

## جهت یابی سریع منابع صوت ضربه‌ای مبتنی بر تفاوت زمان ورود علامت

زهرا حیدری<sup>۱</sup>، امین‌اله مه‌آبادی<sup>۲\*</sup>

\*نویسنده مسئول، دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰، بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸

<sup>۱</sup> گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

<sup>۲</sup> مرکز تحقیقات آکوستیک، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

### چکیده

موقعیت‌یابی بی‌درنگ منابع صوتی از پیچیدگی محاسباتی و سرعت کم پاسخ رنج می‌برد که به وجود نوفه، انعکاس و معماری چیدمان حسگرها جهت افزایش دقت و سرعت جهت‌یابی وابسته است. آرایه رویکرد مناسب مقیاس‌پذیر با پیچیدگی کم، مقاوم به انعکاس و نوفه‌های طبیعی و مصنوعی جهت افزایش سرعت تصمیم‌گیری با طراحی معماری مناسب از مباحث تحقیقاتی نوین در کاربردهای غیرنظامی و نظامی می‌باشد. این مقاله روش سریع مقیاس‌پذیر جهت‌یابی صوتی مقاوم به نوفه طبیعی و انعکاس برای تخمین سه‌بعدی جهت‌یابی با استفاده از تکنیک تأخیر زمان ورود علامت‌ها پیشنهاد داده است که با برخورداری از معماری مناسب حسگرها و بکارگیری صافی طیف‌فاز در کنار درون‌یابی اسپلاین مکعبی بدون پیش‌پردازش جهت حذف نوفه، از الگوریتم سریع کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی بهره می‌برد. در آزمایشات داده‌های واقعی و مصنوعی میدان نزدیک، میزان خطای زاویه سمت و ارتفاع به ترتیب ۰/۵۵۸۷ و ۱/۱۶۵۲ درجه و در میدان دور به ترتیب ۰/۰۳۲۱ و ۰/۲۷۵۹ درجه است. سرعت بی‌درنگ تعیین جهت برابر ۱/۰۰۶ ثانیه و دارای دقت بالای زاویه تخمین و موقعیت اصلی منبع است.

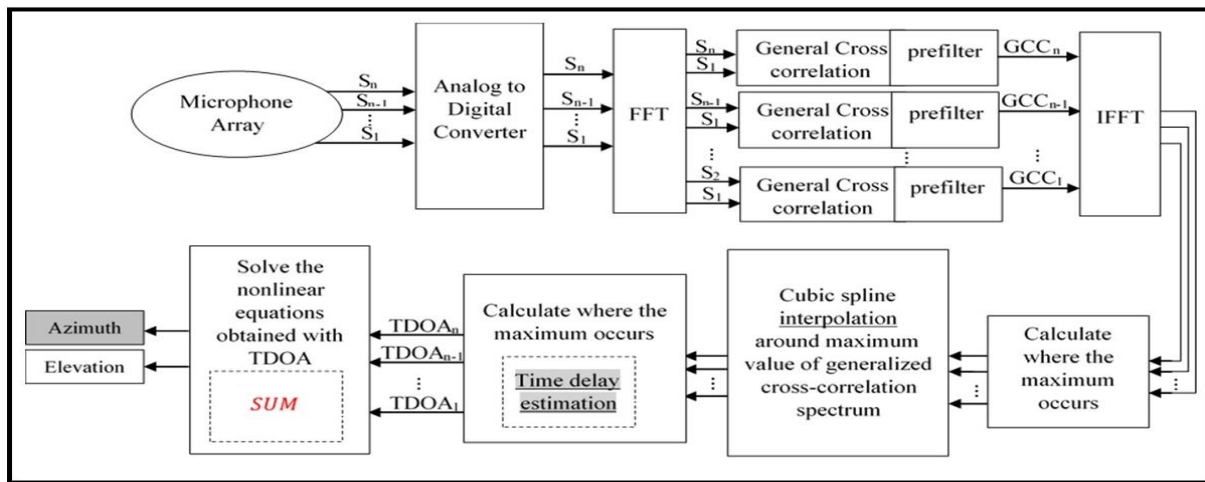
**کلمات کلیدی:** آکوستیک، صوت، سیگنال ضربه‌ای، جهت‌یابی صوتی، تفاوت زمان ورود علامت، میدان دور، پهن‌بند.

### ۱- مقدمه

پردازش علامت است. تخمین جهت تک‌تیرانداز<sup>۳</sup>، ردیابی هواپیماهای کوچک بدون سرنشین<sup>۴</sup>، برگزاری کنفرانس ویدیویی هوشمند<sup>۵</sup> و حرکت ربات در محیط ناشناخته [۶، ۷] از کاربردهای موقعیت‌یابی هستند. چالش اساسی ردیابی موقعیت<sup>۹</sup> منابع صوتی در جهت‌یابی<sup>۱۰</sup> سریع و مکان‌یابی<sup>۱۱</sup> دقیق است.

در فرآیند جهت‌یابی پس از تعیین جهت منبع اگر فاصله منبع نسبت به حسگرهای صوتی به دست آید فرآیند مکان‌یابی مختصات منبع کامل است. فرآیند ردیابی بی-درنگ ۱۲ منابع صوتی از دقت جهت‌یابی و سرعت مکان‌یابی رنج می‌برد که انتخاب معماری و رویکرد مناسب به افزایش سرعت، کاهش پیچیدگی ۱۳ و مقاومت به نوفه ۱۴ و انعکاس ۱۵ کمک بسیار می‌کند. فرآیند موقعیت‌یابی از چالش‌هایی مانند روش فعال ۱۶ و غیرفعال ۱۷، موقعیت‌یابی دوبعدی و سه‌بعدی، گزینه مبداء مختصات، تحرک و ثبات منابع، دوری و نزدیکی منابع، ابعاد و ارتفاع منابع، معماری حسگرها، پیچیدگی محاسبات، دقت و سرعت جهت‌یابی و مکان‌یابی، تغییرات وضعیت و موقعیت منابع، نوفه‌های طبیعی و مصنوعی، و شرایط نامناسب محیطی سیگنال برخورداری است. تمرکز این مقاله فقط بر محور جهت‌یابی بی‌درنگ منابع قرار دارد و هدف آن آرایه روش سریع دقیق جهت‌یابی سه‌بعدی و مقاوم به نوفه و انعکاس است.

آکوستیک<sup>۱</sup> دانش تولید، انتقال و تأثیرات صدا است [۱]. صدا<sup>۲</sup> همواره در طول زندگی بشر و سایر موجودات نقش بسیار مهمی داشته به طوری که یکی از مهم‌ترین عوامل ارتباطی آن‌ها است. از میان پنج حس انسان، شنوایی برخلاف حس بینایی متکی بر روشنایی محیط، منجر به ادراک انسان از طریق صدا در تمام جهات بدون وابستگی به شرایط می‌شود. جهت‌یابی صوتی یکی از خصیصه‌های مهم انسان‌ها و سایر موجوداتی است که به این سامانه به واسطه حس شنوایی مجهز هستند [۲]. این توانایی فوق‌العاده انسان و موجودات زنده را می‌توان بسیار گسترده و کارآتر در حوزه طراحی ماشین‌های خودکار توسعه داد و محدودیت‌های موجود در موقعیت‌یابی توسط شنوایی انسان و موجودات زنده را برطرف کرد. از مشکلات شنوایی انسان محدودیت در بازه شنوایی، دو گوش یا حداقل تعداد حسگرهای صوتی، سرعت کم و دقت تخمین جهت منابع صوت است که موانع مختلف مانند وجود موانع گذر سیگنال، منابع متحرک، تداخل سیگنال و مشکلات نویز بر سختی تشخیص علائم صوتی می‌افزاید. پردازش دقیق و سریع صوت از مباحث مؤثر در پردازش علامت است. جهت‌یابی منابع صوتی توسط سامانه حسگری<sup>۳</sup> در سیستم‌های سایبر-فیزیکی<sup>۴</sup> از موضوعات تحقیقاتی با سابقه و جدید اینترنت شبکه‌های اشیاء<sup>۵</sup> در



شکل ۱: دیاگرام بلاکی روش پیشنهادی مقیاس‌پذیر جهت‌یابی سه‌بعدی منابع صوتی

### ۱-۱ جهت‌یابی صوتی

علامت به‌واسطه حسگرها و رقمی‌شدن خروجی، جهت افزایش سرعت محاسبات وارد حوزه بسامد می‌شود. در مرحله اول همبستگی هر علامت را با علامت حسگر مبنا محاسبه و وارد حوزه زمان می‌شود. سپس بر نتایج حاصل درون‌یابی اسپلاین مکعبی اعمال می‌گردد؛ مکانی با بیشینه مقدار گام قبل، میزان تأخیر دریافت هر حسگر نسبت حسگر مبنا به‌دست می‌آید. در مرحله دوم توسط الگوریتم کمینه مربعات بهبودیافته و با کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی، تخمین جهت صورت می‌گیرد. روش پیشنهادی ما در مقایسه با آخرین روش‌های علمی علاوه‌بر برخورداری از افزایش دقت تخمین تأخیر حسگرها نسبت به حسگر مبنا در درون‌یابی اسپلاین و تخمین مناسب تعیین موقعیت منبع، از سرعت بالای محاسبات و مقاومت به‌نوفه و انعکاس بهره می‌برد.

جهت‌یابی صوتی یعنی تعیین جهت دریافت صوت منابع توسط حسگرهای گوش و میکروفون که در دویعد و سه‌بعد قابل تعیین است. جهت‌یابی از نظر دوری و نزدیکی منابع، روش فعال و غیرفعال تعیین، نوع تکنیک، دقت و سرعت تشخیص منابع دارای پیچیدگی متفاوت است. اگر منابع صوت در فاصله زیاد از مبدأ مختصات قرار گیرد به آن منابع میدان‌دور<sup>۱۸</sup> و غیر آن منابع میدان‌نزدیک<sup>۱۹</sup> گویند [۸]. در فواصل دور نمی‌توان به‌طور مستقیم مختصات دکارتی منابع صوتی را بدست آورد لذا به تخمین جهت‌منبع اکتفا می‌شود. جهت‌یابی به دو نوع فعال<sup>۲۰</sup> (قابل تشخیص) و غیرفعال<sup>۲۱</sup> (غیرقابل تشخیص) تقسیم می‌شود. در سامانه فعال برخلاف غیرفعال خاموش، علامت‌هایی از جهت‌یاب به سمت منبع برای اخذ اطلاعات صادر می‌شود یعنی موقعیتش قابل آشکارسازی و امکان فریب-خوردن دارد [۹،۱۰].

### ۱-۳ چالش‌ها و نوآوری

از چالش‌های جهت‌یابی خودکار منابع در میدان باز می‌توان به وجود نوفه طبیعی، تولید نوفه مصنوعی محاسبات، پیچیدگی بالای محاسبات، جهت‌یابی سخت سه-بعدی، دقت مناسب لازم، سرعت کم تشخیص، حفظ معماری حسگرها، مقیاس-پذیری کم، قابلیت کم کار در میدان دور، و گره‌گاه اصلی در مکان‌یابی و ردیابی اشاره کرد. در این مقاله روش مقیاس‌پذیر<sup>۲۷</sup> جهت‌یابی خودکار منابع ثابت آرایه-شده که دارای معماری دو لایه است. بیشتر اتکا و مانور معماری در مدل پیشنهادی برای حل چالش تشخیص خودکار منبع، کاهش پیچیدگی محاسبات جهت‌یابی، ثبت موقعیت‌ها، مقیاس‌پذیری آرایه حسگرها، مقاومت به نوفه طبیعی، دقت مناسب و سرعت زیاد جهت‌یابی است. این امر قابلیت بالای به‌کارگیری روش در ردیابی بی‌درنگ منابع را نشان می‌دهد. هدف روش پیشنهادی تشخیص - خودکار منابع با قابلیت مقیاس‌پذیری آرایه حسگرها، امکان افزایش حسگرها در ردیابی منابع ثابت جهت افزایش دقت و مقاومت به وجود نوفه طبیعی است. نوآوری‌های این مقاله به‌طور خلاصه عبارت از کاهش پیچیدگی<sup>۲۸</sup> محاسبات جهت‌یابی، افزایش سرعت<sup>۲۹</sup> تعیین جهت، مقیاس‌پذیری آرایه حسگرها، جهت‌یابی سه‌بعدی، قابلیت بسط از میدان نزدیک به کاربرد میدان دور، کاهش پیچیدگی محاسبات و ابعاد و مقادیر ماتریس‌ها با قرار گرفتن حسگر مبنای آرایه در مبدأ دستگاه مختصات، مقاومت به نوفه طبیعی و قدرت مناسب کاربرد در مکان‌یابی و ردیابی بی‌درنگ است.

