال های میکروفونی و  $G_1(\omega), \dots, G_m(\omega)$  تبدیل فوریه فیلترهای زمانی می باشند. توان پاسخ هدایت شده می تواند بصورت توان خروجی یک شکل دهنده پرتو Delay and Sum تعریف شود:

$$P(\Delta_1, \dots, \Delta_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\omega, \Delta_1, \dots, \Delta_m) Y^*(\omega, \Delta_1, \dots, \Delta_m) \cdot d\omega \quad (4)$$

که در این رابطه  $Y(\omega, \Delta_1, \dots, \Delta_m)$  خروجی شکل دهنده پرتو و  $Y^*(\omega, \Delta_1, \dots, \Delta_m)$  مزدوج مختلط آن است. پاسخ هدایت شده با جاروب کردن منطقه تحت تمرکز شکل دهنده پرتو بدست می آید. وقتی که محل تمرکز شکل دهنده پرتو با مکان منبع برابر باشد، توان پاسخ هدایت شده ماکزیمم می شود. از ترکیب معادلات فوق توان پاسخ هدایت شده بصورت زیر خواهد بود:

$$P(\Delta_1, \dots, \Delta_m) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{l=1}^M G_l(\omega) X_l(\omega) e^{-j\omega \Delta_l} \right) \left( \sum_{q=1}^M G_q^*(\omega) X_q^*(\omega) e^{-j\omega \Delta_q} \right) \cdot d\omega \quad (5)$$

از آنجایی که سیگنال های میکروفونی و فیلترها در عمل انرژی محدود دارند، این انتگرال همگرا بوده و در عمل می توان جای سیگما و انتگرال را عوض کرد:

$$P(\Delta_1, \dots, \Delta_m) = \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M \int_{-\infty}^{+\infty} ((G_l(\omega) G_q^*(\omega)) (X_l(\omega) X_q^*(\omega)) e^{-j\omega(\Delta_q - \Delta_l)}) d\omega \quad (6)$$

ممکن می سازد. الگوریتم های این دسته نیز منجر به جستجو در یک فضای مکانی می شوند، لذا از نظر حجم محاسبات مشابه روش های SRP هستند. الگوریتم های این دسته در مقایسه با روش های SRP به میزان قابل توجهی نسبت به خطاهای مدل سازی منبع و میکروفون پایداری کمتری دارند. این خطاها به دلیل ایده آل نبودن انتشار منبع، خواص غیرخطی میکروفون ها و ثابت نبودن مکان منبع رخ می دهد که در کاربرد مکان یابی گوینده بسیار رایج است [۷]. از جمله الگوریتم های این دسته می توان به الگوریتم های <sup>۶</sup>ESPRIT، <sup>۷</sup>ROOT MUSIC، <sup>۸</sup>MUSIC اشاره نمود [۱۲]. این الگوریتم ها به منظور تخمین سیگنال های مختاراتی یا طیف های باریکی از یک مولد مورد استفاده قرار می گیرند و عملکرد مناسبی در این حیطه دارند. در مرجع [۲۰] الگوریتم های مبتنی بر تخمین طیفی با تفکیک پذیری بالا با الگوریتم های مبتنی بر شکل دهی پرتو با یکدیگر مقایسه شده است و سرانجام از الگوریتم پیشنهادی <sup>۹</sup>SSC-MVDR برای جهت یابی منبع صوت استفاده نموده است.

ج روش های مبتنی بر تخمین تأخیر زمانی که این روش خود به دو دسته کلی تقسیم می گردد [۱۹]:

- تخمین زمان دریافت سیگنال (<sup>۱۰</sup> TOA)

- تخمین اختلاف زمان دریافت سیگنال صوتی (<sup>۱۱</sup> TDOA)

تخمین TOA در سیستم های فعال مانند انواع رادارها مورد استفاده قرار می گیرد ولی روش های مبتنی بر TDOA در سیستم های غیرفعال مورد استفاده قرار می گیرند که در آن اختلاف زمانی بین دو یا چند حسگر تخمین زده می شود.

در الگوریتم TDOA، اساس کار روی تشکیل ماتریس همبستگی از تأخیر زمانی سیگنال دریافتی است که به دلیل سادگی، مقاومت مناسب در مقابل طنین و نویز، حجم محاسبات کم، بیشتر از سایر الگوریتم ها مورد توجه محققین قرار گرفته اند. در جهت یابی، برای مواقعی که نویز محیطی زیاد باشد و یا فرکانس نمونه برداری کم باشد این الگوریتم ها پاسخ دهی مناسبی دارند. از جمله این الگوریتم ها می توان به الگوریتم CC، GCC<sup>۱۱</sup> با توابع وزندهی مختلف اشاره نمود. روش های جهت یابی مبتنی بر TDOA نیز از دو مرحله کلی تشکیل می شوند:

مرحله اول: تخمین اختلاف زمان دریافت سیگنال صوتی بین یک یا چند جفت میکروفون

مرحله دوم: تخمین مکان منبع بر اساس اختلاف زمان تخمین زده شده در مرحله اول و نیز توجه به نحوه چیدمان میکروفون ها.

<sup>۶</sup> Multiple Signal Classification

<sup>۷</sup> Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques

<sup>۸</sup> Signal Self-Cancellation-MVDR (SSC-MVDR)

<sup>۹</sup> Time Of Arrival (TOA)

<sup>۱۰</sup> Time Delay Of Arrival (TDOA)

<sup>۱۱</sup> Generalized Cross Correlation (GCC)

گوسی جمع شونده در میکروفون‌های ۱ و ۲ است. اگر  $\tau$  به عنوان تاخیر بین سیگنال‌ها باشد، همبستگی متقابل بین دو سیگنال  $S_1(t)$  و  $S_2(t)$  بصورت زیر است:

$$R_{S_1 S_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(t) S_2(t + \tau) dt \quad (13)$$

و ماکزیمی متناسب با میزان تاخیر بصورت زیر دارد:

$$\tau_{12} = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{S_1 S_2}(\tau) \quad (14)$$

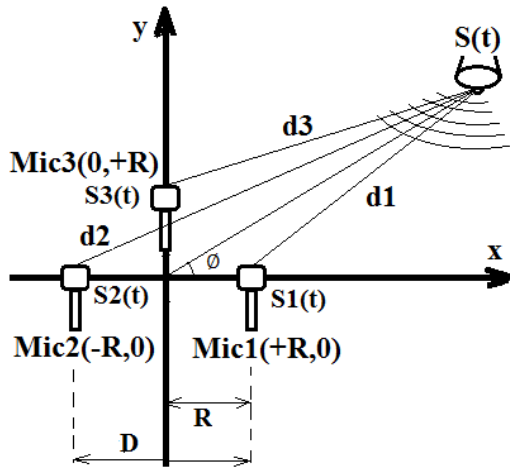
فاصله بین این میکروفون‌ها  $D$  در سیگنال‌های باند باریک نیز باید کمتر از نصف طول موج صوتی باشد، یعنی:

$$D \leq \frac{\lambda}{2} \quad (15)$$

با توجه به شکل (۱) زاویه ورودی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\cos(\theta) = \frac{d_2 - d_1}{D} = \frac{(t_2 - t_1)C}{D} = \frac{\tau_{21}C}{D} \quad (16)$$

که در آن  $C$  سرعت حرکت صوت در محیط می‌باشد و  $\tau_{21}$  نیز از همبستگی متقابل بین دو سیگنال بدست می‌آید.



