



بررسی روش‌های موقعیت‌یابی منابع صوتی پهن‌بند مبتنی بر تفاوت زمان ورود

زهرا حیدری^{۱،۳}، امین‌اله مه‌آبادی^{۲،۳*}

*نویسنده مسئول، دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷، بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

^۱ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

^۳ محقق، مرکز تحقیقات آکوستیک، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

چکیده

جهت‌یابی و مکان‌یابی صوتی از خصیصه‌های مهم انسان و موجوداتی است که به واسطه قدرت و حساسیت حس شنوایی‌شان به این فرآیند پاسخ می‌دهند. جهت‌یابی و مکان‌یابی منابع صوتی توسط سامانه‌های حسگر از موضوعات تحقیقاتی پربار در حوزه پردازش علامت است. موقعیت‌یابی خودکار منابع صوتی با چالش‌های متعددی روبرو خواهد بود که دقت تخمین مختصات منبع و سرعت دقیق رسیدن به آن بسیار مهم و مساله سخت است. تفاوت زمان ورود علامت به علت برخورداری از پیچیدگی کم محاسباتی و سادگی روش برای داده‌های عظیم صوتی بسیار مورد توجه بوده و این مقاله با تمرکز بر مبانی رویکرد تفاوت زمان ورود، به بررسی روش‌ها و چالش‌های آن می‌پردازد. آخرین روش‌های علمی و مهم از جهت مبانی صوت، فنون موقعیت‌یابی، ساختار الگوریتم، روش‌های حل مساله، معماری حسگرهای صوتی و چالش‌های موجود آن‌ها مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: آکوستیک، مکان‌یابی صوتی، جهت‌یابی صوتی، تفاوت زمان ورود علامت، پهن‌بند.

۱- مقدمه

فشار هوا (یا سایر محیط‌های انتشار) ناشی از امواج صدا در محیط می‌پردازد. علم صوت در دانش‌های مختلف فیزیک، مهندسی، روان‌شناسی، گفتار، موسیقی، شنوایی‌شناسی، معماری، عصب‌شناسی گسترش یافته است [۴]. این علم در کاربردهای مهم نظامی، کشاورزی، زمین‌شناسی، موسیقایی، کنسرت‌ها و مانند آن در حال بازیابی نقش خود است. برای درک زمینه‌های مختلف کاربرد صدا باید از تابع تولید، انواع صداها، محیط انتشار، روش انتشار، اثرات محیطی و روش شنوایی در هر محیط متفاوت، ماهیت و ویژگی‌هایش مطلع شد [۵]. موقعیت‌یابی منبع صوت از ویژگی‌های مهم بشر در یافتن منبع صدا، توجه به جهت، و گوش‌دادن به صدای منبع صوت است. خودکارسازی فرآیندهای مختلف از شنیدن تا تفکیک و درک صدا، به دلیل محدودیت‌های بشر در شنوایی دقیق، سرعت کم یافتن منبع، صداها، مزاحم محیط، فقدان تشخیص هم‌زمان منابع و قدرت کم تفکیک صداها، مختلف مورد توجه است. هدف این مقاله بررسی فنون موقعیت‌یابی صوتی و عوامل مؤثر بر آن است که به‌طور ویژه به بیان فنون موقعیت‌یابی منابع صوتی پهن‌بند با تمرکز بر رویکرد مبتنی بر تفاوت زمان ورود و کارهای مرتبط آن با توجه به رشد داده‌های عظیم صوتی می‌پردازد.

با توسعه سامانه‌های بی‌درنگ نهفته^۱ به جهت استفاده در اینترنت اشیا^۲ و اینترنت اشیا پزشکی^۳ در قالب سامانه‌های بی‌درنگ سخت^۴، نرم^۵ و سخت^۶، صدا از مهم‌ترین عامل‌های ارتباطی اشیا، انسان‌ها و سایر موجودات خواهد بود. بشر هر چه پیش می‌رود نسبت به علم صدا، حس شنوایی خود، اخذ و درک صدا و اثرات مهم آن بر انسان و محیط توجه بیشتری پیدا می‌کند. تولید، انتشار و درک صدا با نوسان‌های مکانیکی ارتباط دارد [۱]. انسان می‌تواند با لمس حنجره خود در هنگام صحبت و یا آواز، انتشار صوت را درک کند. همچنین لرزش دستگاه‌های مولد نوبه^۷ را می‌تواند از طریق دست احساس کرد. انسان قادر به شنیدن تمامی نوسان‌ها نیست؛ مثلاً نفوذ صدا به دیوار تنها توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری ویژه قابل درک و اندازه‌گیری است [۲]. صدا از نوسان و لرزش منابع صوتی ایجاد می‌شود و از جمله امواج مکانیکی است که آرامش محیطی انتشار خود را برهم می‌زند [۳]. با تغییرات صوت در هوا، ذرات موجود هوا از حالت سکون خود خارج و جابجا می‌شود؛ این موضوع برای امواج در سایر گازها، مایعات و جامدات نیز صادق است [۲]. علم صوت^۸ به مطالعه تغییرات

۱-۱- شنوایی انسان

متوالی است. البته تعیین هویت منبع و کلاس آن بر این فرآیند می‌افزاید. جهت‌یابی منابع صوتی عبارت از تشخیص جهت دریافت صوت یعنی زاویه ورود آن به گوش انسان یا حسگرهای محیطی مانند میکروفن^{۲۵} نسبت به منبع تولید صدا است. مکان‌یابی صوتی فرآیند شناسایی جهت^{۲۶} و فاصله^{۲۷} منبع مولد صوت نسبت به حسگرها، در محیط بسته و یا محیط باز^{۲۸} است. یافتن جهت و محدوده منبع از اصول موقعیت‌یابی و ناوبری^{۲۹} محسوب می‌شود. موقعیت‌یابی منابع صوتی به دو نوع فعال^{۳۰} یعنی ارسال علامت از موقعیت‌یاب و غیرفعال^{۳۱} یا ردیابی خاموش تقسیم می‌شود. در مکان‌یابی انسانی تشخیص و موقعیت‌یابی از وظایف مهم مغز انسان است و مغز از طریق یاخته‌های عصبی^{۳۲} عمل موقعیت‌یابی صوتی را انجام می‌دهد. علامت‌های صوتی دنیای خارج از طریق گوش وارد مغز و پردازش می‌شود تا موقعیت منابع تعیین شود [۱۰].

رویکرد الگوریتم‌های انتخابی، حجم داده‌های دریافتی، میزان و قدرت صداهای اصلی، میزان و قدرت صداهای مزاحم، وجود نوفه‌های طبیعی و مصنوعی، قدرت پردازش داده‌ها، میزان تداخل صوتی، نوع و تعداد پردازشگرها، تعداد و معماری حسگرهای شنوایی، ساختار کنشگرهای گمراه‌کننده محیطی و هوشمندی عامل‌های فیزیکی و سایبری از عوامل تعیین‌کننده در موفقیت مؤثر شنوایی ماشینی محسوب می‌شود. افزایش قدرت و دقت ماشین‌های شنوایی خودکار، نگرانی‌های مربوط به حفظ حریم خصوصی در شنود صدا و استفاده نادرست از اموج تولیدی و آسیب‌های زیست محیطی در قالب سلاح‌های بیولوژیکی را افزایش می‌دهد [۱۱].

تشخیص محل تک‌تیرانداز^{۳۳} [۱۲]، ردیابی هواپیماهای کوچک بدون سرنشین^{۳۴} [۱۳]، کنفرانس ویدیویی هوشمند [۱۴] و حرکت ربات در محیط ناشناخته [۱۵، ۱۶] از کاربردهای موقعیت‌یابی صوتی هستند. افزایش منابع صوتی نیازمند معماری حسگرهای شنوایی ماشین برای جهت‌یابی و مکان‌یابی دقیق منابع مولد است. موقعیت‌یابی منابع نیازمند پردازش سریع و صحیح صداهای دریافتی است و در صورت وجود نوفه، صداهای محیطی مزاحم^{۳۵}، محیط‌های متفاوت انتشار و ادراک دوبعدی یا سه‌بعدی صداهای محیطی بر پیچیدگی آن می‌افزاید.

۱-۴- معماری شنوایی

جهت‌یابی و مکان‌یابی منابع صوتی توسط سامانه‌های حسگر^{۳۶} از موضوعات تحقیقاتی پرسابقه در حوزه پردازش علامت است [۱۰]. گوش انسان با شنیدن هر صدایی به‌طور غریزی برای تعیین جهت و موقعیت منبع به‌سمت آن معطوف می‌شود. صداهای ایجاد شده توسط منابع صوتی باید به‌کمک حسگرهای صوتی درست و سریع ثبت شوند. اگر این حسگرها در قالب معماری آرایه‌ای شکل گیرند، داده‌های دریافتی آن‌ها برای تخمین بهتر زوایای ورود علامت‌های هدف و موقعیت آن‌ها مورد پردازش قرار می‌گیرد. وجود نوفه‌های طبیعی^{۳۷} موجود در صدا و نوفه‌های مصنوعی^{۳۸} ناشی از عملیات پردازش ماشینی در کنار همبستگی نوفه‌ها، در دریافت صحیح و کیفیت درک حسگرها اختلال بسیاری ایجاد می‌کند.

۱-۵- چالش‌های موقعیت‌یابی

موقعیت‌یابی خودکار با چالش‌های متعددی روبرو است که دقت تخمین مختصات منبع و سرعت دقیق تشخیص آن را مشکل می‌کند. از جمله مهم‌ترین چالش‌های موقعیت‌یابی نوفه، انعکاس، منابع متحرک و تنوع حسگر است. به صداهای ناخواسته یا آزاردهنده که بر علامت اصلی صوت اثر منفی بگذارد، نوفه گفته می‌شود. نوفه‌ها یا طبیعی هستند و یا مصنوعی که ناشی از عمل پردازش می‌باشند. نوفه سفید علامتی است که توان آن به‌طور یکنواخت در همه بسامدها توزیع شده و نوفه رنگی برخلاف نوفه سفید توان‌های متفاوتی در بسامدهای متفاوت دارد. نوفه‌رنگی بر علامت انتشاری از منبع صوت تأثیر می‌گذارد اما در بسیاری از مراجع نوفه سفید به‌عنوان صدای ناخواسته در نظر گرفته می‌شود. انعکاس در واقع بازتاب‌های علامت منبع است که با تأخیرهای متفاوت و تضعیف‌شده دریافت می‌گردند.

از میان پنج حس انسان، شنوایی از حس‌های برجسته جهت برقراری ارتباط اجتماعی انسان‌ها است. در تضاد با حس بینایی که متکی بر روشنایی محیط است، ادراک ما از صدا تقریباً در تمام جهات و بدون وابستگی به شرایط صورت می‌گیرد. انسان فقط در صورت وجود روشنایی می‌تواند اجسام را ببیند ولی بدون اطلاعات بصری از منبع صدا، توانایی پردازش صداهای دور و نزدیک در آستانه شنوایی^{۳۹} را دارد [۶]. انسان قابلیت‌هایی دارد که محدود به مکان‌یابی^{۴۰} از طریق صدا نمی‌شود بلکه می‌تواند به‌واسطه شنوایی، ویژگی‌های صوت را استخراج و اصوات مختلف را تفکیک کند. برای مثال در میان گروهی از افرادی که هم‌زمان مشغول صحبت هستند، شخصی را انتخاب و فقط به صحبت‌های آن فرد متمرکز شود. ویژگی‌های مکان‌یابی، استخراج، شناخت و تفسیر صوت بشر را قادر می‌سازد تا در محیط‌های ساکن به صورت پویا عمل کند [۶]. تعدادی از حیوانات در حس شنوایی از انسان برتر هستند. برای استفاده‌ی حداکثر از صدای شکارچی، حسگر صدا (گوش حیوان) باید وجود شکارچی و موقعیت آن را تشخیص دهد تا حیوان بتواند به موقع پیش‌بینی و اقدام به فرار کند [۷]. انسان می‌تواند محیط پیرامون خود را ارزیابی و پس از آن نوع برخورد خود را تعریف، تعیین و مشخص کند. در این فرآیند وجود نوفه و صداهای محیطی مزاحم از توانایی‌های فوق‌العاده در دریافت صحیح و پردازش درست می‌کاهد و پاسخ سریع، صحیح و به‌موقع را از بین می‌برد. رشد حجم زیاد داده‌های صوتی و تنوع آن می‌تواند بر قدرت تشخیص انسان اثرگذار باشد.

۱-۲- داده‌های عظیم صوتی

گوش انسان قابلیت مکان‌یابی و جهت‌یابی دقیق یک منبع را ندارد و در مورد چند منبع صوت هم‌زمان این امکان بسیار کاهش می‌یابد و لذا بشر به‌سمت شنوایی ماشینی روی آورده است. شنوایی ماشین^{۴۱} امکان دریافت هم‌زمان، تفکیک سریع، پردازش موزایی، ادراک بهتر و تصمیم‌گیری مؤثرتر را فراهم می‌کند. جوامع امروزی به دلیل وجود داده‌های عظیم صوتی به شدت متکی به ماشین‌های مختلف است و مسیر فناوری آینده در جهت تولید سامانه‌های خودکار پیش می‌رود [۱].