روش‌های جهت‌یابی منبع صوت به دو دسته باریک‌بند<sup>۲۲</sup> و پهن‌بند<sup>۲۳</sup> تقسیم می‌شوند [۱۱،۱۲]؛ منابع ضربه‌ای پهن‌بند مانند انفجار اساس موضوع رویکرد این مقاله به روش غیرفعال است. اهمیت تخمین جهت منابع ضربه‌ای به تصمیم‌گیری سریع عملیات پس از تخمین مانند اعزام سریع نیروهای کنشگر به محل حادثه است. سادگی روش، پیچیدگی کم محاسباتی و زمان پایین اجرا نسبت به سایر روش‌ها متداول از دلایل گرایش به‌روشن تفاوت‌زمان ورود<sup>۲۴</sup> می‌باشد. همچنین با ترکیب تفاوت زمان ورود علامت و درون‌یابی، دقت جهت تخمینی افزایش می‌یابد که دلیل انتخاب رویکرد تأخیر زمان<sup>۲۵</sup> در مقاله ما است. روش جهت‌یابی در طول زمان تخمین جهت با چالش‌های متعددی از جمله وجود نوفه‌های طبیعی سر و صدای اضافی، نوفه‌های مصنوعی ایجاد می‌شود، انعکاس صدا در محیط، معماری روش، چینش حسگرها، میدان دور یا نزدیک منابع، مختصات دویعدی و سه‌بعدی<sup>۲۶</sup> جهت و پیچیدگی محاسباتی روش‌های تخمین موقعیت روبرو است که منجر به افزایش پیچیدگی و زمان اجرای الگوریتم تخمین موقعیت می‌شود. سامانه موقعیت‌یاب غیرفعال علاوه‌بر مزیت عدم شناسایی توسط دشمن می‌تواند به افزایش سرعت پردازش محاسبات، کاهش پیچیدگی، حذف پیش‌پردازش، تقلیل مراحل الگوریتم موقعیت‌یابی، افزایش دقت و سرعت پاسخ کمک می‌کند.

### ۱-۲ معماری پیشنهادی

در ادامه مقاله و در بخش ۲ کارهای مرتبط جهت‌یابی صوتی شرح داده می‌شود. در بخش ۳ پیش‌زمینه موردنیاز مساله و جزئیات روش پیشنهادی بیان می‌گردد. در بخش ۴ به نتایج آزمایش‌های تجربی اشاره و نهایتاً در بخش ۵ نتیجه‌گیری می‌شود.

اکثر روش‌های جهت‌یابی از پردازش دو لایه استفاده می‌کنند. ابتدا پارامترهای موقعیت‌یابی تخمین و سپس جهت منبع با توجه به عناصر تخمینی، تعیین می‌شود [۸]. روش پیشنهادی ما از دو مرحله ترکیب تفاوت زمان ورود و درون‌یابی تشکیل شده که نمودار بلوکی آن در شکل ۱ آمده است. جهت‌یابی پس از دریافت

## ۲- کارهای مرتبط

مطالعات انجام شده از سال ۱۹۷۶ تاکنون نشان می‌دهد که روش‌های مبتنی بر حل معادلات غیرخطی هذلولی حاصل از تأخیر زمانی بین حسگرها، از پرکاربردترین روش‌های جهت‌یابی است. از مزایای روش جهت‌یابی هذلولی می‌توان به مقاوم بودن نتایج آن در برابر ورودی‌های آلوده به‌نوفه اشاره کرد. راه حل مساله جهت‌یابی غیرخطی، خطی‌سازی و تخمین کمینه مربعات<sup>۲۰</sup> است. برخلاف مزیت آشکار خطی‌سازی در ساده‌سازی الگوریتم، عملیات خطی‌سازی باعث حساسیت بیشتر این الگوریتم‌ها نسبت به نوفه می‌شود [۹، ۱۰]. محققان روش‌های مختلفی را برای حل مساله جهت‌یابی منبع ثابت مبتنی بر تفاوت زمان ورود از جمله روش تکراری<sup>۲۱</sup> [۱۱] و روش‌های شکل بسته<sup>۲۲</sup> [۱۲، ۱۳] تمرکز کردند که معادلات غیرخطی با استفاده از بسط تیلور خطی نیز قابل حل است [۱۱، ۱۴]. سپس جهت منبع با استفاده از روش تکراری و حدس اولیه با یک معیار خطا محاسبه می‌گردد. مزیت این روش در امکان استفاده از تأخیرهای اضافی جهت افزایش دقت محاسبه است. ولی این روش نسبت به انتخاب حدس اولیه و حد همگرایی مناسب حساس است و در صورت عدم انتخاب مقدار مناسب، جواب قابل قبولی نخواهد داد. خطای خطی‌سازی و حجم زیاد عملیات در تکرارهای مختلف از معایب آن است.

روش پیشنهادی چنان<sup>۲۳</sup> امکان استفاده از اطلاعات حسگرهای اضافی را داد [۱۵]. الگوریتم حل مساله معمولاً شامل روش‌های تکراری، تحلیلی و جستجو است [۱۶]. رویکرد خطی عمدتاً شامل دو روش کمینه مربعات خطی<sup>۲۴</sup> و کمینه مربعات خطی وزنی<sup>۲۵</sup> است. روش کمینه مربعات خطی نیازی به دانش پیشین آماری نوفه ندارد و راه حل ساده و کارآمد از نظر محاسبات است [۱۷]. کمینه مربعات خطی وزنی یک نسخه وزنی از روش کمینه مربعات خطی است که دارای دقت بالاتر تخمین می‌باشد. از آن‌جا که با استفاده از رابطه محدودیت بین مکان هدف و متغیر کمکی می‌توان عملکرد کمینه مربعات خطی وزنی را بیشتر بهبود بخشید لذا مجموعه‌ای از روش‌های مبتنی بر کمینه مربعات خطی وزنی با محدودیت پیشنهاد شد [۱۵، ۱۸].

کمینه مربعات خطی وزنی دو مرحله‌ای، یک الگوریتم موقعیت‌یابی است که از محاسبات دو مرحله‌ای برای تخمین موقعیت استفاده می‌کند [۱۵]. به‌منظور حل اثر محصور شدن ناشی از تعداد ثابت نقاط نمونه‌برداری<sup>۲۶</sup> در سامانه جهت‌یابی تفاوت زمان ورود غیرفعال در کاربردهای عملی، الگوریتم تخمین تأخیر زمانی بر اساس درون‌یابی اسپلاین مکعبی<sup>۲۷</sup> پیشنهاد شد. این الگوریتم از درون‌یابی اسپلاین مکعبی برای درون‌یابی منحنی قله طیفی تابع همبستگی استفاده کرد. در نتیجه دقت مقدار قله و برآورد دقیق تأخیر زمانی منبع علامت بهبود یافت [۱۹]. تفاوت زمان ورود علامت به علت برخورداری از پیچیدگی کم محاسباتی و سادگی، روشی منتخب برای منابع صوتی پهن‌بند است. این روش دو مرحله‌ای نگاه‌های بسیاری را به سمت خود معطوف کرد زیرا در طیف وسیعی از سناریوها منبع صوت فقط یک علامت‌گذار بدون الگوی شکل موج از پیش تعریف‌شده از خود منتشر می‌کند. لذا تنها می‌توان از اندازه‌گیری‌های تفاوت زمان ورود در یافتن جهت استفاده کرد [۲۰]؛ روش منتخب مقاله ما جهت تخمین جهت منبع صوت ضربه‌ای پهن‌بند است. گلوگاه دقت در تخمین جهت بیشتر مربوط به بخش تخمین تفاوت زمان ورود بین علامت‌های دریافتی از حسگرها است. در مرجع [۲۶] با استفاده از تمام جایگشت‌های بین میکروفن‌ها بدون دانش از سرعت صوت، تفاوت زمان ورود را تخمین زده است. اما در این مقاله ما تنها تفاوت زمان ورود میان حسگرها و حسگر مبنا را تخمین می‌زنیم و این پیچیدگی زمانی فرآیند را کاهش می‌دهد. همچنین می‌توان از اطلاعات تخمین تفاوت زمان ورود و سایر

اندازه‌گیری‌ها میان حسگرها جهت افزایش دقت تخمین جهت نهایی استفاده کرد، برای مثال در مرجع [۲۷] از اندازه‌گیری تفاوت فاز ورودی بین حسگرها در کنار تفاوت زمان ورود استفاده شده است.

## ۳- پیش‌نیازها و روش پیشنهادی

برای محاسبه جهت منبع با استفاده از تأخیرهای تخمینی باید معادلات غیرخطی هذلولوی تشکیل شود. با در نظر گرفتن مختصات حسگر مبنای جهت‌یاب در مبدأ دستگاه مختصات از حجم محاسبات ماتریسی با کاهش ابعاد و کاهش مقدار عددی ماتریس‌ها، کاسته می‌شود. همچنین پنج روش کمینه مربعات خطی، کمینه مربعات مقید<sup>۲۸</sup>، چان، کمینه مربعات وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته<sup>۲۹</sup> و کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی<sup>۳۰</sup> که دارای پیچیدگی محاسباتی کمی هستند ارزیابی می‌شوند. آزمایشات با داده‌های واقعی و مصنوعی و دو آرایه حسگری انجام می‌شود و نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش منتخب مقاله کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی، به واسطه دقت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها است.

**مرحله اول (روش تفاوت زمان ورود با همبستگی متقابل و دورن‌یابی):** تفاوت زمان ورود علامت به علت برخورداری از پیچیدگی کم محاسباتی و سادگی، روشی منتخب برای منابع صوتی پهن‌بند است. در روش تفاوت زمان ورود علامت، یکی از حسگرها به عنوان حسگر مبنا در نظر گرفته شده و اختلاف زمان دریافت علامت در سایر حسگرها با این حسگر محاسبه می‌شود [۱۸]. الگوریتم‌های آرایه شده برای محاسبه زمان تأخیر، مساله موردنظر را با فرض وجود یک منبع و الگوی انتشار تک مسیری حل نموده و در نهایت نتایج حاصل را به سایر حالات تعمیم می‌دهند. متداول‌ترین روش برای محاسبه تأخیر بین دو حسگر، مشخص کردن مقدار بیشینه تابع همبستگی متقابل بین داده‌های رسیده از منبع می‌باشد. این روش را همبستگی متقابل می‌نامند. الگوی علامت دریافتی از منبع بدون در نظر گرفتن انعکاس در رابطه (۱) نمایش داده شده است.

$$x_1(t) = s(t) + \xi_1(t) \quad (1)$$

$$x_i(t) = s(t - d_{i1}) + \xi_i(t), \quad i = 2, 3, \dots, M$$

که در آن  $s(t)$  علامت منبع، و  $d_{i1}$  تأخیر زمانی علامت دریافتی  $i$  نسبت به علامت مبنا معادل ۱ است.  $M$  تعداد حسگرهای آرایه و  $\xi_1$  نوفه جمع شونده است. برای محاسبه مقدار تأخیر بین دو علامت، با اعمال تابع همبستگی متقابل به آن‌ها، مقدار شباهت آن‌ها را نسبت به یکدیگر به‌دست می‌آوریم. در عمل به خاطر افزایش سرعت محاسبات، برای محاسبه تأخیر بین هر جفت حسگر، عملیات را در حوزه بسامد انجام می‌دهیم. استفاده از روش همبستگی متقابل برای محاسبه مقدار تأخیر بین دو علامت، ایده‌آل نبوده و در صورت وجود نوفه و یا انعکاسات محیطی دقت پایینی دارد. برای افزایش کارایی این روش و کاهش تأثیر چالش‌های نوفه و انعکاس، صافی طیف فاز در نظر گرفته شده است. مقدار همبستگی متقابل دو علامت با استفاده از تبدیل فوری آن‌ها به‌دست می‌آید که در رابطه (۲) نمایش داده شده است و با اعمال صافی  $\Psi_g(\omega)$  به‌صورت رابطه (۳) درمی‌آید. رابطه (۴) صافی طیف فاز را نمایش می‌دهد.

$$G_{x_1 x_i}(\omega) = X_1(\omega) X_i^*(\omega), \quad i = 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

$$R_{x_1 x_i}(\omega) = \Psi_g(\omega) G_{x_1 x_i}(\omega) \quad (3)$$

$$\Psi_g(\omega) = \frac{1}{|G_{x_1 x_i}(\omega)|} \quad (4)$$

$$k_{3D} = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\phi) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$c\tau_i = r_{i1} = r_i - r_1 = \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2}}{c} =$$

$$x_i \cos(\theta) \cos(\phi) + y_i \cos(\theta) \sin(\phi) + z_i \sin(\theta) \quad (6)$$