شکل ۱. محاسبه مکان منبع صوت در فضای دو بعدی

فاصله بین منبع تا هر یک از میکروفون‌ها بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$d_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (17)$$

$$d_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \quad (18)$$

که  $(x, y)$  مختصات منبع انتشار صوت می‌باشد.  $\tau_{21}$  که در آن  $D = 2R$  می‌باشد، بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\tau_{21} = \frac{\sqrt{(x+R)^2 + (y)^2} - \sqrt{(x-R)^2 + (y)^2}}{C} \quad (19)$$

که بصورت معادله هذلولی زیر نوشته خواهد شد [۲۱]:

$$\begin{cases} y^2 = ax^2 + b \\ a = \frac{4R^2}{(C \tau_{21})^2} - 1 \\ b = \frac{(C \tau_{21})^2}{4} - R^2 \end{cases} \quad (20)$$

برای یافتن موقعیت  $(x, y)$  به معادله دیگری نیز احتیاج است که این کار را می‌توان با افزودن میکروفون سوم انجام داد، چراکه دیده می‌شود برای یافتن موقعیت منبع صوت در دو بعد، حداقل به سه میکروفون نیاز است. لذا مطابق شکل (۱) سه میکروفون در موقعیت‌های  $Mic2:(-R, 0)$ ،  $Mic3:(0, +R)$  و

که  $\Psi_{1q}(\omega)$  تابع وزنی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi_{1q}(\omega) = G_1(\omega) G_q^*(\omega) \quad (7)$$

بنابراین الگوریتم بیم‌فرمر SRP وزندهی شده بصورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$P(\Delta_1, \dots, \Delta_m) = 2\pi \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M R_{1q}(\Delta_q - \Delta_l) \quad (8)$$

که در آن:

$$R_{1q}(\Delta_{1q}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{1q}(\omega) X_1(\omega) X_q^*(\omega) e^{+j\omega \Delta_{1q}} d\omega \quad (9)$$

به این ترتیب الگوریتم SRP وزندهی شده بصورت جمع همبستگی ناشی از تأخیر زمانی سیگنال دریافتی همه جفت میکروفون‌های آرایه که وزندار شده‌اند، تعریف می‌شود [۸]. بنابراین برای محاسبه الگوریتم SRP، ماتریس همبستگی ناشی از تأخیر زمانی سیگنال دریافتی روی کلیه جفت میکروفون‌ها تشکیل می‌گردد، که معادل تشکیل ماتریس همبستگی چگالی طیفی سیگنال، در حوزه فرکانسی می‌باشد. این الگوریتم در جهت یابی برای مواقعی که فرکانس نمونه برداری کم باشد یا نویز محیطی زیاد باشد، پاسخدهی مناسبی دارد.

به دلیل عواملی نظیر نویز و طنین، روش همبستگی متقابل در تخمین اختلاف زمان دریافت سیگنال صوتی دچار خطا می‌شود، لذا قبل از محاسبه همبستگی متقابل سیگنال‌ها، فیلترهای خاصی (توابع وزندهی) بر روی آن‌ها اعمال می‌شود. از بین روش‌های مختلف وزندهی، روش تبدیل فاز PHAT در مقابل طنین مقاومت بیشتری دارد. سادگی در اجرا و پیاده‌سازی، تعیین دقیق‌تر نقطه ماکزیم همبستگی برای محاسبه میزان تاخیر سیگنال‌ها بخصوص در شرایط نویز و طنین محیطی از ویژگی‌های این روش وزندهی می‌باشد. فیلتر PHAT نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Psi_{1q}(\omega) = \frac{1}{|X_1(\omega) X_q^*(\omega)|} \quad (10)$$

بنابراین با استفاده از فیلتر PHAT به عنوان تابع وزنی، الگوریتم SRP-PHAT حاصل می‌گردد. نقطه‌ای از فضا که بتواند بیشترین مقدار تابع SRP-PHAT را ایجاد کند به عنوان مکان منبع در نظر گرفته خواهد شد.

### محاسبه جهت سیگنال منبع صوتی

اگر منبع تولید سیگنال صوتی باشد و  $S_1(t)$  و  $S_2(t)$  سیگنال میکروفون‌های ۱ و ۲ به ترتیب باشند، این سیگنال‌ها در یک نویز محیطی می‌توانند بصورت زیر مدل‌سازی گردند [۲۲]:

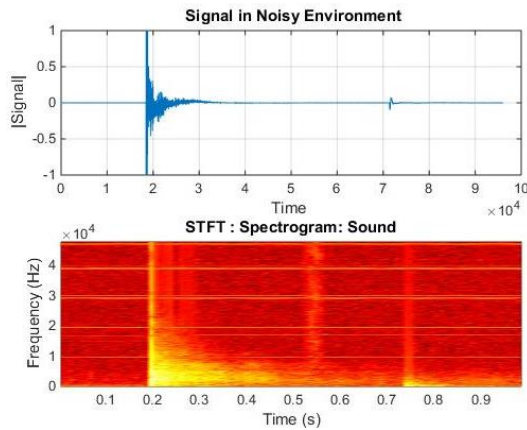
$$S_1(t) = \frac{S(t-T_1)}{d_1} + n_1(t) \quad (11)$$

$$S_2(t) = \frac{S(t-T_2)}{d_2} + n_2(t) \quad (12)$$

که  $d_1$  و  $d_2$  فاصله منبع تا میکروفون‌ها و  $T_1$  و  $T_2$  تاخیر زمانی ورود سیگنال به میکروفون‌ها می‌باشد.  $n_1(t)$  و  $n_2(t)$  نویز سفید

در اين مقاله به جهت يابی منابع صوتی ناپيوسته در محدوده فرکانسی شنوایی بين ۲۰Hz تا ۲۰KHz پراخته شده است. طبيعی است که حسگرهای مناسب، بايد در اين محدوده فرکانسی بيشترين حساسيت را داشته باشند. حسگرهای استفاده شده در اکثر مقالات از نوع ميكروفون خازنی تمام جهته می باشد و به منظور بهينه نمودن ساختار نهایی سامانه، نیاز است ميكروفون های با حداکثر عملکرد مطلوب، در اين محدوده فرکانسی مورد استفاده قرار گیرند [۲۳-۲۴].

شکل (۲) تبدیل فوريه زمان کوتاه سيگنال دريافتی از يك منبع صوتی ناپيوسته توسط ميكروفون های خازنی مدل WM-54BU شرکت Panasonic برای مدت يك ثانيه را نشان می دهد، اين تبدیل رابطه مناسب زمانی و فرکانسی سيگنال را بيان می کند و محدوده مناسب پردازش سيگنال را نشان می دهد.



شکل ۲. تبدیل فوريه زمان کوتاه، سيگنال دريافتی از يك منبع صوتی ناپيوسته در محيط واقعی برای يك ثانيه

همچنين برای جبران حساسيت و افزايش کیفیت سيگنال های ضبط شده توسط اين حسگرها، طراحی مدار تقويت کننده اوليه ضرورت دارد که اولين وظیفه آن، تامین ولتاژ مناسب برای ميكروفون ها بوده و وظیفه اصلی آن انتقال سيگنال دريافتی از ميكروفون ها به ديجيتايز می باشد. در سامانه طراحی شده اين مقاله، طراحی برد تقويت کننده به گونه ای انجام گرفته که سيگنال های آنالوگ بصورت ديفرانسیلی به ديجيتايز انتقال یابند تا در انتقال سيگنال های صوتی آنالوگ، تاثیر نویز بسیار کاهش یابد.