اکنون برای کلان داده‌ها به فرم صوت از چالش حجم داده‌ها به عنوان بعد اصلی استفاده می‌شود. تعریف مناسبی برای داده‌های عظیم صوتی^{۴۲} مخصوصاً در موقعیت‌یابی صوتی ارائه نشده و هنوز مسأله حجم داده‌ها مطرح است [۸]. رشد داده‌های صوتی در تنوع، حجم و شتاب تولید از سرعت رشد بسیار خطرناکی برخوردار است. برای داده‌های عظیم صوتی در ساختار پیچیده موقعیت‌یابی، می‌توان ابعاد حجم^{۴۳}، ارزش^{۴۴}، پیچیدگی^{۴۵} و محیط انتشار^{۴۶} علامت را تعریف کرد. حجم به‌میزان داده‌های صوتی در مقیاس بزرگ^{۴۷} اشاره دارد که مرتبط با تکنولوژی صدابرداری حسگرها، خطوط انتقال داده صوتی، روش فشرده‌سازی، قدرت ذخیره، نوع بازایی و رسانه ذخیره‌سازی است. ارزش، بر میزان ارزش‌گذاری هزینه پردازش از نظر نوع، میزان و اهمیت منابع تخصیصی مانند تعداد حسگرها، توان مصرفی و زمان استخراج تمرکز می‌کند. پیچیدگی به‌میزان شلوغی یا شفافیت صوت، میزان داده‌های صوتی غیرفعال^{۴۸} در ترکیب با صداهای مزاحم محیطی^{۴۹} و نوفه‌های طبیعی^{۵۰} و مصنوعی^{۵۱} اشاره دارد که در سرعت تفکیک و کارایی پردازش آن مؤثر است. محیط انتشار در ادراک صدا، تعیین موقعیت منبع، جهت‌یابی دقیق صوتی و ردیابی صحیح علامت تولیدی نقش اساسی دارد. با تولید و گسترش داده‌های عظیم صوتی، بشر جهت دریافت درست، پردازش سریع، ادراک بهتر، استفاده بیشتر و درک مؤثرتر از صداهای طبیعی و مصنوعی اجتماع خود، در جهت تعیین موقعیت و مکان منابع صوتی دست به تولید ماشین‌های شنوا در قالب سامانه‌های بی‌درنگ نهفته جهت ادراک بهتر زده است [۹].

۱-۳- موقعیت‌یابی خودکار

موقعیت‌یابی صوتی مخصوصاً تخمین موقعیت وقایع گذرا^{۵۲}، فرآیند ترکیبی از تعیین واضح جهت و مکان منبع^{۵۳} تولید صدا، جهت ادراک بهتر مقصد^{۵۴} در زمان‌های

در ادامه مقاله، در بخش ۲ مبانی موقعیت‌یابی و در بخش ۳ فنون موقعیت‌یابی شرح داده می‌شود. بخش ۴ به بیان و مقایسه روش‌های مبتنی بر تفاوت زمان ورود علامت می‌پردازد. در بخش ۵، موانع و محدودیت‌های موقعیت‌یابی و کارهای تحقیقاتی باز آینده مطرح می‌شود و در نهایت بخش ۶ به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- مبانی موقعیت‌یابی

در این بخش مبانی و اصول موقعیت‌یابی صوتی، کاربردهای موقعیت‌یابی، باند منابع صوتی و آرایه‌های حسگری بررسی می‌شوند.

۲-۱- موقعیت‌یابی صوتی

در صورت وقوع پدیده‌هایی مانند انفجار، صحبت سخنران و مانند آن علامت‌های صوتی تولید و به صورت دایره‌وار از منبع منتشر می‌شوند. در جهت‌یابی و مکان‌یابی از علامت صوت دریافتی به منظور تعیین محل دقیق منابع استفاده و به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. در روش فعال برخلاف روش غیرفعال علامتی از سمت سامانه به سوی منبع یا هدف ارسال می‌شود و علامت دریافتی اطلاعات مکان هدف را می‌توان با استفاده از آن‌ها یافت [۲۱]. روش‌های غیرفعال نیز به دو دسته تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تقسیم می‌شوند. در روش‌های تک مرحله‌ای تخمین مکان منبع علامت صوت در یک مرحله و با استفاده از پردازش قبلی انجام می‌گیرد. این کار در روش‌های دو مرحله‌ای با استفاده از محاسبه اختلاف بین دو علامت و سپس بهره از این نتایج جهت محاسبه مکان منبع انجام می‌شود.

حسگرهای صوتی پس از دریافت علامت صوت که به واسطه تبدیل کمیت تغییرات فشار هوا به علامت صوت قیاسی^{۴۱} صورت می‌گیرد، به وسیله مبدل قیاسی به رقمی^{۴۲}، علامت در زمان و دامنه گسسته می‌شود. در نهایت با توجه به روش جهت‌یابی و مکان‌یابی علامت‌های دریافتی، پردازش علامت صورت می‌گیرد. اگر مسأله جهت‌یابی باشد خروجی سامانه، زاویه سمت^{۴۳}، زاویه ارتفاع^{۴۴} در سه بعد، و زاویه سمت در دو بعد خواهد بود. اگر مکان‌یابی باشد خروجی علاوه بر زاویه سمت و ارتفاع در سه بعد و زاویه سمت در دو بعد دارای میزان فاصله منبع نسبت به حسگرها نیز است، لذا خروجی مختصات دکارتی سه‌بعدی یا دوبعدی خواهد بود. تخمین موقعیت منبع علامت مسأله مهم در حوزه پردازش علامت آرایه‌ای است که بسیاری از آن‌ها برای کار با علامت‌های باریک‌بند پیشنهاد شده‌اند. در کاربردهای عملی تحقیقات زیادی در علامت پهن‌بند وجود دارد. تخمین موقعیت منابع علامت پهن‌بند به یک موضوع تحقیقاتی داغ در سراسر جهان تبدیل شده‌اند [۲۲].

از دلایل استفاده از موقعیت‌یابی صوتی در مقابل رادار آن است که صوت در هر راستا منتشر می‌شود؛ تاریکی و محدودیت بصری بر روی آن اثر ندارد، به طوری که علامت‌های صوتی برای موقعیت‌یابی منابع صوتی در محیط‌هایی با دید کم (شرایط تاریک، مه‌آلود یا گرد و غبار) قابل اطمینان هستند [۱۱]؛ سامانه مکان‌یاب صوتی انرژی کمی مصرف می‌کند؛ با علامت‌های مغناطیسی تداخلی ندارد؛ اغلب به صورت غیرفعال کار می‌کند لذا به سادگی قابل کشف نیست [۱۹]. همچنین در فضای باز، سامانه موقعیت‌یابی جهانی^{۴۵} عملکرد خوبی دارد و مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال در محیط‌های بسته به خوبی کار نمی‌کند زیرا بسیاری از موانع و خط دید تضمین نمی‌شود لذا می‌توان از روش‌های مکان‌یابی مبتنی بر علامت انتشاری از منبع جهت موقعیت‌یابی استفاده می‌شود [۲۳].

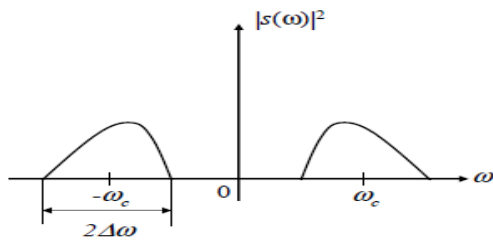
انسان دارای پردازنده علامت چندوظیفگی چندگانه است که می‌تواند صدا را متوجه شود، ولی نسبت به سامانه‌های ماشینی مبتنی بر صوت از دقت کمتری برخوردار است. علامت منابع صوتی را می‌توان به دو دسته گذرا^{۴۶} و پیوسته^{۴۷} طبقه‌بندی کرد. اتفاقات موقتی ناشی از انفجارها یا وقایعی مانند به هم کوبیده شدن درب و مانند آن منابع گذرا هستند و منابع پیوسته همان صدای وسایل نقلیه زمینی یا هواورد و حتی گفتار هستند [۳]. صدا از لحاظ بسامد به سه دسته صوت، فروصوت^{۴۸} و فراصوت^{۴۹} برحسب هرترز (یک دوره در ثانیه) تقسیم می‌شود. طیف

علامت صوت به طور معمول بدون انعکاس در محیط آزاد فقط از مسیر مستقیم توسط آرایه حسگر دریافت می‌شود که علامت صوت در طول مسیر فقط دچار تضعیف می‌شود. هنگامی که علامت در فضای بسته پخش شود از چند مسیر به حسگرها می‌رسد [۱۷]. شباهت علامت نوفه و علامت منبع صوت نسبت به هم را همبستگی می‌گویند. در این صورت فرآیند رسیدن به جهت یا مکان منبع پیچیده‌تر و عملکرد جداسازی این دو علامت از هم ساده نخواهد بود. منبع صوت می‌تواند ساکن و یا متحرک باشد. در منابع متحرک فرآیند موقعیت‌یابی بسیار پیچیده و نیازمند سرعت و دقت زیاد در دریافت و پردازش جهت ردیابی مناسب منابع است. علاوه بر منبع صوت، حسگرهای صوتی نیز می‌توانند متحرک یا ثابت باشند [۱۸]. در حسگرهای متحرک مشکلات موقعیت‌یابی بیشتر است. به طور معمول جهت ساده‌سازی محاسبات تعیین موقعیت منبع صوت، فرض می‌شود که منبع صوت یک نقطه در فضا است در حالی که در واقعیت هر منبعی دارای حجم خاص خود است و بخشی از فضا را به خود اختصاص می‌دهد. اگر تعداد منابع بیشتر از یک باشد محاسبات جهت تعیین موقعیت پیچیده خواهد بود، لذا به جداسازی منابع نیازمند هستیم.

نوع چینش حسگرها به صورت آرایه در تخمین موقعیت منبع برای برخی از الگوریتم‌های نیازمند مختصات حسگرها بسیار مهم است. با افزایش تعداد حسگرها تخمین مکان منبع دقیق‌تر خواهد بود ولی موجب پیچیدگی بسیار محاسبات و افزایش زمان اجرا است. معمولاً برای دقت محاسبات تخمین موقعیت منبع از یک نوع حسگر در معماری آرایه استفاده می‌شود. وجود تنوع در حسگرها و نامتقارن بودنشان در پاسخ ضربه آن‌ها تفاوت ایجاد می‌کند که اختلاف فاز متفاوت ایجاد می‌کند. آن‌ها نسبت به هم به خطای فاز مربوط به دیافراگم میکروفن‌ها منجر می‌شود. منابع صوتی می‌توانند در محیط بسته قرار گیرند که معمولاً به آن‌ها منابع میدان نزدیک گویند و بالعکس منابع در محیط آزاد را منابع میدان دور می‌گویند. موقعیت‌یابی منابع در هر محیط دارای مشکلات بسیار است. باد، طوفان و شرایط جوی مثل بارش برف و باران می‌تواند باعث بروز نوفه در علامت دریافتی شوند. افزودن محور مختصات Z برای منبع صوت از چالش‌های مهمی است که باید به آن توجه شود. هر چه میزان ارتفاع منبع صوت نسبت به آرایه حسگر افزایش یابد تخمین مکان منبع سخت‌تر می‌شود. علاوه بر این، اختلاف ارتفاع بین حسگرها بر دقت تخمین موقعیت منبع تأثیر می‌گذارد [۱۹].

سامانه موقعیت‌یابی صوتی باید بسیار سریع و بی‌درنگ موقعیت منبع را مشخص کند تا به سرعت در پاسخ به شرایط تصمیم‌گیری شود. سامانه بی‌درنگ باید پاسخ درست را در فرجه زمانی از پیش تعیین شده بازگرداند. آرایه‌های توزیعی می‌تواند بر دقت مختصات تخمینی بیافزاید که زمان اجرا را افزایش داده و چالش هم‌گامی یا هم‌زمان‌سازی^{۴۹} آرایه‌ها با یکدیگر را به وجود می‌آورد. سرعت انتشار صوت بستگی به جنس محیط، دما، فشار محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود، بسامد و طول موج دارد. از طرفی سرعت صوت در مواد جامد بیشتر از مایع و در مایع بیشتر از گاز است، زیرا مولکول‌های مواد جامد نسبت به مایع و مایع نسبت به گاز از انسجام بیشتری برخوردارند. اگر مولکولی دچار نوسان شود به سرعت می‌تواند مولکول نزدیک به خود را نوسان دهد. دمای محیط نیز به شدت در سرعت انتشار صوت دخیل است، زیرا جنبش مولکول‌های محیط افزایش می‌یابد. رطوبت هوا نیز از عوامل افزایش سرعت صوت است، زیرا مولکول‌های مایع آب در میان مولکول‌های هوا قرار می‌گیرند. سرعت صوت در محیط گازی به صورت رابطه (۱) است که در آن γ ثابت بی‌دررو^{۴۰} گاز، K_B ثابت بولتزمن، M_g دما مطلق به کلوین و T_g جرم مولکولی گاز است. به طور معمول الگو را ساده و سرعت صدا را ثابت فرض می‌کنند [۲۰].

$$c = \sqrt{\frac{\gamma a K_B T_g}{M_g}} \quad (1)$$

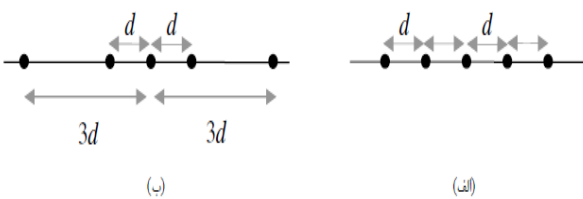


شکل ۱: طیف انرژی علامت باند میانی حقیقی.