مسأله جهت‌یابی برای تخمین جهت را می‌توان با ماتریس رابطه (۷) مدل‌سازی کرد. در آن  $s = [s_2, s_3, \dots, s_{M-1}]^T$ ، ماتریس حاوی مختصات حسگرهای صوتی آرایه به جزء حسگر مبنا (حسگر ۱) می‌باشد که مختصات حسگر مبنا در دستگاه مختصات در سه بعد برابر  $s_1 = [0, 0, 0]$  در نظر گرفته شده و  $\hat{t} = [\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_{M-1}]$  تفاوت زمان ورودهای تخمینی است.  $\hat{k}$  بردار جهت تخمینی بدون در نظر گرفتن بعد فضایی آن حاوی خطایی با مقدار  $\Delta k$  است که  $n$  بردار خطای اندازه‌گیری می‌باشد. خطای اندازه‌گیری، تفاوت زمان ورود و خطای سرعت صدا را در نظر می‌گیرد که در این مقاله سرعت صدا به مقدار ثابت فرض می‌شود.  $\Delta \tau$  بردار نوفه اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود است.

$$\hat{c}\hat{t} = S\hat{k} + n, \quad (7)$$

$$\hat{t} = \tau + \Delta \tau, \hat{k} = k + \Delta k$$

### ۳-۱ روش کمینه مربعات خطی

اولین بار حل جهت‌یابی با تفاوت زمان ورود در مقاله [۲۱] بررسی شد و روش کمینه مربعات خطی برای حل آن توسعه یافت. این روش با اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود که محاسبات کمی دارد از سه مؤلفه بردار جهت فرضی، اندازه زاویه سمت و ارتفاع را استخراج می‌کند و مشاهده شده که یک رابطه محدود درجه دو بین سه مؤلفه بردار تخمینی جهت در اندازه‌گیری پرنوفه دارد. برآوردگر کمینه مربعات خطی خطا رابطه (۸) را با استفاده از رابطه خطی بین بردار تفاوت زمان ورود و بردار جهت فرضی ایجاد می‌کند [۲۰، ۲۱].

$$\hat{k} = \hat{c}(S^T W S)^{-1} S^T W \hat{t} \quad (8)$$

$\hat{k}$  بردار جهت تخمینی است که در جهت‌یابی به شکل رابطه (۵) تعریف می‌شود و  $\hat{c}$  سرعت تخمینی صوت است که در این مقاله مقداری ثابت در دمای ثابت فرض می‌شود.  $T$  و  $-1$  در قسمت فوقانی ماتریس‌ها به ترتیب بیانگر ترانهاده<sup>۴۶</sup> و وارون<sup>۴۷</sup> ماتریس هستند.  $I_{M-1}$  ماتریس مربعی یک با  $M-1$  سطر و ستون است.  $I_{M-1}$  ماتریس همانی با  $M-1$  سطر و ستون و  $W$  ماتریس وزنی است. اگر  $\Sigma = \text{cov}(\Delta \tau)$  ماتریس کوواریانس باشد لذا  $W = \Sigma^{-1}$  است.  $W$  در ماتریس کوواریانس ناشناخته را می‌توان با رابطه (۹) محاسبه کرد.

$$W = I - (1 \times 1^T) / N \quad (9)$$

با برآورد بردار جهت از آرایه سه‌بعدی، یک برآورد بسته ولی غیربهبوده برای زاویه سمت و ارتفاع در فضای سه‌بعدی به دست می‌آید. زاویه سمت در روش کمینه مربعات خطی خطا با رابطه (۱۰) و زاویه ارتفاع با رابطه (۱۱) به رادیان تعریف می‌شوند.

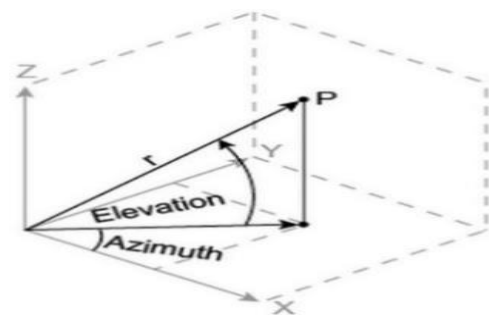
$$\hat{\phi} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{k}_y}{\hat{k}_x} \right) \quad (10)$$

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{k}_z}{\sqrt{\hat{k}_x^2 + \hat{k}_y^2}} \right) \quad (11)$$

$\omega$  نشان‌دهنده بسامد،  $X_1$  و  $X_1'$  به ترتیب تبدیل فوریه علامت حسگر مبنا و مزدوج<sup>۴۱</sup> تبدیل فوریه علامت‌های سایر حسگرها است. در ادامه رابطه (۴) با استفاده از عکس تبدیل فوریه سریع<sup>۴۲</sup> از حوزه بسامد به زمان منتقل می‌شود  $(R_{x_i x_i}(\omega) \xrightarrow{\text{IFFT}} R_{x_i x_i}(\tau))$ . در گام بعد، در محدوده ۱۰۰ داده قبلی و بعدی مقدار بیشینه تابع  $R_{x_i x_i}(\tau)$  به واسطه‌ی درون‌یابی اسپلاین مکعبی یک داده را بین هر دو داده اضافه می‌کنیم. محلی که حاوی مقدار بیشینه مرحله قبل است، میزان تأخیر بین علامت دریافتی هر جفت حسگر است.

درون‌یابی نوعی تخمین است؛ روشی برای ساختن نقاط داده جدید در محدوده مجموعه‌ای گسسته از نقاط داده شناخته شده است. درون‌یابی اسپلاین یک روش درون‌یابی است که در آن، درون‌یاب، نوع خاصی از چندجمله‌ای تکه‌ای است که اسپلاین نام دارد. درون‌یابی اسپلاین مکعبی باعث افزودن نمونه‌های جدید به عکس تبدیل فوریه سریع همبستگی طیف در نقاط نزدیک به بیشینه خود می‌شود. در آن صورت ممکن است مقدار بیشینه جدید عکس تبدیل فوریه سریع همبستگی طیف تغییر کند و منجر به تخمین دقیق‌تر تأخیر زمانی حسگرها شود. با توجه به این که میزان تأخیر بین حسگرها باید کم باشد؛ در صورتی که تأخیر با توجه به نتایج حاصل بیش از یک ثانیه بود، در آن صورت عملیات همبستگی متقابل با طیف فاز به صورت معکوس انجام می‌شود. به این ترتیب تأخیر بین دو علامت در منفی نیز ضرب می‌شود، چراکه صوت به حسگر ثانویه زودتر از حسگر مبنا رسیده است. به این ترتیب میزان تأخیر را به دست می‌آوریم. در انتها تأخیرهای محاسبه شده بایستی قرینه شوند.

**مرحله دوم (برآورد تعیین جهت):** جهت منبع صوت با استفاده از تأخیرهای تخمینی، با معادلات غیرخطی هذلولوی مشخص می‌شود. تعیین جهت با در نظر گرفتن مختصات حسگر مبنا در مبدأ دستگاه مختصات از حجم محاسبات ماتریسی با کاهش ابعاد و کاهش مقدار عددی ماتریس‌ها کاسته می‌شود. در ادامه پنج روش کمینه مربعات خطی، کمینه مربعات مقید، چان، کمینه مربعات وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبود یافته و کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی که دارای پیچیدگی محاسباتی کمی هستند بررسی می‌شوند. مختصات دکارتی منبع صوت و حسگرها در سه بعد به ترتیب با  $P_s = [x_s, y_s, z_s]$  و  $P_i = [x_i, y_i, z_i]$  نمایش داده می‌شود، به طوری که  $i = 1, 2, \dots, M$  تعداد حسگرهای آرایه است.  $[\phi, \theta]$  زوایای منبع صوت در فضای سه‌بعدی نسبت به حسگر مبنا است.  $k_{3D}$  بردار جهت در مختصات سه‌بعدی است که در رابطه (۵) آمده است.



شکل ۲ زاویه سمت و ارتفاع در دستگاه مختصات سه‌بعدی

فاصله بین هر حسگر و حسگر مبنا<sup>۴۳</sup> در سه بعد طبق رابطه (۶) می‌باشد که  $c$  همان سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه و  $\tau_{i1}$  تأخیر بین دو جفت حسگر  $i$  و ۱ است. همچنین  $r_1$  و  $r_1'$  به ترتیب، فاصله حسگر  $i$  از منبع صوت و فاصله حسگر مبنا (حسگر ۱) از منبع صوت و  $\phi$  زاویه سمت<sup>۴۴</sup> منبع صوت نسبت به حسگر مبنا و  $\theta$  زاویه ارتفاع<sup>۴۵</sup> منبع صوت نسبت حسگر مبنا است. شکل ۲، زاویه سمت و ارتفاع در دستگاه مختصات سه‌بعدی را نشان می‌دهد.  $P$  منبع صوت و  $r$  فاصله مبدأ مختصات (حسگر مبنا در آن واقع شده است) تا منبع صوت است.

### ۲-۳ روش کمینه مربعات مقید

کمینه‌سازی تابع هزینه<sup>۴۸</sup> خطای اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود نیاز به برآورد بردار جهت دارد. استفاده از تابع هزینه درجه‌دو<sup>۴۹</sup> رایج و ویژگی ریاضی واریانس منجر به قابلیت انعطاف آن است [۲۰]. راه‌حل جهت‌یابی رابطه (۸)، با کمینه‌سازی نرُم حاصل جمع مربعات بردار خطا، رابطه (۱۲) را ترسیم می‌کند. رابطه (۱۳) محدودیت درجه‌دوم جهت‌دار است. اگر زاویه‌های سمت و ارتفاع توسط برخی از روش‌های کمینه‌سازی غیرخطی تعیین گردند و  $\hat{k}$  با استفاده از تابع مثلثاتی از دو پارامتر جهت‌دار محاسبه شود  $\hat{k}^T \hat{k}$  یک خواهد بود. ولی اگر بردار تخمینی جهت از سه جزء مؤلفه در سه بعد با روش کمینه مربعات خطی خطا محاسبه شود اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود در حضور نوفه لزوماً یک نیست. برای حل مسأله بهینه‌سازی محدود، ضریب لاگرانژ  $\lambda$  معرفی شد تا تابع لاگرانژی رابطه (۱۴) تعریف شود. بردار جهت با کمینه‌سازی تابع لاگرانژ برآورد می‌شود که رابطه (۱۵) کمینه‌سازی و رابطه (۱۶) ادامه فرآیند کمینه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$J(\hat{k}) = [S\hat{k} - \hat{c}\hat{t}]^T W [S\hat{k} - \hat{c}\hat{t}] \quad (12)$$

$$\hat{k}^T \hat{k} = 1 \quad (13)$$

$$\mathcal{L}(\hat{k}, \lambda) = J(\hat{k}) + \lambda(\hat{k}^T \hat{k} - 1) \quad (14)$$

$$\hat{k} = \min_{\hat{k}, \lambda} \mathcal{L}(\hat{k}, \lambda) \quad (15)$$

$$\mathcal{L}(\hat{k}, \lambda) = \hat{k}^T (S^T W S + \lambda I) \hat{k} - 2\hat{c}\hat{k}^T S^T W \hat{t} + \hat{t}^T W \hat{t} \quad (16)$$

تمایز  $\mathcal{L}(\hat{k}, \lambda)$  نسبت به  $\hat{k}$  و تنظیم مشتق روی بازده صفر<sup>۵۰</sup> در رابطه (۱۷) آمده است. رابطه (۱۸) با استفاده از کمینه مربعات مقید رابطه (۱۵) برای حل  $\hat{k}$  جهت‌یافتن  $\hat{\lambda}$  ارایه می‌شود. کمینه مربعات مقید حکم می‌کند که  $\hat{\lambda}$  در رابطه (۱۸) صفر نباشد؛ در غیر آن تخمین کمینه مربعات مقید به رابطه (۸) یعنی تخمین کمینه مربعات خطی خطا تغییر می‌کند.

$$(S^T W S + \lambda I) \hat{k} - \hat{c}\hat{t} = 0 \quad (17)$$

$$\hat{k} = \hat{c}(S^T W S + \lambda I)^{-1} S^T W \hat{t} \quad (18)$$

الگوی بدون محدودیت برای تابع لاگرانژی با رابطه (۱۹) به دست می‌آید. برای نقطه  $\forall i, s_i^T k - \hat{c}\hat{t}_i = 0$  در رابطه (۱۹) مشتق سمت‌چپ با سمت راست آن برابر نیست لذا تکین<sup>۵۱</sup> است و قابل استخراج نیست. گرچه تابع  $\mathcal{L}(\hat{k}, \lambda)$  در رابطه (۱۹) در همه جهات قابل استخراج نیست ولی ممکن است برای دستیابی به گرادیان رابطه (۱۹) از خطی شدن قطعه‌ای استفاده کنیم. اگر تابع  $\mathcal{L}(\hat{k}, \lambda)$  به اندازه کافی از آن نقاط تکین فاصله داشته باشد شیب تقریب خطی قطعه قطعه شده قابل ارزیابی است. راه‌حل تقریبی شکل‌بسته از شیب تابع لاگرانژی به صورت رابطه (۲۰) در سه بعد به دست می‌آید.