### تعداد و فاصله حسگرها

تعداد ميكروفون ها در اکثر مقالات، متناسب با شرایط محیط کاربرد، الگوریتم استفاده شده، شعاع پوششی مورد نظر، بين حداقل چهار ميكروفون تا حداکثر شانزده ميكروفون بوده است. مطابق با مرجع [۱۱] برای کسب زاويه سمتی در ۳۶۰ درجه حداکثر چهار ميكروفون کفایت می کند و برای بدست آوردن

Mic1:(+R,0) قرار گرفته و تاخیر زمانی بين ميكروفون ها بصورت زیر بيان می گردد [۲۱]:

$$\begin{cases} \tau_{12} = \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}}{C} \\ \tau_{13} = \frac{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}}{C} \\ \tau_{23} = \frac{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}-\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2}}{C} \end{cases} \quad (21)$$

حال برای محاسبه تاخیرها نسبت به Mic3:(0,+R) می توان بصورت زیر نوشت [۲۱]:

$$\begin{cases} \tau_{13} = \frac{\sqrt{(x-R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x)^2+(y-R)^2}}{C} \\ \tau_{23} = \frac{\sqrt{(x-R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x)^2+(y-R)^2}}{C} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} y = a_1x + b_1 \\ a_1 = \frac{\tau_{23} + \tau_{13}}{\tau_{23} - \tau_{13}} - 1 \\ b_1 = -\frac{(C)^2}{2R} (\tau_{23} * \tau_{13}) \end{cases} \quad (23)$$

برای محاسبه تاخیرها نسبت به Mic1:(+R,0) می توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \tau_{12} = \frac{\sqrt{(x-R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x+R)^2+(y)^2}}{C} \\ \tau_{13} = \frac{\sqrt{(x-R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x)^2+(y-R)^2}}{C} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} y = a_2x + b_2 \\ a_2 = 1 - \frac{2\tau_{13}}{\tau_{12}} \\ b_2 = \frac{(C)^2}{2R} (\tau_{12} - \tau_{13})\tau_{13} \end{cases} \quad (25)$$

و برای محاسبه تاخیرها نسبت به Mic2:(-R,0) می توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \tau_{12} = \frac{\sqrt{(x-R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x+R)^2+(y)^2}}{C} \\ \tau_{23} = \frac{\sqrt{(x+R)^2+(y)^2}-\sqrt{(x)^2+(y-R)^2}}{C} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} y = a_3x + b_3 \\ a_3 = -\left(1 + \frac{2\tau_{23}}{\tau_{12}}\right) \\ b_3 = -\frac{(C)^2}{2R} (\tau_{12} + \tau_{23})\tau_{23} \end{cases} \quad (27)$$

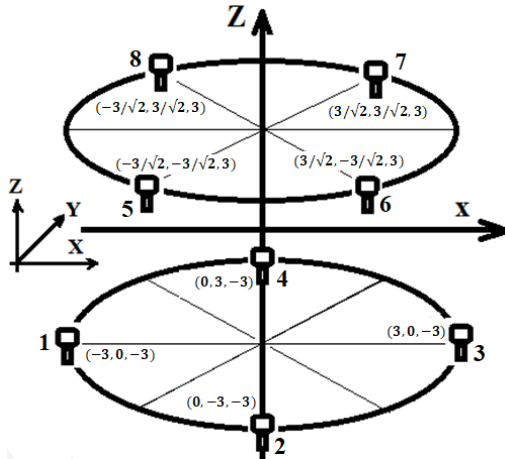
با توجه به اینکه در ساختار پیشنهادی این مقاله، از هشت ميكروفون استفاده شده، با استخراج اختلاف زمانی بين هر جفت ميكروفون، جهت يابی منبع صوتی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد انجام می گیرد.

### طراحی سامانه پیشنهادی

طراحی مناسب سخت افزار سامانه جهت ياب، گام مهمی در افزايش دقت و کاهش زمان پردازش دارد. متناسب با جهت يابی منبع صوتی مورد نظر، انتخاب نوع ميكروفون، انتخاب فاصله بين ميكروفون ها، انتخاب نوع فیلترها در پردازش سيگنال صورت می گیرد. در اين بخش به عوامل اساسی در طراحی سخت افزار سامانه پراخته می شود.

### حسگرهای مناسب

بصورت هوشمند همچنان محفوظ باقی می ماند و نیازی به محاسبات مجدد نمی باشد.



شکل ۳. نحوه قرارگیری میکروفون ها در هر لایه از آرایه میکروفونی

در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا یک ماتریس شبیه ساز متناسب با آرایش میکروفونی تهیه می گردد. این ماتریس تا زمانی که آرایش میکروفونی ثابت باشد، بدون تغییر باقی می ماند و تنها یک مرتبه محاسبه می گردد. این ماتریس شبیه ساز، وابسته به میزان تأخیر زمانی سیگنال دریافتی روی کلیه جفت حسگرهای آرایه میکروفونی می باشد. برای محاسبه این ماتریس کافی است که مختصات دکارتی همه میکروفون ها مطابق با جدول (۱) تعیین گردد. در این مقاله با توجه به آرایه هشت میکروفونی ( $M=8$ )، تعداد ۲۸ حالت همبستگی متقابل غیر تکرار بین جفت میکروفون های آرایه ( $N = M(M - 1)/2 = 28$ ) وجود دارد که بصورت شکل (۴) این حالات مختلف در ماتریس ثبت می گردد.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

شکل ۴. (۲۸) حالت غیر تکرار بین جفت میکروفون ها در یک آرایه هشت تایی

حال اگر  $\mathbf{a}_{\theta, \varnothing}$  بردار واحد انتشار منبع صوتی در نظر گرفته شود، سه مولفه آن مطابق با شکل (۵) نسبت به زاویه جهتی  $\varnothing$  و زاویه ارتفاعی  $\theta$  بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\mathbf{a}_{\theta, \varnothing} = [-\sin\theta\cos\varnothing \quad -\sin\theta\sin\varnothing \quad -\cos\theta] \quad (28)$$

اگر  $s_i(t)$  و  $s_j(t)$  سیگنال های ورودی یک منبع صوت ناپیوسته به دو میکروفون  $i$  و  $j$  از آرایه باشد، همبستگی متقابل دو سیگنال  $R_{s_i s_j}(\tau)$  مطابق با رابطه (۱۳) بدست می آید و زمان تاخیر بین دو میکروفون نیز بصورت  $\tau_{ij} = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{s_i s_j}(\tau)$  محاسبه می گردد. تخمین اختلاف زمان ورود بین دو میکروفون

زاویه ارتفاع، باید حداقل یک لایه میکروفون دیگر با ارتفاع مناسب از لایه اول قرار داشته باشد. مطابق با شبیه سازی های انجام گرفته نیز حداکثر چهار میکروفون در یک لایه برای پوشش کامل زاویه ای، کفایت می کند، لذا در طراحی این سامانه نیز از دو لایه چهار میکروفونی استفاده شده است. جدول (۱) موقعیت حسگرها در آرایه میکروفونی این مقاله را در مختصات کارتزین سه بعدی نشان می دهد.