اگر پهنای باند علامت منبع صوت برابر با $2\Delta\omega$ فرض شود و $1 \ll \Delta\omega/\omega_c$ باشد، پهنای باند علامت انتشاری از منبع صوت باریک‌بند محسوب می‌شود و آن را منابع صوتی باریک‌بند گویند. اگر پهنای باند $\Delta\omega$ در مقایسه با بسامد مرکزی ω_c قابل مقایسه باشد $s(t)$ را علامت پهن‌بند در نظر می‌گیرند و آن را منابع صوتی پهن‌بند گویند. معمولاً برای تعیین موقعیت منبع علامت‌های پهن‌بند، به‌جای پردازش در حوزه زمان از پردازش در حوزه بسامد استفاده می‌شود. تخمین موقعیت منبع علامت مسأله مهمی در حوزه پردازش علامت آرایه است که بسیاری از آن‌ها برای باریک‌بند پیشنهاد شده‌اند. در کاربردهای عملی، تعداد زیادی علامت پهن‌بند وجود دارد. تخمین موقعیت منابع علامت پهن‌بند موضوع تحقیقاتی داغ است [۲۲]. از طرفی منابع صوتی دارای باند بسامدی نیز هستند. علامت‌های صوتی با توجه به باند بسامدی‌شان به سه دسته بسامد پایین، میانی و بالا تقسیم‌بندی می‌شوند. بسته به بسامد علامت صوتی دریافتی، برد انتشار امواج ناشی از منابع صوتی متفاوت خواهد بود، لذا الگوریتم‌های مختلفی به منظور مکان‌یابی منبع استفاده می‌شوند [۲۷، ۲۸]. با توجه به گذار امواج صوتی در لایه‌های مختلف جوی، امواج صوتی بسامد پایین قابلیت انتشار تا فواصل طولانی را دارند [۲۹]. بنابراین موقعیت‌یابی منابع ساطع‌کننده این امواج حتی در فواصل دور نیز ممکن خواهد بود و شرط تحقق آن این است که توان منبع به‌اندازه کافی زیاد باشد. از این رو موقعیت‌یابی منابع علامت، به دو دسته میدان دور و میدان نزدیک طبقه‌بندی می‌شود [۲۸].

۲-۴- آرایه حسگرها

حسگرهای متنوعی برای کمک به تشخیص و پردازش صدا وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها، میکروفن است. میکروفن وسیله‌ای است که ارتعاشات صوتی یا مکانیکی را به‌تقلید از گوش انسان به علامت‌های برقی^{۵۲} تبدیل می‌کند. بسته به نوع ساخت و طراحی میکروفن، چنین وسایلی را می‌توان به چندین گروه تقسیم کرد که هر نوع آن دارای ویژگی‌های بسامدی متفاوت است و گیرنده‌های صوتی برقاوتی^{۵۴} هستند. میکروفن در زیر آب هیدروفن است که در فراصوت نیز به‌کار می‌رود [۲].



شکل ۲: آرایه میکروفن خطی (الف) خطی یکنواخت (ب) خطی غیریکنواخت

برای پردازش، جهت‌یابی و مکان‌یابی علامت‌های صوتی معماری چپش حسگرها و ساختار آرایه‌ای آن‌ها از نظر افزایش دقت موقعیت‌یابی و افزایش پیچیدگی محاسبات تعیین موقعیت بسیار حایز اهمیت است. آرایه‌های حسگری به سه دسته خطی، دوبعدی و سه‌بعدی دسته‌بندی می‌شوند [۳۰، ۳۱]. آرایه‌های خطی به دو دسته یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم می‌گردند (شکل ۲). در چیدمان آرایه‌های حسگری دو بعدی عناصر آرایه روی یک صفحه به دو صورت منظم و بی‌قاعده قرار می‌گیرند. از این آرایه‌ها برای موقعیت‌یابی دوبعدی منابع استفاده می‌شود. آرایه‌های سه‌بعدی برای موقعیت‌یابی دقیق منابع صوتی در سه‌بعد کاربرد دارند. آرایه‌های

بسامدی شنوایی انسان تقریباً از ۱۶ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز است. در بسامدهای پایین محدودیت شنوایی نسبتاً گسترده است که با افزایش سن به سمت بسامدهای پایین‌تر تغییر می‌کند [۲].

صداها با بسامدهای بسیار پایین خارج از محدوده شنوایی انسان می‌توانند ناشی از ارتعاشات ساختمان یا فرآیندهای صنعتی باشند که مقادیر زیاد گاز در آن جابه‌جا می‌شود. این دامنه اثرات شدید ناخوشایندی بر روی انسان‌ها دارد و ممکن است با حالت تهوع برای بشر همراه باشد. امواج صوتی با بسامدهای بالاتر از حد بالای شنوایی به‌عنوان امواج فراصوت شناخته می‌شوند [۲]. از دلایل ماشینی‌شدن موقعیت‌یابی، محدودیت انسان در حوزه شنیداری است. از سوی دیگر در بعضی موقعیت‌ها انسان نیازمند مکان‌یابی و جهت‌یابی منابع صدا است که در آن لحظه برای جان وی خطرناک است. همچنین انسان برای ادراک، محدودیت‌هایی مانند میزان فاصله از منبع صدا دارد لذا نیاز به ماشینی‌شدن جهت‌یابی و مکان‌یابی احساس می‌شود که توانایی دقت و صحت بالا در تمامی بسامدهای موجود را دارد.

۲-۲- کاربردهای موقعیت‌یابی

جهت‌یابی و مکان‌یابی منابع صوتی دارای حوزه‌های کاربرد وسیع از هدایت خودکار دوربین سالن کنفرانس، کنفرانس از راه دور، بهبود گفتار، کنترل ترافیک، سمعک، ربات‌ها تا حوادث لرزه‌ای درمعدان است. ربات‌ها با اطلاع از موقعیت منبع صوتی برای ارتباط و ردیابی حرکت افراد و سایر منابع صوتی بهره می‌گیرند. سامانه‌های نظامی و امنیتی در خیابان‌ها، برای تصادفات ماشین‌ها و یا شلیک گلوله از مشاهدات صوتی برای یافتن محل منبع استفاده می‌کنند. یافتن محل استقرار اهداف نظامی در زیرآب، یافتن محل تجمع آبیژان برای اهداف تحقیقاتی و تشخیص ورود غیرقانونی به محوطه سایت‌های نظامی و صنعتی از کاربردهای موقعیت‌یابی هستند [۲۴]. موقعیت‌یابی صوتی می‌تواند مکملی برای سامانه‌های رادار باشد و نقطه کور این سامانه‌ها را پوشش دهد. تخمین جمعیت حیوانات، مطالعات رفتاری و برخورد‌های کشنده بین پستانداران دریایی و کشتی‌ها و قرار گرفتن پستانداران دریایی در معرض صداها بلند با منشاء انسانی، بررسی‌های لرزه‌نگاری، بهره‌برداری نفت و گاز، تشخیص و کشف اشیاء از جمله موارد موقعیت‌یابی در آب است [۲۵]. صوت برای شناسایی و موقعیت‌یابی سربازان در حال حرکت دشمن در تونل‌های زیرزمینی یا ورود به برج‌ها، شناسایی و مکان‌یابی حریق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، از صوت در میدان جنگ برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شود. می‌توان علامت‌های صوتی را انتقال داد و از بازتاب صدا زبرداری برای یافتن موقعیت آن استفاده کرد. فرآیند ثبت و تحلیل این علامت‌ها، ردیاب صوتی سونار نامیده می‌شود.

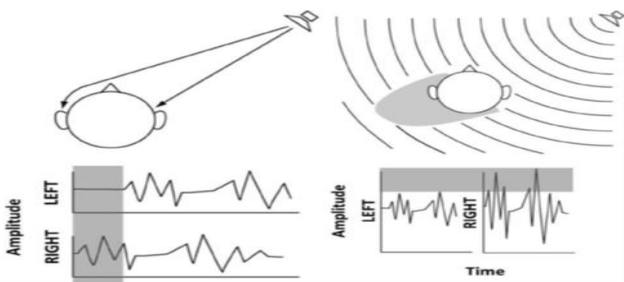
۲-۳- باند منابع صوتی

صوت از نظر توزیع انرژی به دو دسته باریک‌بند^{۵۱} و پهن‌بند^{۵۱} نسبت به بسامد مرکزی تقسیم می‌شود. پهنای‌بند علامت دریافتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نوع پردازش با توجه به آن متفاوت است [۲۶]. علامت‌های صوتی گفتار، انفجار، و تیراندازی در دسته علامت‌های پهن‌بند قرار می‌گیرند [۱، ۵] و پردازش آن‌ها با علامت‌های باریک‌بند به دلیل عدم امکان جایگزین تأخیر زمانی با تأخیر فاز، متفاوت است. اگر خروجی حسگر m $x_m(t)$ باشد می‌توان آن را به صورت رابطه (۲) بیان کرد که در آن $h_m(t)$ پاسخ ضربه حسگر m و n_m بیانگر پیچش کانولوشن^{۵۲} است. اگر $s(t)$ یک تابع حقیقی باشد چگالی طیف توان $S(f)$ نسبت به $\omega = 0$ متقارن خواهد بود. نمایش بسامدی رابطه (۲) به‌صورت رابطه (۳) است که در آن $N_m(\omega)$ تبدیل فوریه نوفه است. شکل ۱ طیف انرژی علامت باند میانی حقیقی را نمایش می‌دهد.

$$x_m(t) = h_m(t) * s(t - \tau_m) + n_m(t) \quad (2)$$

$$X_m(\omega) = H_m(\omega)[B(\omega - \omega_c) + B^*(-\omega - \omega_c)]e^{-j\omega\tau_m} + N_m(\omega) \quad (3)$$

بسامدی وابسته به جهت است که بستگی به ساختار فیزیکی حسگر و گوش دارد. یعنی بسته به زاویه منبع صوت نسبت به حسگر، مشخصه‌های باند بسامدی امواج صوتی دریافتی از منبع صوت، تقویت یا تضعیف می‌شوند [۳۷]. برای هر گوش تابع تبدیل سر به صورت جداگانه تعریف می‌شود [۳۸]. مشخصه‌های دوگوشی از طریق مقایسه علامت‌های دو حسگر صوتی بدست می‌آیند. در مکان‌یابی از طریق مشخصه دو گوش، مشخصه‌های اختلاف سطح درون گوش^{۶۳} و اختلاف زمانی درون گوش^{۶۴} استفاده می‌شود (شکل ۴) [۳۴، ۳۵]. سمت چپ شکل ۴، مشخصه اختلاف زمانی درون گوش را نشان می‌دهد، علامت رسیده به گوش سمت چپ و راست، زمانی که منبع صوتی در زاویه‌ای غیر از روبرو و پشت‌سر باشد دارای اختلاف زمانی است. در سمت راست شکل ۴، مشخصه اختلاف سطح علامت در گوش سمت چپ و راست مشاهده می‌شود.



شکل ۴: مشخصه‌های اختلاف زمانی درون گوش و اختلاف سطح درون گوش.

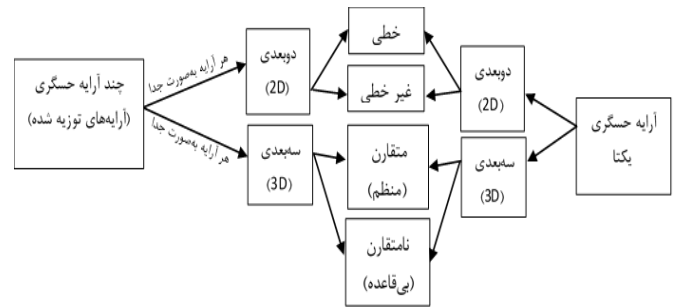
۳-۲- روش‌های مبتنی بر آرایه حسگرها

از چند دهه پیش زمره‌های پردازش آرایه‌ای بر روی انواع علامت‌های صوتی آغاز شد [۳۹]. آرایه حسگری مجموعه‌ای از حسگرها است که در قالب آرایش هندسی منظم یا نامنظم در مکان‌های مختلف چینش می‌شوند. علامت‌های منتشره در فضا توسط این آرایش هندسی نمونه‌برداری و در بعد مکان-فضا تحلیل می‌گردند. پردازش آرایه‌های حسگری به عوامل اساسی نوع چیدمان و آرایش هندسی حسگرها در فضا، تعداد حسگرها در آرایه و انواع محیط‌های پردازشی بستگی دارد. با افزایش تعداد حسگرها اطلاعات بیشتری از منابع صوتی به دست می‌آید ولی اگر تعداد آن‌ها افزایش یابد باعث پیچیدگی زیاد محاسبات می‌شود. اصولاً برای رسیدن به دقت بالا در مکان‌یابی هدف در کاربردهای صنعتی، بیشتر از آرایه‌های حسگری استفاده می‌شود. روش‌های موقعیت‌یابی منابع صوتی با استفاده از آرایه‌های حسگری را می‌توان به سه دسته (۱) بیشینه توان خروجی آرایه حسگری، (۲) مبتنی بر پردازش ماتریس همبستگی علامت دریافتی توسط آرایه حسگرها، و (۳) دریافت اطلاعات اختلاف زمان رسیدن علامت‌های صوتی به هر جفت حسگر تقسیم کرد. در روش (۱)، مکان‌یابی صوتی نیازمند اطلاعات قبلی است که به دلیل جستجوی مکانی، دارای پیچیدگی زیاد و زمان‌بر است و در کاربردهای بی‌درنگ کمتر استفاده می‌شود. اگر مسأله بی‌درنگ باشد بهترین روش، روش (۳) و استفاده از اطلاعات زمانی علامت صوتی است. برای مکان‌یابی چند منبع، این روش توانایی مناسب برای تحلیل ندارد و باید از روش (۲) تخمین طیف با تفکیک‌پذیری بالا^{۶۵} استفاده شود.