$$\tilde{\mathcal{L}}(\hat{k}, \lambda) = \sum_{i=1}^{N-1} |s_i \hat{k} - \hat{c}\hat{t}_i| + \lambda(\hat{k}^T \hat{k} - 1) \quad (19)$$

$$\nabla_{\hat{k}_x, \hat{k}_y, \hat{k}_z, \lambda} \tilde{\mathcal{L}}(\hat{k}, \lambda) = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{k}_x}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{k}_y}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{k}_z}, \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} \right) = (\sum_{i=1}^{N-1} (\pm x_i) + 2\lambda \hat{k}_x, \sum_{i=1}^{N-1} (\pm y_i) + 2\lambda \hat{k}_y, \sum_{i=1}^{N-1} (\pm z_i) + 2\lambda \hat{k}_z, \hat{k}_x + \hat{k}_y + \hat{k}_z - 1) \quad (20)$$

اگر  $s_i^T k - \hat{c}\hat{t}_i > 0$  باشد در  $\pm x_i, \pm y_i, \pm z_i$  عملگر مثبت و در غیر آن عملگر منفی انتخاب می‌شود که قبل از تعیین این عملگر باید جهت ارایه شود. از آن جاکه جهت واقعی قابل دستیابی نیست از جهت تخمینی به عنوان جهت واقعی استفاده می‌شود. روش ساده استفاده از برآورد جهت با کمینه مربعات خطی، تقریبی از جهت واقعی است. سپس تابع لاگرانژ توسط رابطه (۲۱) در سه بعد با صفر تنظیم می‌شود. محدودیت اصلی در  $\hat{k}_x + \hat{k}_y + \hat{k}_z = 1$  از رابطه (۲۱) است که با جایگزینی سه معادله فرعی در آن، رابطه (۲۲) و  $\hat{\lambda}_1$  و  $\hat{\lambda}_2$  از رابطه (۲۳) حاصل می‌شود. برای دستیابی به  $\hat{k}_x, \hat{k}_y, \hat{k}_z$  از رابطه (۲۱) لازم است که  $\hat{\lambda}$  صفر نباشد. اگر  $\hat{\lambda} = 0$  در  $\tilde{\mathcal{L}}(\hat{k}, \lambda) = 0$  باشد کمینه مربعات مقید به کمینه مربعات خطی خطا تحلیل می‌رود.

$$\tilde{\mathcal{L}}(\hat{k}, \lambda) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^{N-1} (\pm x_i) + 2\lambda \hat{k}_x = 0 \\ \sum_{i=1}^{N-1} (\pm y_i) + 2\lambda \hat{k}_y = 0 \\ \sum_{i=1}^{N-1} (\pm z_i) + 2\lambda \hat{k}_z = 0 \\ \hat{k}_x + \hat{k}_y + \hat{k}_z = 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$|\hat{\lambda}| = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{N-1} \pm x_i)^2 + (\sum_{i=1}^{N-1} \pm y_i)^2 + (\sum_{i=1}^{N-1} \pm z_i)^2}}{2} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \hat{\lambda}_1 = |\hat{\lambda}| \\ \hat{\lambda}_2 = -|\hat{\lambda}| \end{cases} \quad (23)$$

ایده اصلی روش ضرب لاگرانژی<sup>۵۲</sup> کمینه‌سازی  $l_1$ -norm تابع هزینه است که راه‌حل ساده به صورت شکل بسته را ارایه می‌دهد. جایگزینی  $\hat{\lambda}_1$  و  $\hat{\lambda}_2$  در  $\hat{\lambda}$  در رابطه (۱۸) به طور طبیعی منجر به دو برآورد جهت می‌شود که برای برآورد قیود رابطه (۱۳) آزمایش می‌شوند. بهترین برآورد منطبق بر محدودیت به عنوان برآورد جهت انتخاب شده است. پس از به روزرسانی تخمین جهت می‌توانیم در انتخاب عملگر مثبت یا منفی در رابطه (۲۰) تجدید نظر کنیم. سپس  $\hat{\lambda}_1$  و  $\hat{\lambda}_2$  دوباره محاسبه و تخمین جهت مربوطه با درجه کوچکتر نقض محدودیت به عنوان بردار جهت‌نهایی در نظر گرفته شود. در نهایت زاویه سمت در روش کمینه مربعات خطی مقید با رابطه (۱۰) و زاویه ارتفاع با رابطه (۱۱) برحسب رادیان تعریف می‌شوند.

### ۳-۳ روش چان

روش چان به دلیل امکان بهره‌برداری از محاسبات تأخیرهای اضافی و حل دقیق، روش مناسب حل معادلات غیرخطی هذلولی در تفاوت زمان ورود است. این روش، تخمینی از تخمین گر بیشینه درست نمایی می‌باشد [۱۵]. در این روش ماتریس خطای مختصات سه‌بعدی به صورت رابطه (۲۴) تعریف می‌شود.

$$\Psi = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a, \mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - p_2 + p_1 \\ r_{31}^2 - p_3 + p_1 \\ \vdots \\ r_{M1}^2 - p_M + p_1 \end{bmatrix}, \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ z_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - x_1 \\ y_i - y_1 \\ z_i - z_1 \end{bmatrix}, \mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \\ (i = 2, \dots, M) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & z_{21} & r_{21} \\ x_{31} & y_{31} & z_{31} & r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & y_{M1} & z_{M1} & r_{M1} \end{bmatrix}, \mathbf{z}_a = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ R_1 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{z}_a$  موقعیت تخمینی اولیه منبع صوت در سه بعد  $[x_s, y_s, z_s]$  به همراه عنصر فاصله حسگر مبنا از منبع صوت  $R_1$  است که به طور مسلم تخمین آن حاوی خطاست.  $R_1$  به دقت تخمین مکان الگوریتم در مرحله دوم کمک می‌کند.

روش کمینه مربعات وزنی دو مرحله‌ای روش ساده حل جبری است که معادلات غیرخطی هذلولی حاصل از تفاوت زمان ورود بین حسگرها را به مجموعه‌ای از معادلات خطی تبدیل می‌کند. این روش از مشکل ابهام علامت رنج می‌برد که ناشی از ریشه دوم در مرحله دوم روش کمینه مربعات وزنی است. گرچه علامت راه‌حل نهایی می‌تواند به‌طور تقریبی با توجه به علامت تخمینی موقعیت به‌دست‌آمده در اولین گام روش کمینه مربعات وزنی تعیین شود، اما تخمین موقعیت در اولین گام روش کمینه مربعات وزنی به‌اندازه کافی دقیق نیست. براساس این واقعیات، روش بهبودیافته کمینه‌مربعات وزنی دو مرحله‌ای در مرحله اول از کمینه‌سازی روش کمینه‌مربعات وزنی پیروی می‌کند ولی در مرحله دوم با وجود محدودیت بین عنصر اضافی و مکان منبع، روش متفاوتی دارد [۲۲]. با توجه به رابطه (۳۱) که مختصات منبع در سه‌بعد را به‌همراه عنصر اضافی نمایش می‌دهد، ماتریس خطا با رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.  $d_1$  فاصله حسگر مبنا از منبع صوت و به‌عنوان عنصر اضافی جهت تخمین دقیق‌تر مختصات نهایی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از رابطه (۳۳) مختصات تخمینی اولیه بدست می‌آید. ماتریس وزنی  $W_1$  در رابطه (۳۴) آمده که در آن مقدار حاصل  $\hat{\theta}_1$  حاوی خطا است. خطای محاسبه رابطه (۳۳) با رابطه (۳۵) در سه‌بعد بیان می‌شود.

$$\theta_1 = [x, y, z, d_1]^T \quad (31)$$

$$\varepsilon_1 = h_1 - G_1 \theta_1, \quad G_1 = 2 \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) & (z_2 - z_1) & r_{21} \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) & (z_3 - z_1) & r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_M - x_1) & (y_M - y_1) & (z_M - z_1) & r_{M1} \end{bmatrix}, \quad h_1 = - \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - p - r_{21}^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - p - r_{31}^2 \\ \vdots \\ x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 - p - r_{M1}^2 \end{bmatrix},$$

$$p = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \quad (32)$$

$$\hat{\theta}_1 = (G_1^T W_1 G_1)^{-1} G_1^T W_1 h_1 \quad (33)$$

$$W_1 = [B_1 Q B_1^T]^{-1}, B_1 = \text{diag}(2r_{i1}), Q = \frac{1}{2}(I_{M-1} + 1_{M-1}) \quad (34)$$

$$\varepsilon_2 = h_2 - G_2 \theta_2, \quad G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{p} + p - \hat{d}_1^2 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -2\hat{x} & -2\hat{y} & -2\hat{z} & 2\hat{d}_1 \end{bmatrix}, \quad p = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2, \hat{p} = \hat{x}^2 + \hat{y}^2 + \hat{z}^2 \quad (35)$$

با استفاده از رابطه (۳۶) مختصات تخمینی نهایی منبع صوت در سه‌بعد  $[\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s]$  به‌دست می‌آید.  $\hat{x}$ ،  $\hat{y}$  و  $\hat{z}$  به‌ترتیب عناصر اول تا سوم مختصات-تخمینی اولیه رابطه (۳۳) و  $\hat{d}_1$  نیز جزء چهارم تخمینی رابطه (۳۳) در سه‌بعد است. ماتریس وزنی  $W_2$  با رابطه (۳۷) در دو مرحله به‌دست می‌آید. ابتدا ماتریس وزنی  $W_1$  تخمین زده می‌شود، سپس به‌واسطه آن ماتریس  $W_2$  برآورد می‌شود.  $B_2$  و  $r'_i$  در رابطه (۳۷) در مختصات سه‌بعدی تعریف شده‌اند. در نهایت برای تعیین جهت منبع صوت از رابطه (۳۰) به منظور تخمین زاویه سمت و ارتفاع در سه‌بعد استفاده می‌شود.

$$\hat{\theta}_2 = (G_2^T W_2 G_2)^{-1} G_2^T W_2 h_2 \quad (36)$$

تخمین میزان تفاوت فاصله حسگر  $i$  از حسگر مبنا است.  $x_{i1}$ ،  $y_{i1}$  و  $z_{i1}$  تفاضل مختصات حسگر  $i$  از حسگر مبنا به‌ترتیب در محور  $x$ ،  $y$  و  $z$  دستگاه مختصات است. مقدار  $z_a$  را می‌توان به صورت تقریبی از رابطه (۲۵) به‌دست آورد. مقدار  $F_a$  ماتریس وزنی است که رابطه (۲۶) نمایشگر آن است.  $B_a$  ماتریس قطری فاصله هر حسگر با حسگر مبنا است که با  $B_a = \text{diag}(r_{i1})$  نمایش داده می‌شود.  $Q$  را می‌توان به‌صورت رابطه (۲۶) تعریف کرد.

$$z_a \approx (G_a^T F_a^{-1} G_a)^{-1} G_a^T F_a^{-1} h \quad (25)$$

$$F_a = C^2 B_a Q B_a, Q = \frac{1}{2}(I_{M-1} + 1_{M-1}) \quad (26)$$

در رابطه (۲۵)،  $z_a$  حاوی خطایی به مقدار  $\Psi'$  است که هدف الگوریتم سعی در کاهش مقدار این خطاست. خطای محاسبه را می‌توان به صورت رابطه (۲۷) بیان کرد. مقدار  $z'_a$  (مختصات تخمینی نهایی) را می‌توان با رابطه (۲۸) محاسبه کرد.

$$\Psi' = h' - G'_a z'_a, \quad h' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - y_1)^2 \\ (z_{a,3} - z_1)^2 \\ (z_{a,4})^2 \end{bmatrix}, \quad G'_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad z'_a = \begin{bmatrix} (x_s - x_1)^2 \\ (y_s - y_1)^2 \\ (z_s - z_1)^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$z'_a = (G_a^T F_a^{-1} G_a)^{-1} G_a^T F_a^{-1} h' \quad (28)$$