جدول ۱. مختصات حسگرها در آرایه میکروفونی (مختصات کارتزین)

شماره میکروفون	موقعیت میکروفون ها (cm)		
	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
۱ میکروفون	-3	0	-3
۲ میکروفون	0	-3	-3
۳ میکروفون	+3	0	-3
۴ میکروفون	0	+3	-3
۵ میکروفون	$-3/\sqrt{2}$	$-3/\sqrt{2}$	3
۶ میکروفون	$+3/\sqrt{2}$	$-3/\sqrt{2}$	3
۷ میکروفون	$+3/\sqrt{2}$	$+3/\sqrt{2}$	3
۸ میکروفون	$-3/\sqrt{2}$	$+3/\sqrt{2}$	3

فاصله میکروفون ها در سیگنال های باند باریک مطابق با رابطه (۱۵) باید کمتر از نصف طول موج صوتی باشد تا برای تحلیل اختلاف زمان بین سیگنال میکروفون ها، هیچ سیگنالی یک دوره تناوب اضافه طی نکرده باشد. در این مقاله برای کوچک سازی فضای میکروفونی و کم حجمی سامانه، فاصله میکروفون ها تنها ۶cm در نظر گرفته شده که با انتخاب این فاصله، جهت یابی در محدوده فرکانس مورد نظر امکان پذیر است.

### دیجیتایزر و سرعت نمونه برداری مناسب

از مسائل دیگر در طراحی، سرعت نمونه برداری می باشد، هر چه سرعت نمونه برداری بیشتر باشد، دقت پردازش بالاتر است ولی زمان پردازش را هم افزایش می دهد، لذا باید یک تعاملی در انتخاب سرعت نمونه برداری باشد. در طراحی سامانه این مقاله، از دیجیتایزر مدل Multi Track Field Recorder ZOOM F8 با سرعت ۹۶KHz و رزولوشن ۱۶ بیت استفاده شده است.

### الگوریتم پیشنهادی

در ساختار پیشنهادی این مقاله از سامانه جهت یاب طراحی شده با یک آرایه هشت میکروفونی، استفاده شده است. این هشت میکروفون در دو لایه چهار میکروفونی مطابق با شکل (۳) و آرایش سه بعدی مندرج در جدول (۱) واقع گردیده است. طراحی آرایش میکروفونی بگونه ای است که با توجه به الگوریتم پیشنهادی، با آسیب یک میکروفون در هر لایه، دقت جهت یابی



ز) اگر  $\tau_{12} > 0$  تصمیم گیری بر حسب فاصله است که اگر  $d_1 \geq d_2$  منبع در ربع ۲ یا ۳ مثلثاتی بوده و لذا  $\theta = \theta + 90$  خواهد بود، در غیر این صورت منبع در ربع ۱ یا ۴ خواهد بود و  $\theta = \theta - 90$  می باشد.

ح) محاسبه ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  و  $a_3$  و  $b_1$  و  $b_2$  و  $b_3$  از طریق روابط (۲۳)، (۲۵) و (۲۷)

ط) تکرار مراحل از بند(و) تا (ح) برای کلیه حالات میکروفونی و تصمیم گیری برای زاویه  $\theta$

ی) محاسبه زاویه ارتفاعی بین میکروفون ها که برای میکروفون های لایه بالا و پایین خواهد بود و برای میکروفون ۱ و ۵ بصورت  $\theta = \text{abs}(\text{Cos}^{-1}(\sqrt{1 - (\tau_{15}^C/2R)^2}))$  است.

ک) اگر  $\tau_{15} > 0$  تصمیم گیری بر حسب فاصله است که اگر  $d_1 \geq d_5$  زاویه ارتفاعی  $\theta = \theta$  خواهد بود. در غیر این صورت  $\theta = -\theta$  می باشد.

ل) تکرار مراحل از بند(ی) تا (ک) برای کلیه حالات میکروفونی و تصمیم گیری برای زاویه  $\theta$

م) تکرار مراحل از بند(ب).

همان گونه که مراحل الگوریتم SRP-PHAT استاندارد نشان می دهد، علاوه بر پیچیدگی محاسباتی و تصمیم گیری در مورد زوایا، با تغییر آرایش میکروفونی و یا آسیب یک میکروفون حین عمل، نیاز به محاسبات مجدد برای جهت یابی با آرایش جدید ضروری است.

جدول (۲) مقایسه جهت یابی الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد در ۱۲ زاویه سمتی و جهتی متفاوت نشان می دهد.

پردازنده 2.6GHz و Ram\_8GB کمتر از ۱۲۰ میلی ثانیه است. همچنین زمان محاسبه تطابق متناظر برای شباهت سنجی ماتریس ها با این پردازنده کمتر از ۳۰۰ میلی ثانیه است.

آرایه میکروفون در فاصله ۵۰۰ متری از منبع صوت ناپیوسته واقع شده است. اگر موقعیت منبع به عنوان مرکز مختصات باشد، آرایه میکروفونی در مختصات (۱، ۵۰، ۵۰) واقع گردیده است. برای نمونه برداری سیگنال منبع نیز از دیجیتایزر با سرعت نمونه برداری ۹۶KHz و رزولوشن ۱۶ بیتی انجام گرفته است. نتایج تست در محیطی بیرونی با حرارت 28°C و باد ۳m/s صورت گرفته است. بنابراین سرعت صوت نسبت به دمای محیطی بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$C = 331 \sqrt{1 + \frac{28}{273}} = 347.56 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (31)$$

در این مقاله همچنین الگوریتم SRP-PHAT استاندارد نیز مطابق با بخش سوم و چهارم مقاله شبیه سازی و تست گردیده است و با نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی مقایسه گردیده است. برای این الگوریتم به ترتیب مراحل زیر انجام می گیرد:

الف) تعیین چینش میکروفون ها

ب) آشکارسازی سیگنال صوت، در صورت مثبت بودن به مرحله بعد می رود وگرنه در همین مرحله می ماند.

ج) ضبط سیگنال های هشت میکروفون  $S_1(t), \dots, S_8(t)$  از طریق کارت صوتی که DC آن حذف و نرمالیزه شده است.

د) اعمال پنجره همینگ و اعمال FFT به سیگنال های ورودی

ه) اعمال تابع وزنی PHAT به سیگنال و کسب میزان تاخیر زمانی  $\tau$  بین حالات ۲۸ گانه میکروفونی

و) محاسبه زاویه جهتی بین میکروفون ها که برای میکروفون ۱

و ۲ بصورت  $\theta = \text{abs}(\text{Cos}^{-1}(\sqrt{1 - (\tau_{12}^C/2R)^2}))$  است.