۳-۲-۱- روش‌های مبتنی بر ماتریس همبستگی

روش‌های موجود مکان‌یابی منبع از دید دیگر به دو دسته شبه‌سنجه^{۶۶} و غیر شبه‌سنجه قابل تقسیم است [۴۰]. روش‌های شبه‌سنجه اغلب روش‌های پرتودیس و یا روش‌های حداکثر درست‌نمایی که یک تابع درست‌نمایی فضایی را برای هر نقطه از فضا تعیین می‌کنند، است. هر تابع آن می‌تواند چندین بیشینه داشته باشد. جستجوی فضای موجود برای یافتن همه بیشینه‌های محلی این تابع یک فرایند پیچیده و زمان‌بر می‌باشد. روش‌های غیر شبه‌سنجه روش‌هایی بر اساس زیرفضای علامت‌ها و یا روش‌های مبتنی بر تحلیل مقادیر ویژه^{۶۷} هستند. برای مثال می‌توان روش‌های میوزیک^{۶۸} و یا اسپریت^{۶۹} را نام برد که تفکیک‌پذیری بالاتری نسبت به

سه‌بعدی نسبت به آرایه‌های خطی و دوبعدی دارای محاسبات پیچیده‌تری هستند. همچنین در صورت وجود چند آرایه به صورت توزیعی در محیط موقعیت‌یابی، حسگرهای مربوط را آرایه‌های حسگری توزیعی نامند که هر آرایه می‌تواند ساختار و معماری خاص خود را با فواصل مختلف به صورت بی‌سیم و یا با سیم داشته باشد. شکل ۳ دسته‌بندی کلی آرایه‌های حسگری را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: دسته‌بندی کلی آرایه‌های حسگری.

۳- فنون موقعیت‌یابی

الگوریتم‌های زیادی برای مکان‌یابی یا تخمین راستای منبع صوت ارایه شده که به دو دسته مکان‌یابی مبتنی بر الگوریتم‌های دو مرحله‌ای و تک مرحله‌ای تقسیم می‌شوند. در الگوریتم‌های دو مرحله‌ای، در مرحله اول تخمین تأخیر زمانی^{۵۵} صورت می‌گیرد و در مرحله دوم موقعیت منابع از اختلاف زمانی رسیدن علامت به جفت حسگرها بدست می‌آید که از متداول‌ترین آن‌ها روش مکان‌یابی هندسی است. الگوریتم‌های تک‌مرحله‌ای از تعداد زیادی حسگر جهت دریافت اطلاعات بهره می‌برند. فنون متعددی از این دسته روش‌ها وجود دارد که می‌توان به الگوریتم پرتودیس^{۵۶}، الگوریتم بیشینه درست‌نمایی^{۵۷} و الگوریتم زیرفضای علامت^{۵۸} اشاره کرد. در این الگوریتم‌ها علاوه بر تشخیص موقعیت (جهت یا مکان) منابع صوتی می‌توان تعداد منابع صوتی را نیز مشخص کرد. روش‌های مکان‌یابی منبع صوت مبتنی بر نوع دریافت و پردازش صوت به دو دسته مبتنی بر ساختار گوش و مبتنی بر آرایه حسگری تقسیم می‌شوند.

۳-۱- روش‌های مبتنی بر گوش

سامانه شنوایی انسان با دقت خوب قادر به تخمین مکان منبع صوت از علامت‌های صوتی دریافتی توسط دو گوش است. انسان‌ها می‌توانند منابع صوت را در سه بعد فضا مکان‌یابی کنند و حتی وجود منبع صوت پشت‌سر که هیچ اطلاعات بینایی از آن ندارند را تشخیص دهند [۳۲]. این روش بیشتر برای ربات‌های انسان‌نمای سیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳]. خیلی از ربات‌ها برای درک شنوایی از سامانه چند حسگری یعنی بیشتر از سه حسگر استفاده می‌کنند. پردازش علامت‌های آرایه‌ای نسبت به پردازش دو حسگری دارای کارایی بیشتر است ولی ساختار دو حسگری انسان دارای تحقیقات گسترده است. می‌توان در ربات‌های جستجوگر، امدادگر و ربات‌هایی که هیچ شباهتی به انسان ندارند از آرایه‌های حسگری با بیش از دو حسگر برای سهولت و دقت بالای تخمین استفاده کرد. در مکان‌یابی صوتی مبتنی بر دو گوش یا دو حسگر، گوش‌ها در سامانه‌های زیست‌شناختی و میکروفن‌ها در سامانه‌های فنی، برای بدست آوردن اطلاعات موقعیت منبع صوت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۴]. اطلاعات جهتی منابع صوتی دارای دو عنصر مهم و کلیدی زاویه سمت (زاویه افق نسبت به منبع صوت) و زاویه ارتفاع (زاویه عمودی نسبت به منبع) است [۳۶]. در ربات‌های انسان‌نما یا ربات‌های که مبتنی بر ساختار گوش، مشخصه‌های موجود در علامت‌های ورودی گوش که موقعیت منبع صوت را مشخص می‌کنند به دو دسته عمده تک گوش^{۵۹} (یک گوش) و دو گوش^{۶۰} (دو گوش) تقسیم می‌شوند.

مشخصه‌های تک‌گوشی می‌تواند از علامت ورودی فقط یک حسگر صوتی استخراج شود. به اصطلاح به آن تابع تبدیل سر^{۶۱} گفته می‌شود و دارای صافی‌های^{۶۲}

محاسباتی کم هزینه است و همچنین می‌تواند به‌طور مؤثر در شبکه حسگر توزیعی استفاده شود [۲۱]. به‌طور متداول برای تخمین تأخیر زمانی بین جفت حسگر آرایه‌ها از همبستگی بین دو علامت استفاده می‌شود. برای مکان‌یابی منابع صوتی با توجه به مقادیر تخمین تأخیر زمانی، از روش‌های مکان‌یابی هندسی می‌توان استفاده کرد که مناسب علامت‌های پهن‌بند است.

۴- روش‌های مبتنی بر تفاوت زمان ورود

موقعیت‌یابی بر اساس تفاوت زمان ورود بین جفت حسگرهای مجزا در سال‌های اخیر افزایش یافته است [۴۱]. در این روش، حسگرهای صوتی باید با یکدیگر هم‌گام^{۷۷} شوند [۴۲]. همچنین نسبت به بازتاب مستحکم‌تر و پیاده‌سازی آن آسان‌تر است و بار محاسباتی کمتری دارد [۴۳، ۴۴]. این روش‌ها دو مرحله هستند. روش‌های تخمین تأخیر زمانی در مرحله اول و روش‌های برآورد موقعیت منبع صوت در مرحله دوم [۴۵]، به‌ترتیب شرح داده می‌شوند.

۴-۱- تخمین تأخیر زمانی

اگر N تعداد حسگرها باشد در روش تفاوت زمان ورود علامت، یکی از حسگرها به‌عنوان حسگر مبنا (مرجع) فرض می‌شود و اختلاف زمان دریافت علامت در سایر حسگرها با این حسگر محاسبه می‌گردد که تعداد آن برابر $N - 1$ است [۴۴]. در بعضی موارد نیاز به تعیین حسگر مبنا نیست و تأخیر زمان ورود علامت در تمامی جفت حسگرها با تعداد $\frac{N(N-1)}{2}$ و یا تعدادی از آن‌ها تخمین زده می‌شود. از جمله روش‌هایی که برای تخمین تأخیر زمانی علامت میان حسگرها وجود دارد می‌توان به روش‌های هم‌بستگی متقابل کلاسیک^{۷۸} [۴۶]، هم‌بستگی متقابل تعمیم‌یافته^{۷۹} [۴۷]، ضریب هم‌بستگی متقابل چندکاناله^{۸۰} [۴۸، ۴۹]، پیش‌بینی خطی فضایی^{۸۱} [۴۸]، آمار مرتبه دوم^{۸۲} [۵۰] و فنون ویژه بردار^{۸۳} پایه [۵۱] اشاره نمود. از میان این روش‌های متعدد هم‌بستگی متقابل کلاسیک و هم‌بستگی متقابل تعمیم‌یافته به‌عنوان پرکاربردترین روش‌ها برای تخمین تأخیر زمان است.

۴-۱-۱- هم‌بستگی متقابل کلاسیک

روش هم‌بستگی متقابل، قدیمی‌ترین الگوریتم تخمین تفاوت زمان ورود است که بر مبنای الگوی انتشار تک مسیری ایده‌آل طراحی گردید. این روش فقط از اطلاعات دو حسگر برای تخمین تأخیر زمانی بین آن‌ها استفاده می‌کند. برای استفاده از این روش، مجموعه K تایی از علامت ضبط شده توسط میکروفن، در نظر گرفته می‌شود. تخمین تأخیر زمانی در این روش یافتن زمانی است که تابع هم‌بستگی متقابل بین دو علامت مشاهده شده را بیشینه نماید. $\hat{\tau}_{cc}$ از رابطه (۴) به‌دست می‌آید. $\psi_{cc}[m]$ تابع هم‌بستگی متقابل بین $x_0[n]$ و $x_1[n]$ امید ریاضی و m در محدوده $[-\tau_{max}, \tau_{max}]$ قرار دارد که τ_{max} بیشینه تأخیر مجاز را نشان می‌دهد. به‌دلیل مجهول بودن تابع خود هم‌بستگی باید از این تابع تخمینی بزنیم که بهترین تخمین، تخمین اربب یا میانگین‌گیری رابطه (۵) است.

$$\hat{\tau}_{cc} = \arg \max_m R_{cc}, R_{cc}[m] = E\{x_0[l]x_1[l+m]\} \quad (4)$$

$$\hat{\psi}_{cc}[m] = \begin{cases} \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{K-m-1} x_0[l]x_1[l+m], & m \geq 0 \\ \frac{1}{k} \sum_{l=-m}^{K-1} x_0[l]x_1[l+m], & m \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

۴-۱-۲- هم‌بستگی متقابل تعمیم یافته

الگوریتم هم‌بستگی متقابل تعمیم‌یافته روش توسعه‌یافته الگوریتم هم‌بستگی متقابل است. این روش نه‌تنها با استفاده از محاسبات کم‌تر می‌تواند روش هم‌بستگی متقابل را اجرا کند بلکه با استفاده از استخراج اطلاعات علامت (به‌عنوان اطلاعات پیشین) با روش هم‌بستگی متقابل، تخمین تفاوت زمان ورود را بهبود می‌بخشد. از نقطه نظر محاسباتی، پیچیدگی محاسباتی در الگوریتم هم‌بستگی متقابل تعمیم‌یافته به‌دلیل

روش‌های شبه‌سنجه آرایه می‌دهند. این روش‌ها برای آرایه‌هایی با علامت‌های باریک‌بند طراحی شده‌اند ولی کارهایی برای تبدیل این روش‌ها به علامت‌های پهن‌بند نیز انجام شده است.

۳-۲- روش‌های زیرفضای باندباریک

در روش‌های زیرفضای علامت به‌جای پردازش داده‌های دریافتی، از ماتریس هم‌بستگی^{۷۰} بردار خروجی استفاده می‌شود. روش‌های زیرفضای علامت بر اساس دو ویژگی ماتریس هم‌بستگی عمل می‌نمایند. فضایی که توسط بردارهای ویژه ماتریس هم‌بستگی جاروب و به دو زیرفضای نول و علامت تقسیم می‌شود. بردارهای هدایت متناظر با راستای منبع بر فضای نول متعامد است. از آن نظر که زیرفضای نول بر زیرفضای علامت عمود است، در نتیجه بردارهای هدایت راستا در فضای علامت قرار دارند. فضای نول توسط بردارهای ویژه متناظر با کوچکترین مقادیر ویژه و فضای علامت توسط بردارهای ویژه متناظر با بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس هم‌بستگی جاروب می‌شود. ابتدا یک بردار وزن که شامل فضای نول و یا متعامد بر فضای علامت است بدست می‌آید، سپس راستاهایی که بر این بردار وزن متعامد است محاسبه می‌شوند.