ماتریس وزنی  $F'_a$  از رابطه (۲۹) در دو مرحله به‌دست می‌آید. ابتدا ماتریس وزنی  $F_b$  تخمین زده می‌شود، سپس به‌واسطه آن ماتریس  $F'_a$  برآورد می‌شود.  $\text{cov}$  کوارانانس ماتریس است.  $z_{a,4}$ ،  $z_{a,3}$ ،  $z_{a,2}$ ،  $z_{a,1}$  و  $z_{a,4}$  به‌ترتیب مؤلفه اول تا چهارم تخمینی  $z_a$  در رابطه (۲۷) هستند.  $\text{diag}$  ماتریس قطری است.

$$F'_a = B_b^{-T} \text{cov}(z_a)^{-1} B_b^{-1}, \text{cov}(z_a) = (G_a^T F_b G_a)^{-1}, \quad B_b = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (z_{a,2} - y_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (z_{a,3} - z_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r'_1 \end{bmatrix}, \quad F_b = B'_a{}^{-T} Q B'_a{}^{-1}, B'_a = \text{diag}(r'_i), \quad r'_1 = \sqrt{(z_{a,1} - x_1)^2 + (z_{a,2} - y_1)^2 + (z_{a,3} - z_1)^2}, \quad r'_i = \sqrt{(z_{a,1} - x_i)^2 + (z_{a,2} - y_i)^2 + (z_{a,3} - z_i)^2} \quad (29)$$

با توجه به رابطه (۲۸) موقعیت منبع محاسبه می‌شود؛ از هر سه مؤلفه  $z'_a$  جذر گرفته می‌شود، سپس در حالت سه‌بعدی جایگشت قرینه سه مؤلفه که هشت حالت است با مختصات حسگر مبنا  $[\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{z}_1]$  جمع و حاصل هر یک از هشت عبارت به‌دست آمده از  $z'_a$  کاسته می‌شود. در نهایت مقدار حاصل از مرحله قبل در ترانهاده‌اش ضرب می‌شود. مقدار کمینه آن برابر با مختصات تخمینی منبع صوت در سه‌بعد  $[\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s]$  است. در نهایت برای تعیین جهت منبع صوت از رابطه (۳۰) برای تخمین زاویه سمت و ارتفاع در سه‌بعد استفاده می‌شود. زوایای تخمینی بر حسب رادیان هستند. معکوس تانژانت در چهار ربع  $\Delta^T$  دایره مثلثاتی است.

$$\hat{\phi} = \tan^{-1}(\hat{y}_s / \hat{x}_s), \hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\hat{z}_s / \sqrt{\hat{x}_s^2 + \hat{y}_s^2}\right) \quad (30)$$

### ۳-۴ کمینه‌مربعات وزن دار دو مرحله‌ای بهبودیافته

$$\hat{\phi} = \tan^{-1}(\psi_1(2)/\psi_1(1)) \quad (43)$$

$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\psi_1(3)/\sqrt{\psi_1(1)^2 + \psi_1(2)^2}\right) \quad (44)$$

در مرحله دوم یعنی دومین کمینه‌سازی محدودیت را کاهش می‌دهد تا خطای راه‌حل مرحله اول برای تولید برآورد نهایی کاهش یابد. راه‌حل مرحله اول با رابطه (۴۵) بیان می‌شود جایی که  $\Delta\psi_1$  خطای تخمین مرحله اول است. ماتریس خطای مرحله دوم تخمین به صورت رابطه (۴۶) است.  $1_{N-1}$  ماتریس مربع یک با  $N-1$  سطر و ستون است.  $I_{N-1}$  ماتریس همانی با  $N-1$  سطر و ستون و  $N$  همان بعد دستگاه مختصات است. ماتریس وزنی  $W_2$  با رابطه (۴۷) بیان می‌شود. تخمینی نهایی  $\psi_2$  با استفاده از رابطه (۴۸) به دست می‌آید و زاویه سمت و ارتفاع در سه بعد با رابطه (۴۹) و رابطه (۵۰) تخمین زده می‌شود.

$$\psi_1 = \psi_1^0 + \Delta\psi_1 \quad (45)$$

$$h_2 - G_2\psi_2^0 = \epsilon_2$$

$$h_2 = \begin{bmatrix} \psi_1(1:N-1) \odot \psi_1(1:N-1) \\ \psi_1(N)^2 - 1 \\ \psi_1(N+1) \end{bmatrix},$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} I_{N-1} & 0_{N-1} \\ -1_{N-1}^T & 0 \\ 0_{N-1}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$W_2 = B_2^{-1}(G_1^T W_1 G_1) B_2^{-1}, B_2 = [2\psi_1(1:N)^T, 1]^T \quad (47)$$

$$\psi_2 = (G_2^T W_2 G_2)^{-1} G_2^T W_2 h_2 \quad (48)$$

$$\hat{\phi} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{sgn}(\psi_1(2))\sqrt{\psi_2(2)}}{\text{sgn}(\psi_1(1))\sqrt{\psi_2(1)}}\right) \quad (49)$$

$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{sgn}(\psi_1(3))\sqrt{1-\psi_2(1)-\psi_2(2)}}{\sqrt{\psi_2(1)+\psi_2(2)}}\right) \quad (50)$$

#### ۴- آزمایشات تجربی

در این بخش تنظیمات آزمایش‌ها و مشخصات مجموعه داده‌ها بیان می‌شود، سپس چگونگی داده‌برداری و ضبط علامت‌های صوتی و معماری حسگرها ارایه گردد و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها ارایه و تحلیل می‌گردد.

##### ۴-۱- تنظیمات آزمایشات

شبیه‌سازی با Windows 10، ماشین Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ، CPU @2.60GHz دارای حافظه ۱۲ گیگابایت و در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹ نسخه a انجام شده است. تجهیزات داده‌برداری ضبط همزمان علامت صوتی انتشاری از منبع صوت شامل میکروفن، کارت پردازشگر و دستگاه *Motu* است. صداهای دریافتی میکروفن‌ها، آنالوگ یا قیاسی هستند و برای پردازش علامت صوتی نیازمند تبدیل به علائم دیجیتال یا رقمی است؛ برای ضبط از آرایه میکروفنی و تبدیل دیجیتال علامت صوتی از دستگاه میکروفن آرایه‌ای چند کاناله با پیش تقویت‌کننده *Motu 24 I/O* و کارت پردازنده مربوطه جهت نمونه‌برداری و تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال استفاده شده است؛ وظیفه ضبط همزمان علامت‌های صوتی در همه میکروفن‌ها نیز برعهده این دستگاه است. میکروفن‌های مورد استفاده در آزمایشات همگی میکروفن خازنی همه جهته هستند که فرکانس نمونه‌برداری ۴۴۱۰۰ نمونه در ثانیه (Hz) و ۱۰۲۴ نمونه در هر بافر است.

$$W_2 = [E(\epsilon_2 \epsilon_2^T)]^{-1} = [B_2 \text{cov}(\theta) B_2^T]^{-1} \quad (37)$$

$$\text{cov}(\theta) = (G_1^T W_1 G_1)^{-1},$$

$$r'_i = \sqrt{(z_{a,1} - x_i)^2 + (z_{a,2} - y_i)^2 + (z_{a,3} - z_i)^2}$$

$$\epsilon_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -2\hat{x} & -2\hat{y} & -2\hat{z} & 2\hat{d}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta d_1 \end{bmatrix} = B_2 \epsilon_1$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -2\hat{x} & -2\hat{y} & 2\hat{d}_1 \end{bmatrix},$$

$$r'_i = \sqrt{(z_{a,1} - x_i)^2 + (z_{a,2} - y_i)^2}$$

#### ۳-۵ کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی

برآورد بهینه‌سازی کمینه مربعات وزنی تحت یک محدوده درجه دوم کاهش می‌یابد، جایی که محدودیت درجه دوم فقط مربوط به جهت ورود علامت است و به فاصله (برد) معکوس بستگی ندارد. یکی از بهینه‌سازی‌ها، رویکرد کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی است که در آن اولین کمینه‌سازی از محدودیت بهینه‌سازی چشم پوشی می‌کند و کمینه‌سازی دوم از رابطه محدودیت بین ناشناخته‌ها (زاویه‌ها و برد منبع صوت نسبت به حسگر مبنا) برای بهبود برآورد قبلی به جهت تولید راه حل نهایی بهره‌بردار می‌کند [۴،۸]. ماتریس خطای حاصل از تفاوت زمان ورودهای علامت منبع صوت بین هر کدام از حسگرها و حسگر مبنا با رابطه (۳۸) تعریف می‌شود.  $\epsilon_1$  بردار خطای حاصل از تخمین اولیه جهت منبع صوت نسبت به حسگر مبنا است.  $\psi_1^0$  بردار تخمینی در مرحله اول روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی است ( $\psi_1^0 = [\phi^0, \theta^0, \frac{1}{r^0}]$ ).  $\phi^0$  و  $\theta^0$  زاویه سمت و زاویه ارتفاع تخمینی و مؤلفه سوم  $\psi_1^0$  معکوس فاصله تخمینی حسگر مبنا از منبع است.  $\|s_i\|$  نرم اقلیدسی<sup>۵۴</sup> مختصات میکروفن  $i$  است.

$$h_1 - G_1 \psi_1^0 = \epsilon_1$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} s_2^T & \frac{1}{2}(r_{21}^2 - \|s_2\|^2) \\ s_3^T & \frac{1}{2}(r_{31}^2 - \|s_3\|^2) \\ \vdots & \vdots \\ s_M^T & \frac{1}{2}(r_{M1}^2 - \|s_M\|^2) \end{bmatrix}, h_1 = -r \quad (38)$$

در مرحله اول یعنی اولین کمینه‌سازی، محدودیت رابطه (۴۰) حذف و با فرض استقلال متغیرهای  $\psi_1$  رابطه (۳۹)، به‌سادگی با رابطه (۴۱) تعریف می‌شود.

$$\min_{\psi_1} (h_1 - G_1 \psi_1)^T W_1 (h_1 - G_1 \psi_1) \quad (39)$$

$$\psi_1^T \Sigma \psi_1 = 1, \Sigma = \text{diag}\{[1_N^T, 0]^T\} \quad (40)$$

$$\psi_1 = (G_1^T W_1 G_1)^{-1} G_1^T W_1 h_1, \quad (41)$$

$$W_1 = (B_1 Q B_1)^{-1},$$

$$B_1 = -\text{diag}(r_{i1}), Q = \frac{1}{2}(I_{M-1} + 1_{M-1})$$

با فرض به‌اندازه کافی کوچک بودن خطا در  $G_1$ ، ماتریس کوواریانس مرتبط به صورت رابطه (۴۲) قابل ارایه است. زاویه راستا و ارتفاع توسط تخمین اولیه  $\psi_1$ ، به ترتیب از رابطه (۴۳) و رابطه (۴۴) بدست می‌آید.

$$\text{cov}(\psi_1) \approx (G_1^T W_1 G_1)^{-1} \quad (42)$$



شکل ۴: معماری آرایه‌های میکروفونی مورد آزمایش در فضای باز

**داده‌های واقعی:** داده‌های واقعی، علامت‌های صوتی ضبط‌شده توسط تجهیزات داده‌برداری هستند. خطای تخمین مکان برای منبع ثابت در چهار موقعیت متفاوت ارزیابی می‌شود. موقعیت‌های مورد آزمایش در نقاط و فواصل مختلف در نظر گرفته شده‌اند. منبع صوت مورد آزمایش ثابت و از نوع ترقه است که موجب ایجاد علامت ضربه‌ای انفجاری می‌شود. فرض بر این است که محل انفجار یک نقطه در فضا است، اما می‌دانیم که در واقعیت محل انفجار فضای بیشتری از یک نقطه را دربرمی‌گیرد. سرعت صوت  $349.02$  متر برثانیه در دمای  $30$  درجه سانتی‌گراد است. جهت (زاویه) در راستای افق و عمود  $4$  موقعیت منبع ثابت (محل انفجار ترقه) مورد آزمایش در دستگاه مختصات بر حسب درجه نسبت به هر آرایه حسگری در جدول ۱ نمایش داده شده است. این زاویه از دانستن مختصات دکارتی منابع صوت حاصل شده است. در این آزمایش‌ها از دو آرایه با تعداد  $7$  و  $9$  حسگر میکروفن مشابه هم استفاده شده است. هر دو آرایه میکروفنی، در شکل ۴ نشان‌دهنده شده است. آرایه ۱ شامل  $9$  میکروفن و آرایه ۲ شامل  $2$  میکروفن هستند که چیدمان آرایه‌ها در فضای باز صورت گرفته است.