جدول ۲. مقایسه میزان خطای جهت یابی دو الگوریتم

میزان زاویه واقعی (درجه)	الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		خطای الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		زمان جهت یابی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد (ms)		الگوریتم پیشنهادی		خطای الگوریتم پیشنهادی		زمان جهت یابی با الگوریتم پیشنهادی (ms)	
	$\theta$	$\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\theta$	$\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$
۰	۳	۱.۰۲	۳.۴	۱.۰۲	۰.۴	۳۰۲	۲۶۸	۰	۳.۱	۰	۰.۱	۲۷۸
۳۰	۲	۲۸.۶۴	۲.۳	۱.۳۶	۰.۴	۲۹۴	۲۵۷	۲۹.۹	۲	۰.۱	۰	۲۸۴
۹۰	۲	۸۹.۲۳	۲.۱	۰.۷۳	۰.۱	۲۹۸	۲۶۶	۹۰	۲	۰	۰	۲۷۵
۱۲۰	۳	۱۲۱.۰۳	۳.۳	۱.۰۳	۰.۳	۲۷۸	۲۵۸	۱۲۰.۱	۲.۹	۰.۱	۰.۱	۲۶۳
۱۶۵	۴	۱۶۵.۸۲	۳.۸	۰.۸۲	۰.۲	۲۸۴	۲۷۴	۱۶۴.۹	۳.۹	۰.۱	۰.۱	۲۷۴
۱۸۰	۱	۱۸۱.۰۸	۱.۳	۱.۰۸	۰.۳	۳۰۴	۲۶۸	۱۸۰	۰.۹	۰	۰.۱	۲۸۷
۲۰۵	۲	۲۰۳.۸۲	۲.۴	۱.۱۸	۰.۴	۲۸۷	۲۶۲	۲۰۴.۹	۲	۰.۱	۰	۲۶۴
۲۲۰	۲	۲۲۰.۱۳	۲.۳	۰.۱۳	۰.۳	۲۹۳	۲۷۵	۲۲۰.۱	۲	۰.۱	۰	۲۷۸
۲۷۰	۳	۲۶۸.۱۳	۳.۴	۱.۸۷	۰.۴	۲۷۸	۲۶۳	۲۷۰	۳.۱	۰	۰.۱	۲۸۹
۳۰۰	۱	۲۹۹.۱۴	۱.۳	۰.۸۶	۰.۳	۲۸۵	۲۵۹	۲۹۹.۹	۱	۰.۱	۰	۲۹۱
۳۳۵	۲	۳۳۳.۴۶	۲.۱	۱.۵۴	۰.۱	۳۰۱	۲۶۴	۳۳۵.۱	۲	۰.۱	۰	۲۶۶
۳۵۵	۳	۳۵۶.۲۱	۳.۳	۱.۲۱	۰.۳	۲۸۹	۲۶۹	۳۵۵.۱	۲.۹	۰.۱	۰.۱	۲۶۸

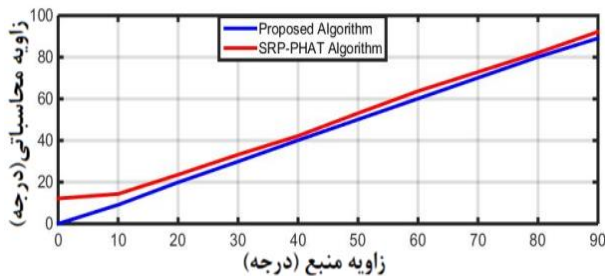
که مشاهده می شود، در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، متوسط میزان خطا کمتر از ۲ درجه است در حالی که در

در جدول (۲)، شبیه سازی از فاصله ۵۰۰ متری صورت گرفته و منبع صوتی نیز از فاصله ۵۰۰ متری منتشر می گردد. همان گونه

شرایطی که میکروفون ۲ آسیب دیده با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۳. مقایسه میزان خطای جهت‌یابی دو الگوریتم با آسیب میکروفون ۲

میزان زاویه واقعی (درجه)	الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		خطای الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		الگوریتم پیشنهادی		خطای الگوریتم پیشنهادی	
	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$
۰	۳	۱۲,۱۴	۳,۶	۱۲,۱۴	۰	۲,۹	۰	۰,۱
۳۰	۲	۲۳,۵۷	۲,۷	۶,۴۳	۲۹,۹	۲,۱	۰,۱	۰,۱
۹۰	۲	۸۷,۱۳	۲,۸	۲,۸۷	۸۹,۱	۲	۰,۱	۰
۱۲۰	۳	۱۲۳,۲۱	۳,۹	۳,۲۱	۱۲۰,۱	۳,۱	۰,۱	۰,۱
۱۶۵	۴	۱۶۸,۲۳	۳,۲	۳,۲۳	۱۶۴,۹	۴,۱	۰,۱	۰,۱
۱۸۰	۱	۱۹۲,۱۴	۱,۳	۱۲,۱۴	۱۸۰,۱	۰,۹	۰,۱	۰,۱
۲۰۵	۲	۲۰۲,۴۷	۲,۵	۲,۵۳	۲۰۵,۱	۲,۱	۰,۱	۰,۱
۲۲۰	۲	۲۱۵,۱۷	۲,۸	۴,۸۳	۲۱۹,۹	۲	۰,۱	۰
۲۷۰	۳	۲۶۷,۴۵	۳,۹	۲,۵۵	۲۷۰	۳,۱	۰	۰,۱
۳۰۰	۱	۲۹۵,۵۴	۱,۶	۴,۴۶	۲۹۹,۹	۱,۱	۰,۱	۰,۱
۳۳۵	۲	۳۳۱,۸۶	۲,۵	۳,۱۴	۳۳۵,۱	۲	۰,۱	۰
۳۵۵	۳	۱,۳۴	۳,۸	۶,۳۴	۳۵۴,۹	۳,۱	۰,۱	۰,۱



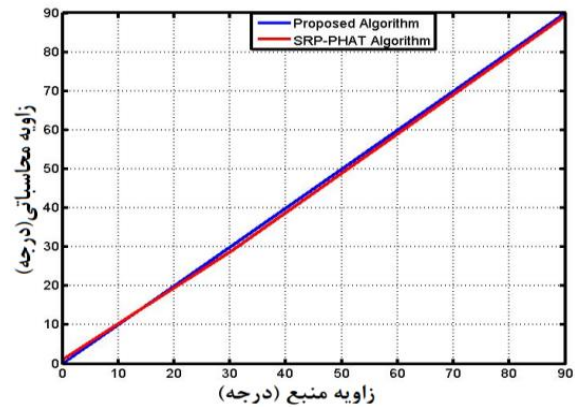
شکل ۹. مقایسه زاویه محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد در شرایطی که میکروفون ۲ آسیب دیده

در یک سناریوی دیگر، میکروفون شماره ۵ از لایه دوم آرایه میکروفونی شکل (۳) در حین تست محیطی قطع شده و نتایج جهت‌یابی منبع با این شرایط ادامه می‌یابد. جدول (۴) مقایسه جهت‌یابی الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، در شرایطی که میکروفون شماره ۵ آسیب دیده است را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، متوسط میزان خطا در برخی زوایا حدود ۱۱ درجه بوده در حالی که در الگوریتم پیشنهادی همان ۰,۱ درجه است. لذا نشان می‌دهد که با حذف یک میکروفون در آرایه میکروفونی، تغییری در دقت جهت‌یابی منبع صوتی مطابق با الگوریتم پیشنهادی بوجود نمی‌آید در حالی که در الگوریتم استاندارد این خطا زیاد است.