۳-۲-۳- روش‌های زیرفضای علامت پهن‌بند

با اعمال الگوریتم‌های باریک‌بند بر روی باندپهن، اطلاعات مفید برای تعیین شبه‌سنجه‌های مجهول از بین می‌رود. روش‌های زیادی برای تعیین راستای ورود و مکان علامت‌های باندپهن وجود دارد که به دو دسته همدوس^{۷۱} و ناهمدوس^{۷۲} تقسیم می‌شوند.

زیرفضای علامت ناهمدوس: روش زیرفضای علامت ناهمدوس ابتدایی‌ترین روش تخمین جهت ورود علامت^{۷۳} پهن‌بند است که زیرفضای علامت و نوفه را در هر بسامد به صورت مستقل تخمین می‌زند. سپس بر روی موقعیت علامت‌های تخمین زده شده از هر بسامدی برای محاسبه تخمین‌نهایی متوسط‌گیری می‌کند. علامت تجزیه‌شده در هر باند بسامدی به‌صورت مدل یک علامت باریک‌بند لحاظ می‌شود. از این رو در هر باند بسامدی می‌توان روش‌های تعیین موقعیت برای علامت‌های باریک‌بند مانند الگوریتم میوزیک و اسپریت را اعمال کرد. الگوریتم‌های ناهمدوس برای علامت‌های ناهمبسته در نسبت علامت به نوفه‌های بالا و زمانی که علامت‌ها فاصله زاویه‌ای مناسبی داشته باشند عملکرد مناسبی دارند. همچنین چون تخمین‌نهایی از متوسط‌گیری بر روی تمامی دسته بسامدهای مختلف بدست می‌آید، بنابراین یک داده نامربوط در یک بسامد، ممکن است از کارآیی عملیاتی سامانه بکاهد. در نسبت علامت به نوفه‌های پایین افزایش تعداد دسته‌های بسامدی ممکن است کارآیی عملکرد سامانه را کاهش دهد که برای رفع این مشکل‌ها از الگوریتم‌های همدوس استفاده می‌شود.

زیرفضای علامت همدوس: در الگوریتم همدوس، ماتریس کواریانس^{۷۴} در دسته‌های بسامدی مختلف به‌صورت همدوس با هم ترکیب و سپس روش‌های تعیین موقعیت برای علامت‌های باریک‌بند به‌صورت مستقیم بر ماتریس‌های کواریانس اعمال می‌شوند. در این الگوریتم‌ها ابتدا هر کدام از ماتریس‌های کواریانس در دسته بسامدهای مختلف با ضرب در ماتریس‌های نگاشت به یک ماتریس کواریانس در بسامد مرجع (مانند بسامد مرکزی) تبدیل می‌شوند. سپس این ماتریس‌ها با هم جمع می‌شوند تا ماتریس نهایی حاصل گردد. در این الگوریتم‌ها ابتدا محاسبه ماتریس نگاشت برای تبدیل ماتریس‌های کواریانس، مورد نیاز است.

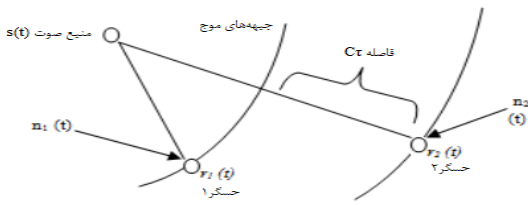
تفاوت زمانی علامت دریافتی: تخمین مکان در روش‌های مبتنی بر تخمین تفاوت زمان ورود علامت^{۷۵} دو مرحله‌ای است. در مرحله اول، تأخیر زمانی محاسبه و در مرحله دوم، مکان منبع تخمین زده می‌شود. تخمین دقیق زمانی در محیط‌های نوفه‌ای و انعکاسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مزیت اصلی رویکرد غیر مستقیم تفاوت زمان ورود، برخلاف روش مستقیم توان پاسخ هدایت‌شده بیم^{۷۶} که جستجوی جامعی در کل فضای توان پاسخ هدایت‌شده انجام می‌دهد، این است که از نظر

و $X_1[k]$ تبدیل فوریه گسسته k تایی علامت‌های ضبط‌شده دو حسگر و $W_0[k]$ و $W_1[k]$ تبدیل فوریه گسسته k تایی طیف توان نوفه دو حسگر هستند. در عمل باید طیف نوفه را از روی علامت‌های مشاهده شده تخمین زد که معمولاً این کار از روی قاب‌های سکوت صورت می‌پذیرد. این صافی در بین صافی خانواده همبستگی متقابل تعمیم‌یافته از نظر آماری بهینه است. همچنین در روش‌های مبتنی بر همبستگی متقابل تعمیم‌یافته در زمینه بهبود بیشتر تخمین تأخیر زمان تلاش می‌شود. برای مثال نویسندگان در مقاله [۵۴] برای بهبود تخمین تأخیر زمان علاوه بر صافی بیشینه احتمال از تجزیه مد تجربی^{۱۱} استفاده کرده‌اند.

$$\phi_{ML}[k] = \frac{|X_0[k]||X_1[k]|}{|W_0[k]|^2|X_0[k]|^2 + |W_1[k]|^2|X_1[k]|^2}, k = 0, 1, \dots, k-1 \quad (11)$$

۲-۴- برآوردگرها

الگوریتم‌های مبتنی بر تخمین تأخیر زمان در مرحله دوم به واسطه تأخیر زمانی حاصل از مرحله اول به حل معادلات غیرخطی هذلولی و بهینه‌سازی دقت تخمین موقعیت منبع می‌پردازند.



شکل ۶: تأخیر زمانی بین دو حسگر

۲-۴-۱- حل معادلات غیرخطی

بعد از حصول مقادیر تأخیر، محاسبه مکان منبع با استفاده از این مقادیر و با توجه به نحوه و شکل قرارگیری آرایه حسگرها انجام می‌شود. برای محاسبه مکان منبع با استفاده از تأخیرها باید معادلاتی تشکیل شود که به صورت غیرخطی هذلولی باشند تا از حل و یا محاسبه محل تقاطع آن‌ها، محل منبع مشخص شود و یا جهت علامت انتشاری تخمین زده شود. برای یافتن این مکان هندسی، معادلاتی از تأخیرها تشکیل می‌شود که به معادلات غیرخطی هذلولی مشهورند. حل این معادلات دارای پیچیدگی‌های زیادی است که با روش‌های مختلفی قابل حل هستند. نحوه تشکیل معادلات غیرخطی در ادامه بیان می‌شود. اگر منبع را با P_s و هر حسگر را با $P_i (i = 1, 2, \dots)$ نشان دهیم مختصات هر کدام در فضای سه‌بعدی به صورت دکارتی در رابطه (۱۲) نمایش داده شده است. فاصله بین هر دو حسگر با رابطه (۱۳) تعریف می‌شود. فاصله بین هر دو میکروفن با سرعت انتشار علامت در فضا با رابطه (۱۴) متناسب است که طبق شکل ۶، برابر با مقدار فاصله Ct است.

$$P_s = [x_s, y_s, z_s], P_i = [x_i, y_i, z_i] \quad (12)$$

$$R_{ij} = R_i - R_j \quad (13)$$

$$R_{ij} = c * \tau_{ij} \quad (14)$$

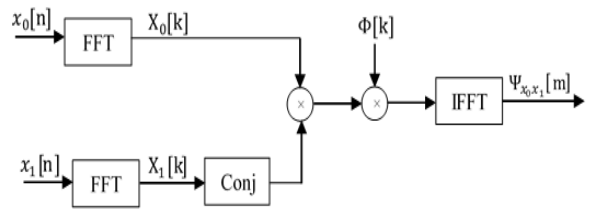
فاصله هر حسگر و منبع با استفاده از رابطه (۱۵) بدست می‌آید. از رابطه (۱۳) و با استفاده از رابطه (۱۵) می‌توان رابطه (۱۶) را نوشت. حال اگر به جای i مقدار ۱ را قرار دهیم و حسگر شماره ۱ را به عنوان حسگر مبنا انتخاب کنیم رابطه (۱۷) حاصل می‌شود. با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶)، رابطه (۱۷) به صورت رابطه (۱۸) نوشته می‌شود. با بسط رابطه (۱۸)، رابطه (۱۹) بدست می‌آید. با حذف مقادیر متناظر با علامت معکوس رابطه (۲۰) حاصل می‌شود. در رابطه (۲۰) مجهولات مقادیر مختصات منبع (x, y, z) و R_1 (فاصله منبع با میکروفن اول یا میکرفن مبنا) و

بهره از تبدیل فوریه سریع^{۱۴} نسبت به روش همبستگی متقابل کم‌تر است [۱۳]. در این روش تأخیر \hat{t}_{GCC} از رابطه (۶) بدست می‌آید. تابع تخمین همبستگی متقابل تعمیم‌یافته رابطه (۷) است که در آن $X[k]$ تبدیل فوریه گسسته $x[n]$ است که این مقدار از تبدیل فوریه سریع بدست می‌آید و همبستگی طیف متقابل، $\{E\{X_0[k]X_1^*[k]\} = S_{X_0X_1}(k)\}$ است. در این رابطه $\phi[k]$ تابع وزنی است که به آن پیش‌صافی نیز می‌گویند. تعداد نقاط تبدیل فوریه k است و همچنین تابع متقابل، $\zeta_{X_0X_1}[k] = \phi[k]S_{X_0X_1}[k]$ را تابع طیف متقابل تعمیم‌یافته گویند. مشابه بحث همبستگی متقابل در عمل باید طیف متقابل از روی داده‌های مشاهده شده تخمین زده شود و بهترین و آسان‌ترین تخمین مقادیر امید ریاضی با خود نمونه‌های طیفی است یعنی مقدار رابطه (۸) جایگزین $S_{X_0X_1}[k]$ می‌شود.

$$\hat{t}_{cc} = \arg \max_m \psi_{GCC}[m] \quad (6)$$

$$\psi_{GCC}[m] = \sum_{k=0}^{k-1} \phi[k]S_{X_0X_1}[k]e^{\frac{j2\pi mk}{k}} = \sum_{k=0}^{k-1} \zeta_{X_0X_1}[k]e^{\frac{j2\pi mk}{k}} \quad (7)$$

$$S_{X_0X_1}(k) = X_0[k]X_1^*[k] \quad (8)$$



شکل ۵: روند عملکرد تابع همبستگی متقابل تعمیم‌یافته

تفاوت الگوریتم‌های همبستگی متقابل تعمیم‌یافته در انتخاب تابع وزنی $\phi[k]$ است. در شکل ۵ روند عملکرد تابع همبستگی متقابل تعمیم‌یافته نمایش داده شده است. تابع‌های وزنی مختلف خواص مختلفی را از خود نشان می‌دهند. اگر تابع برابر یک فرض شود، روش همبستگی متقابل تعمیم‌یافته اجرای روش همبستگی متقابل کلاسیک در حوزه بسامد است. در این حالت به دلیل تبدیل فوریه سریع حجم محاسبات از روش همبستگی متقابل کمتر است. صافی‌های وزنی متعددی از جمله طیف فاز^{۱۵}، بیشینه احتمال^{۱۶}، تبدیل همدوسی هموار^{۱۷}، ایکارت^{۱۸}، راث^{۱۹} و تبدیل هیلبرت^{۲۰} وجود دارند [۱۳، ۴۷، ۵۲، ۵۳].

صافی وزنی طیف فاز: این صافی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین صافی‌های خانواده همبستگی متقابل تعمیم‌یافته است. بدون در نظر گرفتن اثر نوفه می‌توان نتیجه گرفت که اندازه طیف متقابل وزنی به‌دست‌آمده از علامت منبع مستقل می‌باشد و تنها به پاسخ ضربه کانال بستگی دارد. در نتیجه طیف فاز در مقایسه با بسیاری از صافی‌های خانواده همبستگی متقابل تعمیم‌یافته، به‌خصوص در حالتی که علامت منبع با زمان تغییر می‌کند کارایی بهتری دارد. به این دلیل الگوریتم طیف فاز در برابر مشکل انعکاس که یکی از مهم‌ترین مشکلات تخمین تفاوت زمان ورود در محیط صوتی است نسبت به بقیه الگوریتم‌های خانواده همبستگی متقابل تعمیم‌یافته، مقاوم‌تر است. تابع وزنی این صافی به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود. اندازه طیف متقابل وزنی با رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$\phi_{PHAT}[k] = \frac{1}{|S_{X_0X_1}[k]|}, k = 0, 1, \dots, k-1 \quad (9)$$

$$\zeta_{X_0X_1}[k] = \frac{S_{X_0X_1}[k]}{|S_{X_0X_1}[k]|} \quad (10)$$

صافی وزنی بیشینه احتمال: طیف توان نوفه را باید به نحوی تخمین زد تا به عنوان اطلاعات پیشین، بتوان با اثرات مخرب نوفه مقابله کرد که صافی بیشینه احتمال معرفی گردید. رابطه ریاضی این صافی به صورت رابطه (۱۱) است که در آن $X_0[k]$

تعداد معادلات با تعداد مجهولات برابر باشد. در نهایت مکان‌های محاسبه‌شده در دسته‌های مختلف، با یکدیگر ترکیب و جواب‌نهایی حاصل می‌شود. به شرط در اختیار داشتن اطلاعات زیاد آماری (ماتریس اطلاعات فیشر^{۹۹}) این روش جواب مناسبی دارد لذا مشکل این روش محدودیت در اختیار داشتن اطلاعات آماری منبع است.