**داده‌های مصنوعی:** داده‌های مصنوعی برای ایجاد علامت‌ها شبیه به داده‌های واقعی ابتدا یکی از علامت‌های ضبط‌شده انتخاب و شبیه‌سازی را بر روی آن بسط داده شد. برای انجام این کار از رابطه (۶) استفاده می‌کنیم و با داشتن مختصات حسگرها و منبع صوت، در تک علامت ضربه‌ای صوت تأخیر ایجاد می‌کنیم؛ این عمل به تعداد حسگرهای هر آرایه انجام می‌شود. بعد از آن به واسطه روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نوفه‌ای گوسی با میانگین صفر به تأخیرهای هر یک از علامت‌های حسگرهای آرایه ۱ و آرایه ۲ اضافه می‌کنیم. مونت‌کارلو به ازای هر آزمایش  $100$  بار تکرار شده است. برای آزمایش میدان دور نیز از دو آرایه دیگر استفاده شده که نتایج برای آزمایش موقعیت ۵ و ۶ در جدول ۱ است. موقعیت‌های ۱ تا ۴ برای آزمایش میدان نزدیک هستند.

### ۳-۴ معماری حسگرها

آزمایش‌ها با دو چیدمان آرایه دارای  $7$  و  $9$  میکروفن مشابه انجام شده است که به صورت همزمان به دریافت و ضبط صدا می‌پردازند. چیدمان این آرایه‌ها براساس هندسه چینش مطلوب  $5^7$  آرایه‌های شکل ۵ صورت گرفته است. دایره‌های مشکی رنگ نماد میکروفن‌های آرایه ۱، لوزی‌ها نماد میکروفن‌های آرایه ۲ و ستاره‌های زرد رنگ نماد محل آزمایش منبع صوت هستند. هندسه چینش میکروفن‌ها در دو آرایه به صورت جدا از هم هستند که آرایه‌ها نسبت به میکروفن مرکزی خود با یکدیگر  $5.7$  سانتی‌متر در راستای افق ( $x=5.7m$ ) فاصله دارند. این دو آرایه را می‌توان دو آرایه توزیعی سنکرون و یا همزمان در نظر گرفت زیرا هر دو به یک دستگاه میکروفن آرایه‌ای جهت تبدیل آنالوگ به دیجیتال، نمونه‌برداری و سنکرون‌سازی متصل شده‌اند. ارتفاع میکروفن ۱ (حسگر مبنا) هر آرایه از سطح زمین  $34$  سانتی‌متر ( $Z=34cm$ ) و ارتفاع سایر میکروفن‌ها از سطح زمین  $20$  سانتی‌متر ( $Z=20cm$ ) است. مختصات چیدمان آرایه‌ها در جدول ۳ برحسب متر آرایه‌شده است.

### ۲-۴ مجموعه داده‌ها

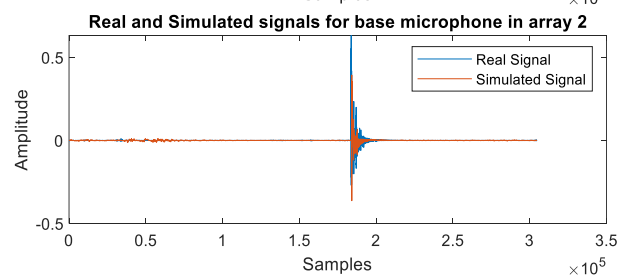
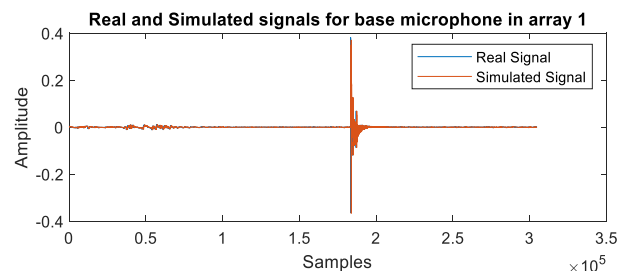
داده‌های مورد استفاده در مقاله، داده‌های صوتی ناشی از منبع صوتی پهن‌بند ضربه‌ای هستند. این داده‌ها در دو دسته‌ی داده‌های واقعی  $5^5$  و مصنوعی  $5^6$  مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های واقعی حاصل از ضبط علامت در محیط واقعی هستند. داده‌های مصنوعی جهت تأیید صحت عملکرد روش پیشنهادی براساس داده‌های واقعی ایجاد می‌شوند. محدودیت‌های موجود در آزمایش عملی را کاهش و اجازه بررسی گسترده‌تر با تغییر شرایط مسأله را می‌دهند. زوایای جدول ۱ از محاسبه زاویه سمت و ارتفاع واقعی مختصات منبع صوت موقعیت‌های ۱ تا ۶ جدول ۲ نسبت به حسگر مبنا هر آرایه به دست می‌آید. در این مقاله برای اطلاع از میزان خطا موقعیت دقیق منبع را از قبل می‌دانیم. در شکل ۳ نموداری از علامت‌های واقعی دریافت شده توسط میکروفن مبنا آرایه حسگری ۱ و ۲ و همچنین علامت‌های مصنوعی یا شبیه‌سازی شده برای میکروفن مبنا هر دو آرایه حسگری نمایش داده شده است.

جدول ۱: زوایای منابع صوت نسبت به حسگر مبنا هر آرایه حسگر (درجه)

موقعیت	آرایه ۱		آرایه ۲	
	سمت	ارتفاع	سمت	ارتفاع
۱	۹۰	۰	۱۴۹,۳۸۶۵	۰
۲	۳۰,۶۱۳۵	۰	۹۰	۰
۳	۴۹,۸۰۲۲	۰	۱۳۰,۱۹۷۸	۰
۴	۵۷,۶۳۵۵	۰	۱۲۲,۳۶۴۵	۰
۵	۴۴,۹۷۵۷	-۰,۲۹۲۰	۹۰	-۱,۹۴۷۳
۶	۷۴,۳۶۴۳	-۰,۱۹۳۱	۱۰۸,۴۳۴۹	-۰,۳۰۸۰

جدول ۲: مختصات منابع صوت (متر)

موقعیت	x	y	z
۱	۲	۵	۰
۲	۷,۰۷	۵	۰
۳	۴,۵۳۵	۵	۰
۴	۴,۵۳۵	۶	۰
۵	۵۰۰	۵۰۰	۰
۶	۳۰۰	۱۰۰۰	۰

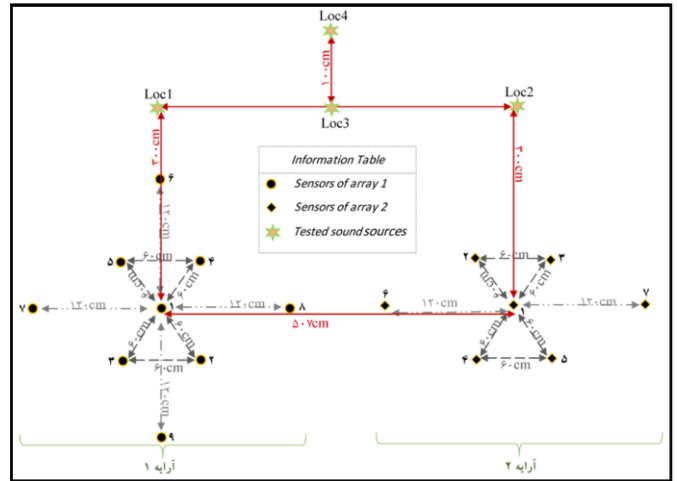


شکل ۳: علامت واقعی و مصنوعی صوت در میکروفن مبنا آرایه ۱ و ۲

تمامی نمودارها، خطاهای مطلق برحسب درجه است. مقادیر خطای مطلق زاویه- تخمینی سمت در داده‌های واقعی و میانگین خطای مطلق و انحراف معیار زاویه سمت در داده‌های مصنوعی نسبت به دو آرایه حسگری در شکل ۶ آمده است. همچنین مقادیر خطای مطلق زاویه تخمینی ارتفاع در داده‌های واقعی و میانگین خطای مطلق و انحراف معیار زاویه ارتفاع در داده‌های مصنوعی نسبت به دو آرایه حسگری در شکل ۷ آمده است. آزمایش‌های داده‌های مصنوعی در فضای سه‌بعدی به تفکیک انجام شده است. جدول و نمودارهای نتایج، حاصل میانگین و انحراف معیار در ۱۰۰ تکرار آزمایش مونت کارلو هستند.

جدول ۴: مختصات آرایه حسگر پراکنده ۷ و ۹ میکروفن فرضی (متر)

z	y	x	میکروفن ن	هندس ه آرایه
۰.۳۴	۴	۵۰۰	۱	آرایه ۱
۰.۳۵	۹۸۵	۴۷۹	۲	
۰.۱۸	۸۱۴	۴۷۱	۳	
۰.۱۰	۸۰۷	۵۲۳	۴	
۰.۱۲	۰.۳۵	۳۰۲	۵	
۰	۱۱۸۸	۲۲۲	۶	
۰.۱۷	۲۲۹	۸۷۱	۷	
۰	۴	۴		آرایه ۲
۰.۳۴	۲	۲	۱	
۰.۲	-۷۲۷	۳	۲	
۰.۲	-۷۲۷	۷	۳	
۰.۲	+۷۲۷	۳	۴	
۰.۲	+۷۲۷	۷	۵	
۰.۲	۳۲	۲	۶	
۲/۰	۲	۸	۷	
۰.۲	۲	۲	۸	
۰.۲	۰.۸	۲	۹	



شکل ۵: هندسه چیدمان مطلوب آرایه‌های میکروفنی

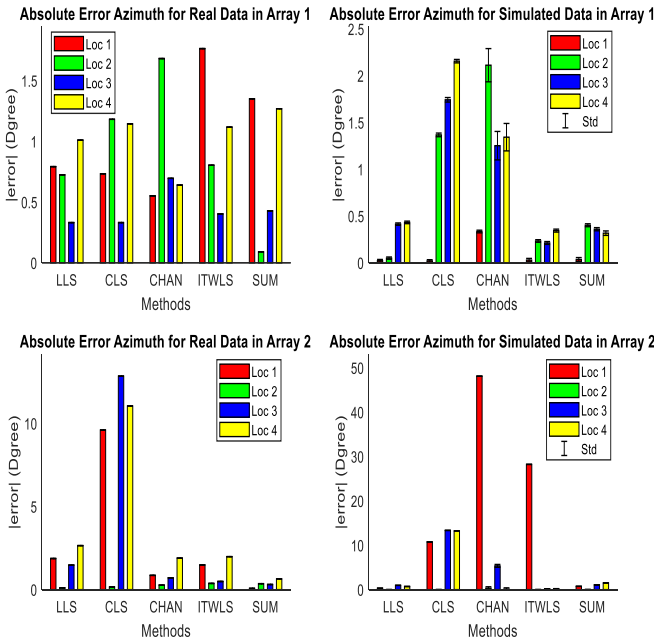
جدول ۳: مختصات آرایه حسگر ۷ و ۹ میکروفن (متر)

z	y	x	میکروفن ن	هندس ه آرایه
۰.۳۴	۲	۲	۱	آرایه ۱
۰.۲	-۷۲۷	۳	۲	
۰.۲	-۷۲۷	۷	۳	
۰.۲	+۷۲۷	۳	۴	
۰.۲	+۷۲۷	۷	۵	
۰.۲	۳۲	۲	۶	
۲/۰	۲	۸	۷	
۰.۲	۲	۲	۸	
۰.۲	۰.۸	۲	۹	

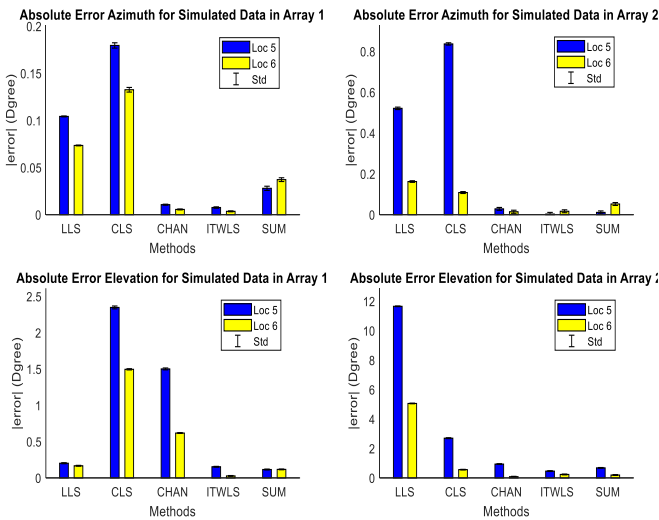
جدول ۴ مختصات آرایه برای کاربرد میدان دور را نشان می‌دهد. برای داده‌های مصنوعی آرایه‌های حسگر جدول ۳ برای چهار موقعیت اول جدول ۱ و ۲ و دو آرایه حسگر جدول ۴ جهت بررسی تأثیر پراکندگی حسگرها در آرایه‌ها و فاصله آن‌ها با یکدیگر برای موقعیت پنج و شش منبع صوت بیان شده است. موقعیت صوت مورد آزمایش برای داده‌های مصنوعی آرایه‌های حسگر از جدول ۴، موقعیت ۵ و ۶ در جدول ۱ و ۲ است. در روش پیشنهادی حسگر ۱ یا مینا در میدا مختصات قرار می‌گیرد و موقعیت مابقی حسگرها و منابع نسبت به آن به‌دست می‌آید.