در شکل (۱۰) نیز زاویه جهت‌یابی ناشی از ورود سیگنال صوتی بین صفر تا ۹۰ درجه در الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری و در شرایطی که میکروفون ۵ آسیب دیده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

الگوریتم پیشنهادی، این خطا کمتر از ۰,۱ درجه می‌باشد. همچنین در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، با پردازنده ذکر شده، متوسط زمان پردازش برای محاسبه زاویه جهت‌یابی حدود ۲۹۱ میلی‌ثانیه و برای زاویه ارتفاعی  $\theta$  حدود ۲۶۵ میلی‌ثانیه می‌باشد، بنابراین مدت زمان پردازش برای محاسبه دو زاویه جهت‌یابی و ارتفاعی، ۵۵۶ میلی‌ثانیه خواهد بود در حالی که در الگوریتم پیشنهادی، مدت زمان پردازش برای محاسبه هر دو زاویه، که بصورت همزمان انجام می‌گیرد، حدود ۲۷۶ میلی‌ثانیه است که نشان از کاهش میزان پیچیدگی و سرعت عمل در الگوریتم پیشنهادی را دارد.

در شکل (۸) نیز زاویه جهت‌یابی ناشی از ورود سیگنال صوتی بین صفر تا ۹۰ درجه در الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری مقایسه شده است.

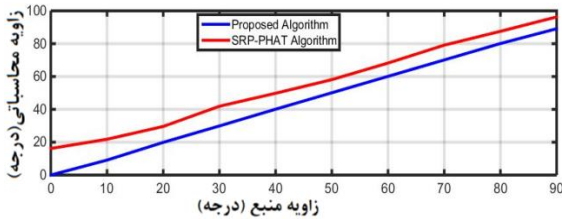


شکل ۸. مقایسه زاویه محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد

در الگوریتم پیشنهادی اگر یکی از میکروفون‌ها آسیب ببینند، شبیه‌ساز بصورت هوشمند، ماتریس جدید را مطابق با آرایش جدید بروز می‌نماید و میزان دقت سامانه تغییری نمی‌کند. بنابراین در این مرحله، میکروفون شماره ۲ از لایه اول آرایه میکروفونی شکل (۳) در حین تست محیطی قطع شده و نتایج جهت‌یابی منبع با این شرایط ادامه می‌یابد. جدول (۳) مقایسه جهت‌یابی الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، در شرایطی که میکروفون شماره ۲ آسیب دیده است را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، متوسط میزان خطا در برخی زوایا حدود ۱۳ درجه می‌باشد در حالی که در الگوریتم پیشنهادی همان ۰,۱ درجه است.

در شکل (۹) نیز زاویه جهت‌یابی ناشی از ورود سیگنال صوتی بین صفر تا ۹۰ درجه در الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری و در

در شکل (۱۱) نیز زاویه جهتی  $\theta$  ناشی از ورود سیگنال صوتی بین صفر تا ۹۰ درجه در الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد تحت این شرایط با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۱. مقایسه زاویه محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد در شرایطی که میکروفون‌های ۵ و ۲ آسیب دیده‌اند

در الگوریتم پیشنهادی، با تغییر آرایش میکروفونی فقط باید مختصات میکروفون‌ها به سامانه داده شود در حالی که در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، باید محاسبات جدیدی در زمینه جهت‌یابی مطابق با آرایش جدید صورت بگیرد. لذا در الگوریتم پیشنهادی نیازی به محاسبات پیچیده ندارد و استفاده از این الگوریتم با هر نوع آرایش میکروفونی سازگار است.

در این مقاله، شبیه‌سازی منبع از فاصله ۵۰۰ متری انجام گرفته که بصورت طبیعی اگر منبع صوتی در این فاصله باشد به دقت شبیه‌سازی مطابق با جدول (۲) نائل خواهد گردید. اما با تغییر منبع صوتی در فواصل مختلف فقط دامنه شدت صوت تغییر نموده و دقت جهت‌یابی در همان محدوده خواهد بود. جدول (۶) مقایسه جهت‌یابی الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد را برای مواقعی که منبع صوت در فاصله ۲۰۰ متری است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، متوسط میزان خطا کمتر از ۱٫۵ درجه است در حالی که در الگوریتم پیشنهادی، این خطا کمتر از ۰٫۲ درجه می‌باشد.

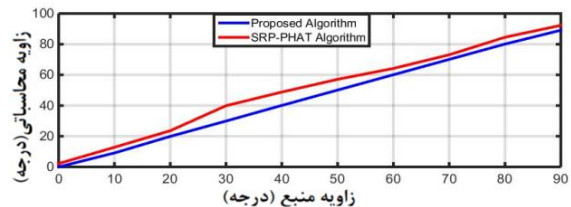
جدول ۶. مقایسه میزان خطای جهت‌یابی دو الگوریتم با تغییر منبع صوت در

فاصله ۲۰۰ متری

میزان زاویه واقعی (درجه)	الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		خطای الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		الگوریتم پیشنهادی		خطای الگوریتم پیشنهادی	
	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$
۰	۳	-۰٫۷۲	۳٫۱	-۰٫۷۲	۰٫۱	۳٫۱	۰٫۱	-۰٫۱
۳۰	۲	۲۹٫۲۱	۲٫۲	-۰٫۷۹	۰٫۲	۲۹٫۹	۰٫۱	-۰٫۱
۹۰	۲	۹۰٫۴۵	۲٫۱	-۰٫۴۵	۰٫۱	۹۰٫۲	۰٫۲	-۰٫۱
۱۲۰	۳	۱۲۱٫۱۲	۳٫۲	۱٫۱۲	۰٫۲	۱۲۰٫۱	۰٫۱	-۰٫۱
۱۶۵	۴	۱۶۴٫۲۳	۴٫۲	-۰٫۷۳	۰٫۲	۱۶۵٫۱	۰٫۱	-۰٫۱
۱۸۰	۱	۱۸۰٫۸۷	۱٫۱	-۰٫۸۷	۰٫۱	۱۸۰٫۱	۰٫۹	۰٫۱
۲۰۵	۲	۲۰۴٫۱۱	۲٫۲	-۰٫۸۹	۰٫۲	۲۰۴٫۹	۰٫۱	-۰٫۱
۲۲۰	۲	۲۲۱٫۴۲	۱٫۹	۱٫۴۲	۰٫۱	۲۱۹٫۹	۰٫۱	-۰٫۱
۲۷۰	۳	۲۷۱٫۳۳	۲٫۹	۱٫۳۳	۰٫۱	۲۷۰٫۲	۰٫۲	-۰٫۱
۳۰۰	۱	۲۹۹٫۲۱	۱٫۲	-۰٫۷۹	۰٫۲	۳۰۰٫۲	۱٫۱	-۰٫۱
۳۳۵	۲	۳۳۴٫۳۶	۲٫۱	-۰٫۶۴	۰٫۱	۳۳۵٫۱	۰٫۱	-۰٫۱
۳۵۵	۳	۳۵۶٫۲۷	۳٫۲	۱٫۲۷	۰٫۲	۳۵۴٫۹	۰٫۱	-۰٫۱