در روش دیگری معادلات غیرخطی با استفاده از بسط سری تیلور خطی [۵۷]، حل شد سپس مکان منبع با استفاده از روش تکراری و انتخاب حدس اولیه با انتخاب معیار خطا محاسبه گردید. مزیت این روش در امکان استفاده از تأخیرهای اضافی جهت افزایش دقت محاسبه مکان است. اما این روش به انتخاب حدس اولیه و حد همگرایی مناسب حساس است و در صورت عدم انتخاب مناسب، جواب قابل قبولی نخواهد داد. خطای خطی‌سازی و حجم عملیات زیاد در تکرارهای مختلف نیز از معایب آن است. فانگ^{۱۰۰} [۶۶] در روش خود حل دقیق با شکل بسته برای معادلات غیرخطی ارائه داد که در این روش، تعداد معادلات برابر تعداد مجهولات است. مزیت اصلی این روش حجم کم محاسبات، عدم وجود خطای خطی‌سازی، عدم استفاده از اطلاعات آماری و عدم نیاز به انتخاب حدس اولیه یا حد همگرایی است. در این روش نمی‌توان از اطلاعات حسگرهای اضافی جهت افزایش دقت تخمین استفاده کرد. روش دیگری که از کلیه مزایای روش فانگ برخوردار شد و امکان استفاده از اطلاعات حسگرهای اضافی را فراهم کرد روش چان^{۱۰۱} است [۶۷].

معمولاً الگوریتم حل مسأله شامل روش‌های تکراری، تحلیلی و جستجو است [۶۸]. رویکرد خطی عمدتاً شامل دو روش حداقل مربعات خطی^{۱۰۲} و حداقل مربعات خطی وزنی^{۱۰۳} است. روش حداقل مربعات خطی نیازی به دانش پیشین از اطلاعات آماری نوفه ندارد که راه‌حلی ساده و کارآمد از نظر محاسباتی است [۶۹]. حداقل مربعات خطی وزنی نسخه وزنی از روش حداقل مربعات خطی و دارای دقت بالاتر تخمین است. از آن‌جا که با استفاده از رابطه محدودیت بین مکان هدف و متغیر کمکی می‌توان عملکرد حداقل مربعات خطی وزنی را بیشتر بهبود داد مجموعه‌ای از روش‌های مبتنی بر حداقل مربعات خطی وزنی با محدودیت پیشنهاد شد [۶۴، ۶۷]. حداقل مربعات خطی وزنی دو مرحله‌ای یک الگوریتم موقعیت‌یابی است که از محاسبات دو مرحله‌ای برای تخمین موقعیت استفاده می‌کند [۶۷]. حداقل مربعات وزنی محدود^{۱۰۴} با بهره‌گیری از روش ضریب لاگرانژ، مسأله بهینه‌سازی محدودیت درجه دو را حل می‌کند [۷۰]. حداقل مربعات وزنی محدود جدا شده^{۱۰۵} برای حل مشکل شرطی ماتریس سامانه با جداسازی هدف در مقاله [۷۱] پیشنهاد شد. روش‌های مختلف حداقل مربعات وزنی وجود دارد. رویکرد حداقل مربعات وزنی مقید^{۱۰۶} [۷۲] صریحاً رابطه بین موقعیت منبع و متغیر کمکی را به‌عنوان محدودیتی برای بهبود دقت در خود گنجانده است. روش حداقل مربعات کلی محدود^{۱۰۷} [۷۳] یکی دیگر از روش‌های تکراری شناخته شده است. بر اساس روش حداقل مربعات کلی محدود، یک روش تکراری مطابق با روش نیوتن برای ارائه راه‌حل‌های عددی ایجاد شد [۷۴]. در مقاله [۷۵] الگوریتم موقعیت‌یابی تفاوت زمان ورود براساس الگوریتم بهبودی حداقل مربعات کلی محدود دو مرحله‌ای^{۱۰۸} پیشنهاد شد که شامل روش تکراری مبتنی بر جهت متناوب ضرایب^{۱۰۹} است.

حل روابط مکان‌یابی به‌عنوان مسأله بهینه‌سازی غیر محدب^{۱۱۰} راهی دیگر است که می‌تواند با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تکراری [۷۶، ۷۷] یا روش‌های آرامش محدب^{۱۱۱} [۷۸، ۷۹] حل شود. برای حل معادلات غیرخطی می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی مانند تکرار نیوتن رافسون^{۱۱۲}، الگوریتم کرم شبتاب^{۱۱۳} و الگوریتم ژنتیک استفاده کرد [۶۸]. همچنین می‌توان برای دستیابی به راه‌حل عملی، از بهینه‌ساز ازدحام ذرات^{۱۱۴} [۸۰، ۸۱] برای حل مسأله بهینه‌سازی استفاده کرد. از انواع صافی کالمن^{۱۱۵} و صافی‌های ذرات برای ردیابی منبع متحرک صدا استفاده می‌شود [۸۲، ۸۳]. با توسعه رویکردهای تجزیه عددی به مسأله مکان‌یابی با استفاده از ابزارهای مختلف مانند بهینه‌سازی محدب و روش ماتریس فاصله اقلیدسی^{۱۱۶}، دقت مکان‌یابی در شرایط پر نوفه بهبود و بار محاسباتی کاهش می‌یابد [۸۴].

معلومات R_{i1} (فاصله حسگر i ل m و حسگر شماره یک) و مختصات حسگرها (x_i, y_i, z_i) است. برای بدست آوردن مختصات منبع، R_1 محاسبه و با توجه به مقدار آن مختصات منبع مشخص می‌شود.

$$R_{iS} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} \quad (15)$$

$$R_{ij} = c * \tau_{ij} = R_i - R_j \quad (16)$$

$$= \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(x_j - x_s)^2 + (y_j - y_s)^2 + (z_j - z_s)^2}$$

$$R_{i1} = R_i - R_1, R_i^2 = (R_{i1} + R_1)^2 \quad (17)$$

$$R_{i1}^2 + 2R_{i1}R_1 = (x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 - (x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 \quad (18)$$

$$R_{i1}^2 + 2R_{i1}R_1 = x_i^2 - 2x_ix_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_iy_s + y_s^2 + z_i^2 - 2z_iz_s + z_s^2 - x_1^2 + 2x_1x_s - x_s^2 - y_1^2 + 2y_1y_s - y_s^2 + z_1^2 + 2z_1z_s - z_s^2 \quad (19)$$

$$R_{i1}^2 + 2R_{i1}R_1 = x_i^2 - 2x_ix_s + y_i^2 - 2y_iy_s + z_i^2 - 2z_iz_s - x_1^2 + 2x_1x_s - y_1^2 + 2y_1y_s + z_1^2 + 2z_1z_s \quad (20)$$

۴-۲-۲- محاسبات مکان منبع صوتی

تمامی روش‌های حل این معادلات، به مقدار تأخیر محاسبه شده در مرحله اول حساس هستند به‌صورتی که عدم محاسبه درست تأخیر در مرحله اول باعث ایجاد خطای قابل توجهی در تخمین مکان می‌شود. ذکر شد که هدف اصلی حل معادلات غیرخطی هذلولوی، محاسبه مکان منبعی است که اختلاف زمان دریافت علامت آن در هر حسگر، یک هذلولی را تشکیل می‌دهد. ساده‌ترین روش برای محاسبه مکان منبع، رسم هذلولی‌ها با استفاده از تأخیرها و در نظر گرفتن محل تقاطع آن‌ها به عنوان مکان منبع است. این روش محاسبات زیادی را دربردارد. در جدول ۱ روش‌های مهم تخمین موقعیت منبع علامت مبتنی بر تأخیر زمان (تفاوت زمان ورود) بین جفت حسگرها را با ذکر رویکرد، الگوریتم حل معادلات غیرخطی، روش بهینه‌سازی، شرایط و محیط آزمایش، آرایه حسگری، منبع علامت، بعد مختصات، بی‌درنگی، هدف روش و همچنین نیاز و یا عدم نیاز به مقدار تخمینی مختصات اولیه ارائه شده است.

برای حل مسأله مکان‌یابی غیرخطی از روش خطی‌سازی و تخمین حداقل مربعات^{۹۲} استفاده می‌شود. برخلاف مزیت خطی‌سازی در ساده‌سازی حل الگوریتم‌ها، عملیات خطی‌سازی باعث حساسیت بیشتر این الگوریتم‌ها نسبت به نوفه می‌شود [۵۵، ۵۶]. محققان روش‌های مختلفی برای حل مسأله مکان‌یابی منبع ثابت مبتنی بر تفاوت زمان ورود از جمله روش تکراری^{۹۳} [۵۷] و روش‌های شکل بسته^{۹۴} [۵۸، ۵۹] ارائه کرده‌اند. نویسندگان در مقاله [۶۰] مکان منبع حاصل از قطع قطر بزرگ بیضی‌هایی که به‌وسیله سه حسگر تشکیل شده است را ارائه دادند. با افزایش تعداد میکروفن‌ها، این ترکیب‌های سه‌تایی افزایش یافته و باعث افزایش دقت و کارایی می‌شوند. مشکل این روش در افزایش تعداد معادلات و افزایش حجم محاسبات است. در برخی روش‌ها نظیر فریدلندر^{۹۵} [۶۱]، روش تقاطع کروی^{۹۶} [۶۲] و روش درون‌یابی کروی^{۹۷} [۶۳] برای بدست آوردن موقعیت هدف از تخمین حداقل مربعات استفاده شده که مستلزم بکارگیری اطلاعات آماری از نوفه و خطای تخمین است. فقدان این اطلاعات یکی از عوامل محدودکننده این روش‌ها می‌باشد. در روشی به نام تقسیم و غلبه^{۹۸} از تخمین‌گر بیشینه احتمال به تخمین مکان منبع استفاده شد [۶۴]. این روش حسگرها را به دسته‌هایی تقسیم می‌کند به‌صورتی که در هر دسته

جدول ۱: مقایسه روش‌های مهم موقعیت‌یابی مبتنی بر تفاوت زمان ورود.

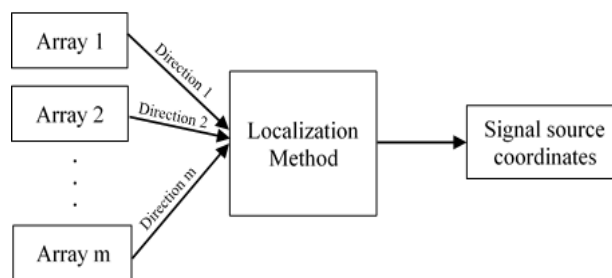
روش	هدف	منبع	مقدار اولیه	بی‌درنگ بعد	تعداد حسگر	هندسه آرایه	نوع آرایه	میدان	محیط	الگوریتم بهینه‌سازی	الگوریتم حل معادلات	رویکرد
[۲۱]	دقت بالا ^{۱۱۹}	یکتا و ثابت	خیر	بله	۳	—	یکتا و ثابت	میدان آزاد ^{۱۱۸}	محیط باز و بسته	—	حداقل مربعات وزنی	تفاوت زمان ورود و زاویه ورود ^{۱۱۷}
[۴۴]	دقت و استحکام بالا ^{۱۲۱}	یکتا و ثابت	خیر	—	۲	—	یکتا و ثابت	—	—	محدودیت صفحه مماس مخروطی ^{۱۲۰}	حداقل مربعات وزنی	تفاوت زمان ورود
[۵۷]	—	یکتا و ثابت	بله	—	۳	—	یکتا و ثابت	—	—	—	سری تیلور	تفاوت زمان ورود
[۶۸]	تکرار ^{۱۲۳} کم‌تر و دقت بالا	یکتا و ثابت	—	—	۲	—	یکتا و ثابت	—	محیط بسته	شبه‌تاب ترکیبی ^{۱۲۲}	حداقل مربعات وزنی	تفاوت زمان ورود
[۸۵]	کاهش تعداد میکروفن	یکتا و ثابت	خیر	بله	۲	خطی	یکتا و ثابت	—	محیط باز	—	معادلات جبری ^{۱۲۴}	تفاوت زمان ورود و تفاوت شدت سطح
[۸۶]	کاهش تعداد میکروفن	یکتا و ثابت	خیر	بله	۳	—	یکتا و ثابت	میدان دور	محیط باز	—	معادلات جبری	تفاوت زمان ورود و تفاوت شدت سطح و تابع تبدیل سر
[۸۷]	محاسبات کارآمد ^{۱۲۵} و عملکرد خوب ^{۱۲۶}	یکتا و متحرک	خیر	—	۳	—	یکتا و ثابت	میدان دور	محیط باز	—	شکل بسته دو مرحله‌ای	تفاوت زمان ورود و تفاوت فاز ورود
[۸۸]	دقت بالا	یکتا و متحرک	خیر	بله	۳	—	یکتا و ثابت	میدان دور	محیط باز	—	حداقل مربعات وزنی	تفاوت زمان ورود و تفاوت فاز ورود
[۸۹]	کاهش محاسبات ^{۱۲۸} و دقت بالا	یکتا و ثابت	خیر	—	۲	بیش از ۴	یکتا و ثابت	—	—	انتخاب داده ^{۱۲۷}	حداقل مربعات انتخاب داده	تفاوت زمان ورود
[۹۰]	مکان بهینه ^{۱۳۰}	یکتا و ثابت	خیر	بله	۳	—	یکتا و ثابت	—	—	—	برآورد وزنی شکل بسته پیش شرطی ^{۱۲۹}	تفاوت زمان ورود
[۸۴]	پایدار ^{۱۳۳} ، دقیق کار در شرایط متفاوت نسبت علامت به نوفه ^{۱۳۴}	یکتا و ثابت	بله	—	۲	—	یکتا و ثابت	—	—	بهینه‌سازی محدب، ماتریس فاصله اقلیدسی ^{۱۳۲}	حداقل سازی تکراری ^{۱۳۱}	تفاوت زمان ورود
[۷۴]	عملکرد خوب، استحکام و کارآمدی بالا ^{۱۳۶}	یکتا و ثابت	خیر	—	۳	۵ و بیش از ۵	یکتا و ثابت	—	—	بهینه‌سازی محدب	حداقل مربعات وزنی محدود محدب ^{۱۳۵}	تفاوت زمان ورود