#### ۴-۴ نتایج آزمایشات تجربی

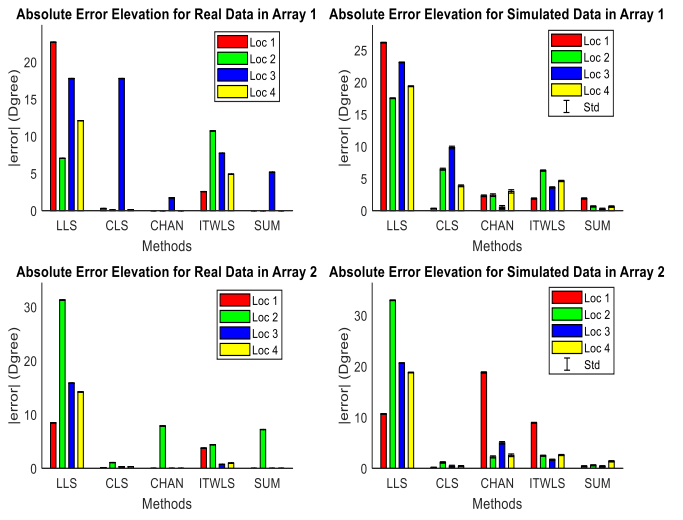
آزمایش‌ها روی داده‌های واقعی و مصنوعی در فضای سه‌بعدی انجام شده است. زاویا بین حسگر مبنای هر آرایه و منبع تخمین‌زده می‌شود. منبع صوت واقعی یک بار در هر موقعیت ضبط شده لذا دارای میانگین و انحراف معیار نیست. در



شکل ۶: خطای مطلق زاویه سمت در مجموعه داده‌های واقعی و مصنوعی (درجه)



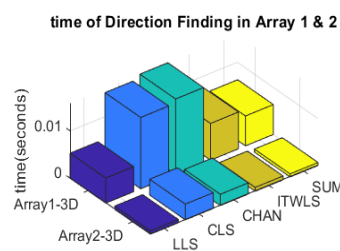
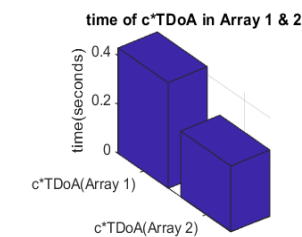
شکل ۹: میانگین خطای مطلق و انحراف معیار زاویه سمت و ارتفاع در مجموعه داده‌های مصنوعی - میدان دور (درجه)



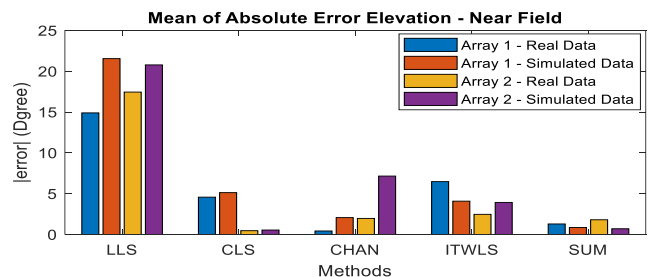
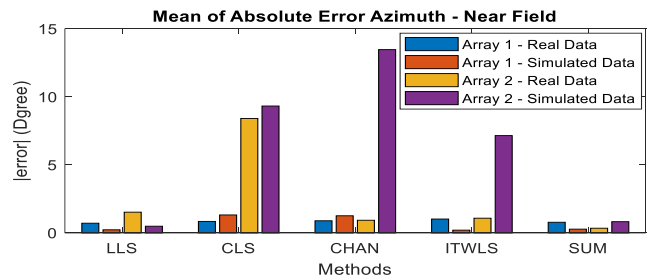
شکل ۷: خطای مطلق زاویه ارتفاع در مجموعه داده‌های واقعی و مصنوعی (درجه)

در شبیه‌سازی داده‌های مصنوعی توسط ایجاد خطا در تأخیر زمان دریافت هر یک از حسگرها، آزمایش روی شش موقعیت مختلف منبع انجام شده است. میزان خطای جهت‌یابی در فرآیند روش پیشنهادی کم است. چهار موقعیت مورد بررسی منبع جهت بررسی درستی عملکرد الگوریتم‌های مکان‌یابی است. موقعیت پنجم و ششم به جهت بررسی تأثیر فاصله منبع از آرایه‌های صوتی طرح شده است. میانگین خطای مطلق زوایای تخمینی سمت و ارتفاع در داده‌های واقعی و مصنوعی جهت حذف تأثیر موقعیت منبع در میدان نزدیک و میدان دور به ترتیب در شکل ۸ و ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین شکل ۹ نمایشگر میانگین خطای مطلق و انحراف معیار زاویه سمت و ارتفاع در مجموعه داده‌های مصنوعی موقعیت ۵ و ۶ منبع صوت در میدان دور است. در نهایت شکل ۱۱ مقایسه زمان اجرای روش‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در نهایت شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمایشگر مقایسه و بررسی اثر حضور و عدم حضور درون‌یابی اسپلاین مکعبی در داده‌های واقعی میدان نزدیک و داده‌های مصنوعی میدان دور است. در شکل ۱۲ میانگین هر چهار موقعیت آزمایشی منبع صوت محاسبه شده است و در شکل ۱۳ میانگین دو موقعیت ۵ و ۶ منبع صوت مربوط به منبع صوت در میدان دور مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۰: میانگین خطای مطلق زوایای تخمینی سمت و ارتفاع در داده‌های واقعی و مصنوعی جهت حذف تأثیر موقعیت منبع در میدان دور (درجه)



شکل ۱۱: مقایسه زمان اجرای روش‌های مورد مطالعه (ثانیه)



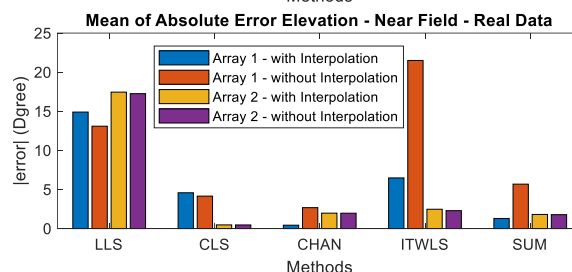
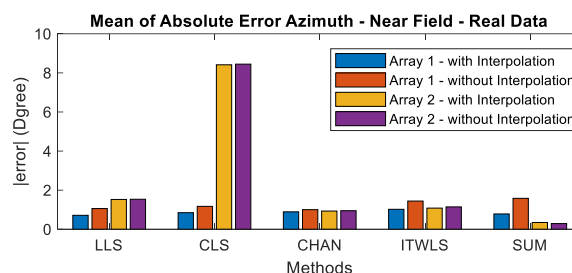
شکل ۸: میانگین خطای مطلق زوایای تخمینی سمت و ارتفاع در داده‌های واقعی و مصنوعی جهت حذف تأثیر موقعیت منبع در میدان نزدیک (درجه)

در شکل ۱۱ زمان اجرای روش‌های مورد مطالعه این موضوع را خاطر نشان می‌کند که بیشترین زمان اجرا مربوط به قسمت تخمین تفاوت زمان ورود است و هرچه تعداد میکروفن‌ها افزایش یابد بر زمان اجرای آن افزوده می‌شود گرچه در عمل افزایش تعداد حسگر بر میزان دقت تخمین می‌افزاید. علاوه بر این در قسمت تخمین جهت و حل معادلات هذلولی روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی از زمان اجرای کمی برخوردار است. آرایه ۱ دارای ۹ حسگر و آرایه ۲ دارای ۷ حسگر است به همین علت میزان زمان اجرای آرایه ۱ بیشتر از آرایه ۲ است. چنینش واقعی آرایه‌های حسگری در شکل ۴ نمایش داده شده که به دلیل فشردگی چنینش برای فواصل بسیار زیاد (میدان دور) مناسب نیست. چنینش آرایه حسگری جدول ۴ برای منابع صوتی میدان دور مناسب است. با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ می‌توان دریافت که درون‌یابی اسپلاین مکعبی که بیشترین اثر خود را بر بخش تخمین تفاوت زمان ورود اعمال می‌کند، بر کاهش میزان میانگین خطای مطلق در زاویه سمت و ارتفاع به‌ویژه در آرایه حسگری ۱ مؤثر است. در بعضی موارد زاویه سمت یا ارتفاع بدون درون‌یابی از خطای کمتری برخوردار است اما در مجموع، کاهش خطا در زاویه سمت و ارتفاع در کنار هم با وجود درون‌یابی مشخص است. اما گاهی اینطور نیست و این به دلیل عدم پیش‌پردازش و حذف نوفه است که حضور نوفه بر درون‌یابی تأثیر منفی گذاشته است. روش تخمین تفاوت زمان ورود، با استفاده از همبستگی متقابل با صافی طیف فاز از متداول‌ترین روش‌ها جهت تعیین موقعیت منابع صوتی است. از طرفی با درون‌یابی طیف همبستگی در حوزه زمان می‌توان به قله همبستگی جدید و کارآمدتری دست یافت.

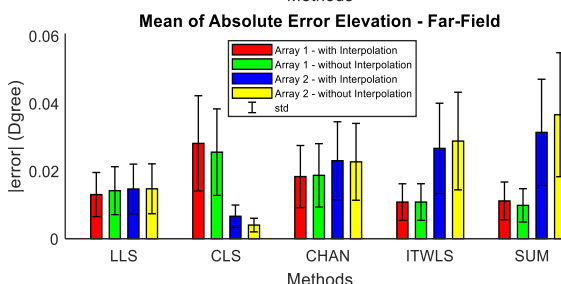
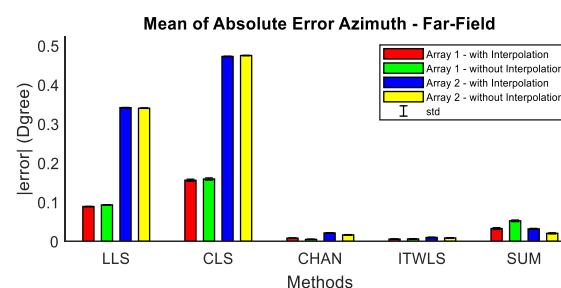
از طرفی قرار دادن حسگر مبنا در مبدأ مختصات بر سرعت اجرای الگوریتم می‌افزاید که در سایر مقالات، این مورد جهت کاهش پیچیدگی تخمین مشاهده نشد. عدم وجود صافی در ابتدای الگوریتم پیشنهادی باعث می‌شود درون‌یابی برای داده‌های اطراف قله همبستگی متقابل، به واسطه وجود نوفه، انتخاب قله جدید همبستگی را دچار مشکل کند و منجر به تخمین مختصات با خطای بیشتری نسبت به عدم وجود درون‌یابی شود. اما با این حال روش پیشنهادی بدون هیچ‌گونه پیش‌پردازش جهت حذف نوفه از میزان دقت تخمین مناسبی برخوردار است. زاویه سمت به طور معمول دارای خطای کمتری نسبت به زاویه ارتفاع است. به همین علت این روش‌ها در فضای دو بعدی بسیار مؤثرتر عمل می‌کنند و از دقت تخمین خوبی برخوردار خواهند بود.