جدول ۴. مقایسه میزان خطای جهت‌یابی دو الگوریتم با آسیب میکروفون ۵

میزان زاویه واقعی (درجه)	الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		خطای الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		الگوریتم پیشنهادی		خطای الگوریتم پیشنهادی	
	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$
۰	۳	۸٫۱۸	۳٫۵	۸٫۱۸	-۰٫۵	۰٫۱	۳٫۱	۰٫۱
۳۰	۲	۱۹٫۵۹	۲٫۸	۱۰٫۴۱	-۰٫۸	۲۹٫۹	۲٫۱	۰٫۱
۹۰	۲	۸۵٫۵۳	۲٫۸	۴٫۴۷	-۰٫۸	۹۰٫۱	۲٫۱	۰٫۱
۱۲۰	۳	۱۳۹٫۲۸	۳٫۷	۹٫۲۸	-۰٫۷	۱۲۰٫۱	۲٫۹	۰٫۱
۱۶۵	۴	۱۶۹٫۱۲	۴٫۲	۴٫۱۲	-۰٫۲	۱۶۵٫۱	۴٫۱	۰٫۱
۱۸۰	۱	۱۸۲٫۹۸	۱٫۵	۲٫۹۸	-۰٫۵	۱۸۰٫۰	۰٫۹	۰
۲۰۵	۲	۱۹۸٫۴۲	۲٫۴	۶٫۵۸	-۰٫۴	۲۰۵٫۱	۱٫۹	۰٫۱
۲۲۰	۲	۲۱۱٫۱۸	۲٫۶	۸٫۸۲	-۰٫۶	۲۱۹٫۹	۲	۰٫۱
۲۷۰	۳	۲۶۷٫۵۵	۳٫۷	۲٫۴۵	-۰٫۷	۲۷۰	۲٫۹	۰
۳۰۰	۱	۲۹۲٫۵۴	۱٫۵	۷٫۴۶	-۰٫۵	۳۰۰٫۱	۱٫۱	۰٫۱
۳۳۵	۲	۳۴۱٫۸۹	۲٫۴	۶٫۸۹	-۰٫۴	۳۳۵٫۱	۲٫۱	۰٫۱
۳۵۵	۳	۰٫۳۸	۳٫۵	۵٫۳۸	-۰٫۵	۳۵۵٫۱	۲٫۹	۰٫۱



شکل ۱۰. مقایسه زاویه محاسباتی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای استقرار منبع صوت در ۵۰۰ متری با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد در شرایطی که میکروفون ۵ آسیب دیده

حال دو میکروفون از دو لایه مختلف آرایه میکروفونی شکل (۳) در حین تست محیطی قطع شده و نتایج جهت‌یابی منبع با این شرایط ادامه می‌یابد. جدول (۵) مقایسه جهت‌یابی الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد با قطع دو میکروفون شماره ۲ و شماره ۵ نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوریتم SRP-PHAT استاندارد، متوسط میزان خطا در برخی زوایا حدود ۱۷ درجه می‌باشد در حالی که در الگوریتم پیشنهادی همان ۰٫۱ درجه است.

جدول ۵. مقایسه میزان خطای جهت‌یابی دو الگوریتم با آسیب میکروفون ۵ و ۲

میزان زاویه واقعی (درجه)	الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		خطای الگوریتم SRP-PHAT استاندارد		الگوریتم پیشنهادی		خطای الگوریتم پیشنهادی	
	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$	$\theta$	$\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$
۰	۳	۱۶٫۱۵	۳٫۹	۱۶٫۱۵	-۰٫۹	۰٫۱	۲٫۹	۰٫۱
۳۰	۲	۴۱٫۹۷	۳٫۱	۱۱٫۹۷	۱٫۱	۲۹٫۹	۲٫۱	۰٫۱
۹۰	۲	۹۷٫۱۳	۲٫۹	۷٫۱۳	-۰٫۹	۸۹٫۱	۲٫۱	۰٫۱
۱۲۰	۳	۱۳۳٫۲۱	۳٫۸	۱۳٫۲۱	-۰٫۸	۱۱۹٫۹	۳٫۱	۰٫۱
۱۶۵	۴	۱۷۸٫۲۱	۴٫۸	۱۳٫۲۱	-۰٫۸	۱۶۴٫۹	۴٫۱	۰٫۱
۱۸۰	۱	۱۹۱٫۱۷	۱٫۹	۱۱٫۱۷	-۰٫۹	۱۷۹٫۹	۰٫۹	۰٫۱
۲۰۵	۲	۲۰۲٫۴۷	۲٫۵	۲٫۵۳	-۰٫۵	۲۰۵٫۱	۲٫۱	۰٫۱
۲۲۰	۲	۲۲۵٫۱۸	۲٫۷	۵٫۱۸	-۰٫۷	۲۱۹٫۹	۱٫۹	۰٫۱
۲۷۰	۳	۲۷۷٫۴۵	۳٫۶	۷٫۴۵	-۰٫۶	۲۷۰٫۱	۳٫۱	۰٫۱
۳۰۰	۱	۳۰۸٫۶۴	۱٫۹	۸٫۶۴	-۰٫۹	۲۹۹٫۹	۱٫۱	۰٫۱
۳۳۵	۲	۳۴۲٫۱۴	۲٫۵	۷٫۱۴	-۰٫۵	۳۳۵٫۱	۲	۰٫۱
۳۵۵	۳	۵٫۳۰	۳٫۵	۱۰٫۳۰	-۰٫۵	۳۵۵٫۱	۲٫۹	۰٫۱

دقت ۰٫۱ درجه در جهت‌یابی منبع صوتی ناپيوسته می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از این مقاله با مراجع مختلف نیز افزایش میزان دقت جهت‌یابی منابع صوتی ناپيوسته و یا حفظ دقت جهت‌یابی در شرایط آسیب‌دیدی یک یا چند حسگر در آرایه میکروفونی را دارد.

## مراجع

- [1] A.L. Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne, "Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies," Springer Science, New York: 2010.
- [2] M. Cobos, F. Antonacci, A. Alexandridis, A. Mouchtaris, and B. Lee, "A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks," journal of Wiley, Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing, pp.1-24, 2017.
- [3] S. Stapov, J. Ehala, j. Berdnikova and J. Prederr, "Gunshot Acoustic Component Localization with Distributed Circular Microphone Arrays," IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP), vol. 978-1-4799-8058, pp. 1-15, 2015.
- [4] C. Akman, T. Sonmez, O. Ozugur, A. B. Basli, M. K. Leblebicioglu, "Sensor fusion, sensitivity analysis and calibration in shooter localization systems," journal of Sensors and Actuators A: Physical, pp.66-75, 2018.
- [5] A. Alexandridis and A. Mouchtaris "Multiple Sound Source Location Estimation in Wireless Acoustic Sensor Networks using DOA estimates: The Data-Association Problem," IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 26, no. 2, pp.342-356, 2018.
- [6] M. B. Coteli, O. Olgun, and H. Hacıhabıoglu, "Multiple Sound Source Localisation with Steered Response Power Density and Hierarchical Grid Refinement," IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 26, no. 11, pp. 2215 - 2229, 2018.
- [7] S. Astapov, J. Berdnikova, J. Ehala, J. Kaugerand and J. S. Preden "Gunshot acoustic event identification and shooter localization in a WSN of asynchronous multichannel acoustic ground sensors," journal of Multidimensional Systems and Signal Processing, vol. 22, no. 2, pp. 563-595, 2018.
- [8] J. Fischer, W. Loges and W. Meuser, "Method for determining artillery position," Translation from German Patent no. DE-3239403-A1, 1984.
- [9] D. M. Paredes and J.A. Apolinario, "Shooter Localization based on DoA Estimation of Gunshot Signals and Digital Map

نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی این مقاله در مقایسه با مرجع [۳] که از الگوریتم SRP-PHAT استاندارد برای موقعیت-یابی منبع صوت ناپيوسته استفاده نموده و به دقت ۰٫۷۲ درجه رسیده است، افزایش دقت ۰٫۶۲ درجه را داشته است. در مرجع [۱۱] از ترکیب الگوریتم SRP-PHAT و شبکه عصبی برای جهت‌یابی منبع صوتی، به دقت ۳٫۲۵ درجه در بهترین شرایط دست یافته که الگوریتم پیشنهادی، افزایش دقت ۳٫۱۵ درجه را نسبت به این مرجع داشته است. این الگوریتم همچنین نسبت به مرجع [۶] که دقت جهت‌یابی با الگوریتم SRP-PHAT را ترمیم داده است، نیز افزایش دقت ۳٫۰۸ درجه را داشته است. همچنین الگوریتم پیشنهادی این مقاله، نسبت به مراجع [۱۲]، [۱۳]، [۱۷]، [۱۸] و [۲۵] با الگوریتم GCC-PHAT نیز به ترتیب افزایش دقت ۰٫۵، ۰٫۲، ۰٫۰۴۷، ۰٫۹ و ۳٫۴ درجه را داشته است. مرجع [۲۰] با الگوریتم جهت‌یابی SSC-MVDR، نیز فقط در حالتی که از شبکه پراکنده میکروفونی استفاده نموده، دقتی حدود الگوریتم پیشنهادی این مقاله را کسب کرده است.

## نتیجه گیری

در سامانه‌های جهت‌یاب برای نظارت محیطی باید الگوریتم‌هایی انتخاب گردند که کارآمدی لازم را در محیط بیرونی داشته باشند. اگر الگوریتم انتخابی علاوه بر دقت لازم، وفق-پذیری با شرایط جدید را نیز داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌گردد. در این مقاله ضمن دسته‌بندی کلی انواع الگوریتم‌های جهت‌یابی منابع صوتی، به طراحی یک سامانه جهت‌یاب منابع صوتی ناپيوسته در محدوده شنوایی انسان با میکروفون‌های خازنی پرداخته شده است و الگوریتمی ابتکاری در زمینه جهت‌یابی این منابع صوت ارائه گردیده است. برای این الگوریتم پیشنهادی، یک شبیه‌ساز طراحی گردیده است که متناسب با آرایش میکروفونی ماتریس شبیه‌ساز را تشکیل می‌دهد. با تشکیل این ماتریس، جهت‌یابی منبع صوتی ناپيوسته با دقت شبیه‌ساز صورت می‌گیرد. عدم محاسبات پیشرفته، سرعت عمل و وفقی بودن جهت‌یابی با تغییر نوع آرایش میکروفونی در مواقعی که یک یا چند میکروفون آسیب ببینند، از ویژگی‌های اصلی این الگوریتم به حساب می‌آید. همچنین الگوریتم پیشنهادی این مقاله با الگوریتم SRP-PHAT استاندارد مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از تست‌های محیطی متنوع، نشان از حفظ دقت جهت‌یابی و وفقی بودن الگوریتم با آرایش میکروفونی جدید ناشی از آسیب یک یا چند حسگر را دارد. همچنین میزان دقت در این الگوریتم پیشنهادی، وابسته به دقت تشکیل ماتریس شبیه‌ساز می‌باشد. در این مقاله، نتایج عملکردی الگوریتم پیشنهادی در تست‌های محیطی حاکی از

- [19] J. Sallai, W. Hedgecock, P. Volgyesi, A. Nadas, G. Balogh and A. Ledecz, "Weapon classification and shooter localization using distributed multichannel acoustic sensors," *Journal of Systems Architecture* 57, pp. 869 – 885, 2011.
- [20] F. Wang, Y. Chen and J. Wan, "In-Depth Exploration of Signal Self Cancellation Phenomenon to Achieve DOA Estimation of Underwater Acoustic Sources," *Journal of Applied Sciences*, vol. 9, no. 3, pp.1-24, 2019.
- [21] A. Pourmohammad, and S. M. Ahadi, "Real Time High Accuracy 3-D PHAT-Based Sound Source Localization Using a Simple 4-Microphone Arrangement," *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, vol. 6, no. 3, pp. 455 - 468. 2012.
- [22] N. Nassaji and M. Shafieian, "Detection of Point Sound Source Using Beamforming Technique in Complex Environments," *Open Journal of Acoustics*, vol. 8, no. 1, pp. 23–35, 2018.
- [23] A. Caglar, "Multi Shooter Localization With Acoustic Sensors," Degree of Master of science, middle east technical university, Turkish. 2017.
- [24] H. Liu, B. Li, X. Yuan, Q. Zhou and J. Huang, "A Robust Real Time Direction-of-Arrival Estimation Method for Sequential Movement Events of Vehicles," *Journal of Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 4, 2018.
- [25] C. Akman, T. Sonmez, O. Ozugur, A. B. Bash and M. Kemal, "Sensor fusion, sensitivity analysis and calibration in shooter localization systems," *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, no. 1, pp. 66–75, 2018.
- Information," *Latin America Transactions, IEEE* , pp. 441 - 447, 2015.
- [10] A.M.C.R. Borzino, J.A. Apolinario, M.L.R.de Campos and L.W.P. Biscainho, "Signal Enhancement for Gunshot DOA Estimation with Median Filters," *Circuits & Systems (LASCAS), IEEE 6th Latin American Symposium*, pp. 1 - 4, 2015.
- [11] D. D. Guerra and J. R. Beltran, "Direction of Arrival Estimation with Microphone Arrays Using SRP-PHAT and Neural Networks," *IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pp. 617 - 621, 2018.
- [12] T. Dudyala, S. Munnangi and S. K. Mani, "Grouping Subarray for Robust Estimation of Direction of Arrival," *Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*, pp. 1 - 5, 2018.
- [13] D.M. Paredes and J.A. Apolinario, "Shooter localization using Microphone Arrays on elevated platforms," *Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV), IEEE Conference Publications*, pp. 1 - 6, 2014.
- [14] T. Chen, Q. Huang, L. Zhang and Y. Fang, "Direction of Arrival Estimation Using Distributed Circular Microphone Arrays," *14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP)*, pp. 182 - 185, 2018.
- [15] J. G. C. Ribeiro, F. G. Serrenho, J. A. Apolinario and A. L. L. Ramos, "Effective direction of arrival estimation of gunshot signals from an in-flight unmanned aerial vehicle," *Proc. SPIE 10648, Automatic Target Recognition XXVIII*, pp.1-12, 2018.
- [16] R. P. Fernandes, A. L. L. Ramos and J. A. Apolinario, "Airborne DoA estimation of gunshot acoustic signals using drones with application to sniper localization systems," *Proc. SPIE 10184, Sensors and Command Control Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security, Defense, and Law Enforcement Applications XVI*, 2017.
- [17] J. G. C. Ribeiro, F. G. Serrenho, J. A. Apolinario and A. L. L. Ramos, "Improved DoA estimation with application to bearings-only acoustic source localization," *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, pp.100-105, 2017.
- [18] T. Damarla, L.M. Kaplan and G.T. Whipps, "Sniper Localization Using Acoustic Asynchronous Sensors," *Sensors Journal IEEE*, pp. 1469 – 1478, 2010.