۵- چالش‌های تفاوت زمان ورود

بیشتر روش‌های برآورد موقعیت منبع مبتنی بر تفاوت زمان ورود به عنوان مثال روش درون‌یابی کروی [۶۳] و روش حداقل مربعات وزنی [۶۷، ۹۰]، نیاز به اندازه‌گیری سرعت صوت دارند. این روش‌ها فقط در صورتی که سرعت صوت به اندازه کافی دقیق باشد، می‌توانند به نتیجه خوبی در موقعیت‌یابی برسند. باین‌حال، در محیط‌های پیچیده و متغیر، سرعت صوت ممکن است دارای درجه‌ای از عدم اطمینان یا حتی ناشناخته باشد، که کاربردهای سنتی را با سرعت صوت پیش اندازه‌گیری شده بسیار محدود می‌کند. برای کاهش تأثیر خطای اندازه‌گیری سرعت صوت، روش‌های مکان‌یابی منبع صوت برای یک سامانه عاری از سرعت توجه روزافزونی را به خود جلب کرده‌اند، به طوری که از تأثیر خطای اندازه‌گیری سرعت صوت جلوگیری کرده و دقت موقعیت تخمینی را بهبود بخشند [۴۱، ۹۳].

الگوریتم حداقل مربعات، با تعداد محدودی اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود، برای دست‌یابی به یک راه حل شکل بسته برای مسئله مکان‌یابی منبع استفاده شده است. اخیراً، الگوریتم حداقل مربعات در تلاش برای بهبود دقت روش مکان‌یابی با استفاده از مجموعه بزرگتری از برآوردهای تفاوت زمان ورود است. باین‌حال، در نظر گرفتن تمام مقادیر تفاوت زمان ورود می‌تواند در نهایت دقت روش مکان‌یابی را به دلیل وجود اندازه‌گیری‌هایی با نوفه زیاد کاهش دهد. با استفاده از یک روش انتخابی داده، در یک راه‌حل حداقل مربعات شکل بسته، می‌توان اندازه‌گیری‌های بد را نادیده گرفت.

از آن‌جا که مکان‌یابی میدان دور منابع صوتی با استفاده از یک آرایه دارای دقت کم است معمولاً در عمل از مشاهدات چند آرایه برای تخمین مکان منبع علامت استفاده می‌شود [۹۱] که به آن مکان‌یابی از طریق شبکه حسگر گویند. در شبکه حسگر تعداد آرایه‌ها حداقل دو است. شکل ۷ نمودار بلاکی مکان‌یابی مبتنی بر شبکه حسگر شامل $m \geq 2$ آرایه را نشان می‌دهد. به این ترتیب که در هر آرایه ابتدا جهت منبع علامت تخمین زده می‌شود سپس با استفاده از جهت‌های تخمینی، موقعیت منبع محاسبه می‌گردد. از جمله روش‌های مکان‌یابی منبع صدا با استفاده از چند آرایه حسگر، تقاطع راستا است. در این روش با دانستن حداقل زاویه‌های ورود علامت به دو آرایه، مکان مولد علامت تخمین زده می‌شود [۹۲].



شکل ۷: روند مکان‌یابی علامت با استفاده از شبکه حسگر شامل m آرایه.

متعددی جهت حل این معادلات مورد بررسی قرار گرفته است. در آینده سعی بر دستیابی به موقعیت‌یابی بهینه بی‌درنگ خواهد بود که چالش اصلی آن مدل‌سازی، طراحی و توسعه الگوریتم‌های سریع با پاسخ بهینه و در قالب سامانه‌های بی‌درنگ نهفته برای اشیاء حساس در اینترنت اشیاء و اینترنت اشیاء پزشکی است. روش‌هایی که بتواند برای بیشتر وظایف در سامانه‌های بی‌درنگ سخت، نرم و سفت در ساختارهای نظامی و غیرنظامی کاربرد داشته باشد.

۷- مراجع

- [1] J. George, and M. K. Lance, "Shooter Localization using a Wireless Sensor Network of Soldier-Worn Gunfire Detection Systems." *J. Adv. Inf. Fusion*, vol. 8, no. 1, pp. 15-32, 2013.
- [2] H. Kuttruff, "Acoustics: an introduction," *CRC Press*, pp. 1-380, 2007.
- [3] T. Damarla, "Battlefield Acoustics," *Springer*, pp. 1-152, 2015.
- [4] F. Dunn, W. Hartmann, D. Campbell, and N. H. Fletcher, "Springer handbook of acoustics," *Springer*, pp. 1-10, 2015.
- [5] J. Liang, J. D. Aronson, and A. Hauptmann, "Technical Report of the Video Event Reconstruction and Analysis (VERA) System--Shooter Localization, Models, Interface, and Beyond," *arXiv preprint arXiv:1905.13313*, 2019.
- [6] S. Argentieri, P. Danès, and P. Souères, "A survey on sound source localization in robotics: From binaural to array processing methods," *Computer Speech & Language, Elsevier*, vol. 34, no. 1, pp. 87-112, 2015.
- [7] A. N. Popper, and R. R. Fay, "Sound source localization," *Springer*, pp. 1-5, 2005.
- [8] B. Piper, R. Barham, S. Sheridan, and K. Sotirakopoulos, "Exploring the "big acoustic data" generated by an acoustic sensor network deployed at a cross rail construction site," *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV)*, London, UK, pp. 23-27, 2017.
- [9] P. N. H. Duc, A. Degurse, J. Allemandou, O. Adam, P. R. White, O. Gerard, R. Fablet and D. Cazau, "A scalable Hadoop/Spark framework for general-purpose analysis of high volume passive acoustic data," *OCEANS 2019-Marseille*. IEEE, pp. 1-7, 2019.
- [10] A. Tyagi, S. Kumar, and M. Trivedi, "Sound Localization in 3-D Space Using Kalman Filter and Neural Network for Human like Robotics," *Networking Communication and Data Knowledge Engineering: Springer*, pp. 227-243, 2018.
- [11] Y. Bai, L. Lu, J. Cheng, J. Liu, Y. Chen, and J. Yu, "Acoustic-based sensing and applications: A survey," *Computer Networks*, vol. 181, p. 107-447, 2020.
- [12] T. Damarla, L. M. Kaplan, and G.T. Whipps, "Sniper localization using acoustic asynchronous sensors," *Computer Networks*, vol. 10, no. 9, pp. 1469-1478, 2010.
- [13] X. Chang, C. Yang, J. Wu, X. Shi, and Z. Shi, "A surveillance system for drone localization and tracking using acoustic arrays," *2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pp. 573-577, 2018.
- [14] Y. Qingli, C. Jianfeng, and O. Geoffrey, "Robust AOA based acoustic source localization method with unreliable measurements," *Signal Processing*, vol. 152, pp. 13-21, 2018.
- [15] D. Gala, N. Lindsay, and L. Sun, "Three-dimensional sound source localization for unmanned ground vehicles with a self-rotational two-microphone array," *Proceedings of the 5th International Conference of Control, Dynamic Systems and Robotics*, Niagara Falls, Canada, pp. 7-9, 2018.
- [16] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, 2017.
- [17] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, "Microphone array signal processing," *Springer Science & Business Media*, 2008.
- [18] H. W. Löllmann, "The LOCATA challenge data corpus for acoustic source localization and tracking," *2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, pp. 410-414, 2018.
- [19] H. Wang, "Research on Passive Acoustic Source Direction Finding Based on TDOA," *Recent Developments in Intelligent Computing, Communication and Devices: Springer*, pp. 199-205, 2019.
- [20] A. Hughes, "Acoustic source localization and tracking using microphone arrays," The University of Edinburgh, 2016.
- [21] L. Kraljević, M. Russo, M. Stella, and M. Sikora, "Free-Field TDOA-AOA Sound Source Localization Using Three Sound Field Microphones," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87749-87761, 2020.

هنگامی که علامت‌های ضبط شده بسیار نوفه‌ای بوده یا به شدت انعکاسی می‌شوند، مزایای انتخاب داده بارزتر می‌شود، زیرا این روش توانایی کاهش اثرات مخرب اندازه‌گیری‌های اشتباه تفاوت زمان ورود را بهبود داده است [۸۹]. در بعضی از موارد برای تخمین دقیق‌تر موقعیت منبع به تفاوت زمان ورود علامت منبع به تنهایی اتکا نمی‌شود و از ترکیب ویژگی‌ها و اندازه‌گیری‌های دیگر با تفاوت زمان ورود نیز استفاده می‌شود. برای مثال تفاوت فاز ورود^{۱۳۷} اطلاعات اضافی را فراهم می‌کند که می‌تواند برای افزایش عملکرد موقعیت‌یابی استفاده شود.

در مقاله [۸۰] از تابع هزینه ترکیبی از تفاوت زمان ورود و تفاوت فاز ورود علامت به همراه بهینه‌ساز ازدحام ذرات برای دستیابی برآورد مکان نهایی استفاده می‌شود. اطلاعات تفاوت فاز ورود علامت معمولاً در سناریوهای دوردست که فاصله حسگرها کم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹۴، ۹۵]. برای فاصله زیاد بین حسگرها، اختلاف فاز واقعی علامت بین یک جفت حسگر را نمی‌توان به روش مستقیم محاسبه کرد [۸۰]. همچنین در مرجع [۲۱] راه‌حل شکل بسته برای برآورد مکان منبع صدا بر اساس دو اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود و سه زاویه ورود علامت به سه حسگر استخراج شده است که می‌توان این راه‌حل را به تعداد حسگرهای بیشتر بسط داد. برای مسئله مکان‌یابی منبع متحرک، در مرجع [۹] از ترکیب اندازه‌گیری‌های تفاوت زمان ورود و اختلاف بسامد ورود^{۱۳۸} برای تخمین موقعیت و سرعت منبع استفاده شده است [۸۸]. اختلاف بسامد ورود فقط زمانی قابل استفاده است که بین منبع و حسگرها حرکت نسبی وجود داشته [۸۷، ۸۸]. تفاوت شدت سطح^{۱۳۹}، اطلاعات دیگری است که می‌تواند با مقایسه علامت‌های دریافتی از یک جفت حسگر محاسبه شود. روش‌های پیشنهادی در [۸۶] و [۸۵] با استفاده از اطلاعات تفاوت زمان ورود و تفاوت شدت سطح محل منبع را پیدا می‌کنند و منجر به کاهش تعداد حسگرها می‌شود تا فقط ۲ حسگر در فضای دو بعدی و ۳ حسگر در حالات فضای سه بعدی استفاده شود.

در سناریو واقع بینانه اغلب شرایطی وجود دارد که چندین منبع به‌طور هم‌زمان فعال هستند و نیاز به موقعیت‌یابی هم‌زمان آن‌ها وجود دارد. محققان روش‌های مختلفی را براساس توان پاسخ هدایت بیم و تفاوت زمان ورود برای مکان‌یابی چندین منبع پیشنهاد داده‌اند. باین‌حال برخلاف توان پاسخ هدایت بیم، هیچ یک از روش‌های مکان‌یابی مبتنی بر تفاوت زمان ورود به دلایل چالش‌های ابهام چند منبع، منبع غالب و تفکیک‌پذیری فضایی نمی‌توانند مستقیماً به مکان‌یابی چندین منبع توسعه یابند [۴۵]. اندازه‌گیری‌های تفاوت زمان ورود نسبت به جبران هم‌زمان‌سازی حسگرها بسیار حساس هستند. مهاجمین می‌توانند علامت‌ها را جعل کنند یا تأخیرهای نامتقارن در کانال ارتباطی تزریق کنند. حملات هم‌زمان‌سازی می‌تواند به‌شدت بر روند موقعیت‌یابی تأثیر بگذارد [۹۶].