## ۵- نتیجه‌گیری

جهت‌یابی از چالش‌های انتخاب روش فعال قابل‌ردیابی و غیرفعال، انتخاب مبدا مختصات، تحرک و ثبات منابع، دوری و نزدیکی منابع، ابعاد و ارتفاع منابع، معماری حسگرها، پیچیدگی محاسباتی، مختصات دوبعدی یا سه‌بعدی، دقت و سرعت جهت‌یابی، تغییرات وضعیت منابع، نوفه‌های طبیعی و مصنوعی، شرایط محیطی و دقت کم و سرعت کم منابع رنج می‌برد. روش مقیاس‌پذیر پیشنهادی دقیق، سریع و بدون پیش‌پردازش، مقاوم به نوفه طبیعی و انعکاس است که با افزایش تعداد حسگر آرایه، دقت آن افزایش می‌یابد و پراکندگی حسگرها به افزایش برد و عملکرد جهت‌یاب کمک می‌کند. این روش ضمن طرح معماری مناسب حسگرها، عدم حذف نوفه، بکارگیری صافی مناسب و درون‌یابی اسپلاین مکعبی جهت برخورداری از سرعت بالا با الگوریتم مهم دو مرحله‌ای تفاوت زمان ورود داری بهترین میزان دقت تخمین کمینه‌سازی است. نتایج میدان دور و نزدیک با داده‌های مختلف نشان‌دهنده تأثیر درون‌یابی همبستگی متقابل در خطای مطلق تفاوت زاویه تخمینی و موقعیت اصلی منبع است. میزان میانگین خطای مطلق زاویه سمت و ارتفاع روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی در



شکل ۱۲: میانگین خطای مطلق زاویه سمت و ارتفاع در مجموعه داده‌های واقعی جهت بررسی اثر درون‌یابی - میدان نزدیک (درجه)



شکل ۱۳: میانگین و انحراف معیار خطای مطلق زاویه سمت و ارتفاع در مجموعه داده‌های مصنوعی جهت بررسی اثر درون‌یابی - میدان دور (درجه)

## ۴-۵ تحلیل نتایج

از نمودار شکل‌های ۷ و ۸ مربوط به دستگاه مختصات سه‌بعدی و موقعیت ۱ تا ۴ منبع صوت (میدان نزدیک) به ترتیب با مقایسه زاویه سمت و ارتفاع تخمینی مشخص است که روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی مناسب‌ترین روش با کمترین واریانس و میانگین از میان روش‌های مورد مطالعه می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۸، روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی بدون توجه به موقعیت منبع نسبت به سایر روش‌ها در میدان نزدیک از کمترین میزان خطا برخوردار است. از طرفی با توجه به شکل ۹ و ۱۰ مربوط به داده‌های مصنوعی میدان دور روش حادقل مربعات وزن دار دو مرحله‌ای از میزان خطای کمتری برخوردار است اما با توجه به رویکرد مقیاس‌پذیری مسئله که هم در فواصل نزدیک منبع صوت به حسگرها باید پاسخگو باشد و هم در فواصل دور در نتیجه روش کمینه‌سازی بدون محدودیت متوالی مناسب‌ترین روش برای تعیین جهت منبع صوت است.

- [19] T. Yan and Y. Zhang, "TDOA Time Delay Estimation Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation," in International Conference on Computer Engineering and Networks, 2018, pp. 154-162: Springer.
- [20] X. Cui, K. Yu, and S. J. Lu, "Approximate closed-form TDOA-based estimator for acoustic direction finding via constrained optimization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 3360-3371, 2018.
- [21] B. Berdugo, M. A. Doron, J. Rosenhouse, and H. Azhari, "On direction finding of an emitting source from time delays," *the Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 6, pp. 3355-3363, 1999.
- [22] Q. Li, B. Chen, and M. J. Yang, "Improved Two-Step Constrained Total Least-Squares TDOA Localization Algorithm Based on the Alternating Direction Method of Multipliers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 22, pp. 13666-13673, 2020.
- [23] B. Jin, X. Xu, and T. Zhang, "Robust time-difference-of-arrival (TDOA) localization using weighted least squares with cone tangent plane constraint," *Sensors* 18, vol. 18, no. 3, p. 778, 2018.
- [24] T. Yan and Y. Zhang, "TDOA Time Delay Estimation Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation," in International Conference on Computer Engineering and Networks, pp. 154-162: Springer, 2018.
- [25] X. Cui, K. Yu, and S. Lu, "Approximate closed-form TDOA-based estimator for acoustic direction finding via constrained optimization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 3360-3371, 2018.
- [26] Z. Zhou, Y. Rui, X. Cai, R. Lan, and R. Cheng, "A Closed-Form Method of Acoustic Emission Source Location for Velocity-Free System Using Complete TDOA Measurements," *Sensors* 20, vol. 20, no. 12, p. 3553, 2020.
- [27] H. Chen, T. Ballal, N. Saeed, M. S. Alouini, and T. Al-Naffouri, "A Joint TDOA-PDOA Localization Approach Using Particle Swarm Optimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 1240-1244, 2020.
- [28] B. Berdugo, M. A. Doron, J. Rosenhouse, and H. Azhari, "On direction finding of an emitting source from time delays," *the Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 6, pp. 3355-3363, 1999.
- [29] Q. Li, B. Chen, and M. Yang, "Improved Two-Step Constrained Total Least-Squares TDOA Localization Algorithm Based on the Alternating Direction Method of Multipliers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 22, pp. 13666-13673, 2020.

**زهرا حیدری** کارشناسی مهندسی کامپیوتر سخت‌افزار

و کارشناسی ارشد معماری کامپیوتر خود را از دانشگاه

شاهد در زمینه سیگنال و صوت اخذ نموده و از محققان

مرکز تحقیقات آکوستیک دانشگاه شاهد است. تحقیقات

مورد علاقه نامبرده پردازش صوت، الگوریتم‌های موازی و بهینه‌سازی است.

آدرس پست الکترونیکی ایشان عبارت است از:

zahra.heydari@shahed.ac.ir



**امین‌اله مه‌آبادی** تحصیلات خود را در رشته مهندسی

برق سخت‌افزار و معماری کامپیوتر به انجام رسانده و

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

دانشگاه شاهد است. تحقیقات مورد علاقه نامبرده

پردازش داده‌های عظیم صوتی و تصویری، سیستم‌های بی‌درنگ نهفته،

پردازش موازی و ابزارهای هوشمند است. آدرس پست الکترونیکی ایشان



عبارت است از:

mahabadi@shahed.ac.ir

مجموعه داده‌های واقعی و مصنوعی و هر دو آرایه حسگر به در میدان نزدیک ترتیب ۰.۵۵۸۷ و ۱/۱۶۵۲ درجه در میدان دور ۰.۳۲۱ و ۰.۲۷۵۹ می‌باشد و از روش‌های قدیمی مناسب‌تر است. همچنین میانگین زمان اجرای آن در هر دو آرایه مورد بررسی با احتساب تخمین تفاوت زمان بی‌درنگ است. برای کارهای آینده با توجه به تاثیر شدید نتیجه تخمین تأخیر زمان بین هر جفت میکروفن در آرایه در تعیین موقعیت منبع سعی بر کاهش خطا در تخمین تأخیر زمان و تاثیر نوع پنجره‌بندی علامت و کاهش تخمین تأخیر زمان بین هر جفت میکروفن است. همچنین کار مهم بعدی بهبود دقت جهت‌یابی منابع صوتی میدان دور و هوایرد یعنی منابع صوتی دارای ارتفاع زیاد از سطح زمین خواهد بود.

## ۶- مراجع

- [1] A. D. Pierce, and A. Acoustics, "Introduction to its Physical Principles and Applications," Acoustical Society of America and American Institute of Physics, p. 122, 1981.
- [2] A. N. Popper, R. R. Fay, and A. N. Popper, Sound source localization. Springer, 2005.
- [3] T. Damarla, L. M. Kaplan, and G. T. Whipps, "Sniper localization using acoustic asynchronous sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 9, pp. 1469-1478, 2010.
- [4] X. Chang, C. Yang, J. Wu, X. Shi, and Z. Shi, "A surveillance system for drone localization and tracking using acoustic arrays," in 2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), pp. 573-577: IEEE, 2018.
- [5] Q. Yan, J. Chen, G. Ottoy, and L. De Strycker, "Robust AOA based acoustic source localization method with unreliable measurements," *Signal Processing*, vol. 152, pp. 13-21, 2018.
- [6] D. Gala, N. Lindsay, and L. Sun, "Three-dimensional sound source localization for unmanned ground vehicles with a self-rotational two-microphone array," in Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems and Robotics, Niagara Falls, ON, Canada, 2018, pp. 7-9.
- [7] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, 2017.
- [8] X. Chen, D. Wang, J. Yin, C. Jia, and Y. Wu, "Bias reduction for TDOA localization in the presence of receiver position errors and synchronization clock bias," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2019, no. 1, p. 7, 2019.
- [9] M. D. Gillette and H. F. Silverman, "A linear closed-form algorithm for source localization from time-differences of arrival," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 1-4, 2008.
- [10] H. C. So, Y. T. Chan, and F. K. W. Chan, "Closed-form formulae for time-difference-of-arrival estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2614-2620, 2008.
- [11] W. H. Foy, "Position-location solutions by Taylor-series estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 2, pp. 187-194, 1976.
- [12] H. T. FARD, M. Atashbar, Y. Norouzi, and F. H. KASHANI, "Multireference TDOA-based source localization," *Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, no. 21, pp. 1920-1929, 2013.
- [13] J. Smith, J. Abel, "Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 12, pp. 1661-1669, 1987.
- [14] S. S. Haykin, Adaptive filter theory. Pearson Education India, 2008.
- [15] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, 1994.
- [16] P. Wu, S. Su, Z. Zuo, X. Guo, B. Sun, and X. Wen, "Time difference of arrival (TDoA) localization combining weighted least squares and firefly algorithm," *Sensors*, vol. 19, no. 11, p. 2554, 2019.
- [17] A. J. Fenwick, "Algorithms for position fixing using pulse arrival times," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 146, no. 4, pp. 208-212, 1999.
- [18] B. Jin, X. Xu, and T. Zhang, "Robust time-difference-of-arrival (TDOA) localization using weighted least squares with cone tangent plane constraint," *Sensors*, vol. 18, no. 3, p. 778, 2018.

- 
- 30 Least-Squares (LS)
  - 31 Iterative
  - 32 Closed Form
  - 33 CHAN
  - 34 Linear Least Squares (LLS)
  - 35 Linear Weighted Least Squares (LWLS)
  - 36 Sampling
  - 37 Cubic Spline Interpolation (CSI)
  - 38 Constrained Least Squares (CLS)
  - 39 Improved Two-Step Weighted Least Square (ITWLS)
  - 40 Successive Unconstrained Minimization (SUM)
  - 41 Conjugate
  - 42 Inverse Fourier Fast Transform (IFFT)
  - 43 Base Sensor
  - 44 Azimuth
  - 45 Elevation
  - 46 Transpose
  - 47 Inverse
  - 48 Cost Function (CF)
  - 49 Quadratic Cost Function (QCF)
  - 50 Zero Yields (ZY)
  - 51 Singular
  - 52 Lagrange Multiplier (LM)
  - 53 Four-Quadrant Inverse Tangent (FQIT)
  - 54 Euclidean Norm
  - 55 Real Data
  - 56 Artificial Data
  - 57 Optimal
- 1 Acoustic
  - 2 Sound
  - 3 Sensor
  - 4 Cyber-Physical System (CPS)
  - 5 Internet of Things (IoT)
  - 6 Sniper
  - 7 Unmanned Aerial Vehicles (UAV)
  - 8 Smart Video Conference (SVC)
  - 9 Location Tracking
  - 10 Sound Direction Finding
  - 11 Sound Localization
  - 12 Real-time Tracking
  - 13 Complexity
  - 14 Noise
  - 15 Echo
  - 16 Active
  - 17 Passive
  - 18 Far-Filed
  - 19 Near-Filed
  - 20 Active
  - 21 Passive
  - 22 Narrowband
  - 23 Broadband
  - 24 Time Difference Of Arrival (TDOA)
  - 25 Time Delay Estimation (TDE)
  - 26 3D
  - 27 Scalable
  - 28 Computational Complexity
  - 29 Speed

## Speed Impulsive Sound Source Direction Finding Method based on TDOA

Zahra Heydari<sup>1,2</sup> Aminollah Mahabadi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Computer Engineering Department, Shahed University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Acoustic Research Center, Shahed University, Tehran, Iran

---

### Abstract

Real time positioning of sound sources suffers from computational complexity and low response time, which depends on the presence of noise, reflection and sensor layout architecture to increase the accuracy and speed of direction finding. Providing a scalable approach with low complexity, resistant to reflection and natural and artificial noise to increase the speed of decision making with appropriate architectural design is a new research topic in civilian and military applications. This paper proposes a fast scalable method of natural noise-resistant and reflective acoustic direction finding for three-dimensional estimation of direction finding using the signal time difference of arrival technique, which has a suitable sensor architecture and uses Phase Transform pre-filter along with cubic spline interpolation without pre-processing for noise removal uses a fast algorithm Successive Unconstrained Minimization. In real and artificial near field data experiments, the amount of Azimuth angle and Elevation error is 0.5587 and 1.1652 degrees, respectively, and in the far field is 0.0321 and 0.2759 degrees, respectively, and the real-time direction determination speed is 1.006 Seconds. The high accuracy is the estimated angle and the main position of the source.

**Keywords:** Acoustic, Sound, Impulsive Signal, Sound Source Direction Finding, Time Difference of Arrival (TDOA), Far-Field, Broadband.