۶- نتیجه‌گیری

موقعیت‌یابی صوتی، تخمین جهت و یا مختصات منبع صوت از کاربردهای مهم پردازش صوت در سال‌های اخیر است. موقعیت‌یابی صوتی ماشینی کاربردهای فراوانی دارد و هرچه سرعت تخمین مکان به سمت بی‌درنگی حرکت کند و تخمین مکان دقیق‌تر باشد کاربرد بیشتری دارد. روش‌های مبتنی بر دو گوش بیشتر مناسب ربات‌های خانگی است و برای دقت بیشتر از آرایه حسگر جهت بهبود مکان‌یابی استفاده می‌شود. از روش‌های مختلف موقعیت‌یابی، تفاوت زمان ورود علامت به‌علت برخورداری از پیچیدگی کم محاسباتی و سادگی، بهترین روش انتخابی برای منابع صوتی پهن‌بند است که در مقاله به‌طور مشروح بررسی شد. این روش دو مرحله‌ای نگاه‌های بسیاری را به‌سمت خود معطوف کرده است. با استفاده از روش‌های مختلف ابتدا سعی بر تخمین تأخیر زمانی میان جفت حسگرهای آرایه دارد که این مرحله از اهمیت بسیاری در تخمین نهایی موقعیت منبع برخوردار است و در مرحله بعد با استفاده از حل معادلات غیرخطی موقعیت‌منبع را به‌دست می‌آورد. روش‌های

- [46] G. C. Carter, "Coherence and time delay estimation: an applied tutorial for research, development, test, and evaluation engineers, Piscataway," ed: NJ: IEEE Press, 1993.
- [47] C. Knapp, and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976.
- [48] J. Chen, J. Benesty, and Y. Huang, "Time delay estimation using spatial correlation techniques," *Proceedings of the 8th International Workshop Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC'03)*, pp. 207-210, 2003.
- [49] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, "Time-delay estimation via linear interpolation and cross correlation," *IEEE Transactions on speech and audio processing*, vol. 12, no. 5, pp. 509-519, 2004.
- [50] K. Gedalyahu, and Y. C. Eldar, "Time-delay estimation from low-rate samples: A union of subspaces approach," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 6, pp. 3017-3031, 2010.
- [51] H. Khaddour, "A comparison of algorithms of sound source localization based on time delay estimation," *elektrorevue 2*, vol. 2, no. 1, pp. 31-37, 2011.
- [52] L. Chen, Y. Liu, F. Kong, and N. He, "Acoustic source localization based on generalized cross-correlation time-delay estimation," *Procedia engineering*, vol. 15, pp. 4912-4919, 2011.
- [53] R. Hanus, "Time delay estimation of random signals using cross-correlation with Hilbert Transform," *Measurement*, vol. 146, pp. 792-799, 2019.
- [54] Bharathi, B. Marxim Rahula, and A. R. Mohanty. "Time delay estimation in reverberant and low SNR environment by EMD based maximum likelihood method." *Measurement*, vol. 137, pp. 655-663, 2019.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] W. H. Foy, "Position-location solutions by Taylor-series estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 2, pp. 187-194, 1976.
- [58] H. T. FARD, M. Atashbar, Y. Norouzi, and F. H. KASHANI, "Multireference TDOA-based source localization," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 21, no. Sup. 1, pp. 1920-1929, 2013.
- [59] J. Smith, and 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.
- [60] R. O. Schmidt, "A new approach to geometry of range difference location," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 6, pp. 821-835, 1972.
- [61] B. Friedlander, "A passive localization algorithm and its accuracy analysis," *IEEE Journal of Oceanic engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 234-245, 1987.
- [62] H. Schau, and A. Robinson, "Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 8, pp. 1223-1225, 1987.
- [63] J. Smith, and J. Abel, "The spherical interpolation method of source localization," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 246-252, 1987.
- [64] J. S. Abel, "A divide and conquer approach to least-squares estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 423-427, 1990.
- [65] S. Haykin, "Adaptive filter theory," Pearson Education India 1996.
- [66] B. T. Fang, "Simple solutions for hyperbolic and related position fixes," *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, vol. 26, no. 5, pp. 748-753, 1990.
- [67] Y. T. Chan, and K. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, 1994.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] K. W. Cheung, H. C. So, W. K. Ma, and Y.-T. Chan, "A constrained least squares approach to mobile positioning: algorithms and optimality,"
- [22] W. Dan, L. Yan, and X. Shujie, "Broadband DOA Estimation Based on Nested Arrays," *Proceedings of the 2nd International Conference on Telecommunications and Communication Engineering*, pp. 87-91, 2018.
- [23] W. Yu, N. D. Gaubitch, and R. Heusdens, "Distributed TDOA-based indoor source localization," *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 6887-6891, 2018.
- [24] A. Spriet, "Adaptive filtering techniques for noise reduction and acoustic feedback cancellation in hearing aids," 2004.
- [25] T. Dutoit, and F. Marques, "Applied Signal Processing: A MATLAB-based proof of concept," *Springer Science & Business Media*, 2010.
- [26] P. Stoica, "Introduction to spectral analysis," Prentice hall, 1997.
- [27] I. Ziskind, and M. Wax, "Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 36, no. 10, pp. 1553-1560, 1988.
- [28] Z. Xu, N. Liu, and B. M. Sadler, "A simple closed-form linear source localization algorithm," *MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7, 2007.
- [29] A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, "Infrasound monitoring for atmospheric studies," *Springer Science & Business Media*, 2010.
- [30] Y. Li, "Broadband beamforming and direction finding using concentric ring array," University of Missouri--Columbia, 2005.
- [31] R.E. Slyh, R.L. Moses, and T.R. Anderson, "Analysis/synthesis-based microphone array speech enhancer with variable signal distortion," *Google Patents*, 1996.
- [32] S. Lang, M. Kleinhagenbrock, S. Hohenner, J. Fritsch, G.A. Fink, and G. Sagerer, "Providing the basis for human-robot-interaction: A multi-modal attention system for a mobile robot," *Proceedings of the 5th international conference on Multimodal interfaces*, pp. 28-35, 2003.
- [33] H. Chen, C. Liu, and Q. Chen, "Efficient and robust approaches for three-dimensional sound source recognition and localization using humanoid robots' sensor arrays," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 4, p.1729881420941357, 2020.
- [34] M. Raspaud, H. Viste, and G. Evangelista, "Binaural source localization by joint estimation of ILD and ITD," *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, vol. 18, no. 1, pp. 68-77, 2009.
- [35] B. A. Wright, and M. B. Fitzgerald, "Different patterns of human discrimination learning for two intermural cues to sound-source location," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 21, pp. 12307-12312, 2001.
- [36] P. Yang, Q. Xu, and L. Zu, "Auditory system design based on mobile robot," *2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, pp. 265-268, 2009.
- [37] S. Lee, Y. Park, and J.-S. Choi, "Estimation of multiple sound source directions using artificial robot ears," *Applied acoustics, Elsevier*, vol. 77, pp. 49-58, 2014.
- [38] A. Pourmohammad, and S. M. Ahadi, "TDE-ILD-HRTF-Based 2D Whole-Plane Sound Source Localization Using Only Two Microphones and Source Counting," *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 3, p. 307, 2012.
- [39] H. L. Van Trees, "Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory," John Wiley & Sons, 2004.
- [40] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [41] 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*, vol. 20, no. 12, p. 3553, 2020.
- [42] Y. Jiang, Q. Hu, and D. Yang, "Analysis of positioning error for two-dimensional location system," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, 2013.
- [43] A. Canclini, P. Bestagini, F. Antonacci, M. Compagnoni, A. Sarti, and S. Tubaro, "A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 23, no. 10, pp. 1563-1575, 2015.
- [44] 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.
- [45] R. Boora, and S. K. Dhull, "A TDOA-based multiple source localization using delay density maps," *Springer*, vol. 45, no. 1, pp. 1-12, 2020.

- [89] J. A. Apolinário, H. Yazdanpanah, A. Nascimento, and M. L. de Campos, "A Data-selective LS Solution to TDOA-based Source Localization," *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 4400-4404, 2019.
- [90] Z. Zhou, Y. Rui, J. Zhou, L. Dong, L. Chen, X. Cai, and R. Cheng, "A new closed-form solution for acoustic emission source location in the presence of outliers," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, p. 949, 2018.
- [91] S. J. Arrowsmith et al., "Regional monitoring of infrasound events using multiple arrays: application to Utah and Washington State," *Geophysical Journal International*, vol. 175, no. 1, pp. 291-300, 2008.
- [92] R. J. Kozick, and B. Sadler, "Source localization with distributed sensor arrays and partial spatial coherence," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 3, pp. 601-616, 2004.
- [93] L. Dong, "Some developments and new insights for microseismic/acoustic emission source localization," *Shock and Vibration*, Hindawi, vol. 2019, 2019.
- [94] T. Ballal and C. J. Bleakley, "Phase-difference ambiguity resolution for a single-frequency signal," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 853-856, 2008.
- [95] H. Chen, T. Ballal, M. Saad, and T. Y. Al-Naffouri, "Angle-of-arrival-based gesture recognition using ultrasonic multi-frequency signals," *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE, pp. 16-20, 2017.
- [96] M. Delcourt, Le Boudec, and Jean-Yves, "TDOA Source-Localization Technique Robust to Time-Synchronization Attacks," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2020.
- [71] L. Lin, H.-C. So, F.K. Chan, Y.-T. Chan, and K. Ho, "A new constrained weighted least squares algorithm for TDOA-based localization," *Signal Processing, Elsevier*, vol. 93, no. 11, pp. 2872-2878, 2013.
- [72] X. Qu, and L. Xie, "Source localization by TDOA with random sensor position errors—part I: static sensors," *2012 15th International Conference on Information Fusion, IEEE*, pp. 48-53, 2012.
- [73] K. Yang, J. An, X. Bu, and G. Sun, "Constrained total least-squares location algorithm using time-difference-of-arrival measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1558-1562, 2009.
- [74] X. Qu, and L. Xie, "An efficient convex constrained weighted least squares source localization algorithm based on TDOA measurements," *Signal Processing, Elsevier*, vol. 119, pp. 142-152, 2016.
- [75] 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.
- [76] D. Carevic, "Automatic estimation of multiple target positions and velocities using passive TDOA measurements of transients," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 2, pp. 424-436, 2007.
- [77] J. Schroeder, S. Galler, and K. Kyamakya, "A low-cost experimental ultra-wideband positioning system," *2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 632-637, 2005.
- [78] G. Wang, Y. Li, and N. Ansari, "A semidefinite relaxation method for source localization using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 853-862, 2012.
- [79] K. Yang, G. Wang, and Z. Luo, "Efficient convex relaxation methods for robust target localization by a sensor network using time differences of arrivals," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 57, no. 7, pp. 2775-2784, 2009.
- [80] H. Chen, T. Ballal, N. Saeed, M. S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "A Joint TDOA-PDOA Localization Approach Using Particle Swarm Optimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020.
- [81] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle swarm optimization. *Encycl.*" *IEEE*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [82] N. Strobel, S. Spors, and R. Rabenstein, "Joint audio-video signal processing for object localization and tracking," *Microphone Arrays, Springer*, pp. 203-225, 2001.
- [83] D. B. Ward, E. A. Lehmann, and R. C. Williamson, "Particle filtering algorithms for tracking an acoustic source in a reverberant environment," *IEEE Transactions on speech and audio processing*, vol. 11, no. 6, pp. 826-836, 2003.
- [84] A. K. Z. Tehrani, B. Makkiabadi, A. Pourmohammad, and S. H. Hozhabr, "Sound source localization using time differences of arrival; Euclidean distance matrices-based approach," *2018 9th International Symposium on Telecommunications (IST)*, IEEE, pp. 91-95, 2018.
- [85] A. Pourmohammad, and S. M. Ahadi, "TDE-ILD-based 2D half plane real time high accuracy sound source localization using only two microphones and source counting," *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, IEEE*, vol. 1, pp. V1-566, 2010.
- [86] A. Pourmohammad, and S. M. Ahadi, "N-dimensional N-microphone sound source localization," *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, Springer*, vol. 2013, no. 1, p. 27, 2013.
- [87] K. Ho, X. Lu, and L. Kovavisaruch, "Source localization using TDOA and FDOA measurements in the presence of receiver location errors: Analysis and solution," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 2, pp. 684-696, 2007.
- [88] K. Ho and W. Xu, "An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 9, pp. 2453-2463, 2004.

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

¹⁰ Localization

¹¹ Machine Hearing

¹² Big Acoustic Data (BAD)

¹³ Volume

¹⁴ Value

¹⁵ Complexity

¹⁶ Propagation Environment

¹⁷ Large-scale acoustic data

¹⁸ Passive Acoustic Data

¹⁹ Environmental Sounds

¹ Real-time Embedded Systems

² Internet of Things (IoT)

³ Internet of Multimedia Things (IoMT)

⁴ Hard Real-time System

⁵ Soft Real-time System

⁶ Firm Real-time System

⁷ Noise

⁸ Acoustic

⁹ Umbral Auditive

-
- 20 Natural Noise
 21 Artificial noise
 22 Transient Events
 23 Source
 24 Sink
 25 Microphone
 26 Direction
 27 Ranging
 28 Indoor/Outdoor
 29 Navigation
 30 Active
 31 Passive
 32 Neurons
 33 Sniper
 34 Unmanned Aerial Vehicles (UAV)
 35 Environmental Sounds
 36 Sensor
 37 Natural Noise
 38 Artificial Noise
 39 Synchronization
 40 Adiabatic
 41 Analog
 42 Digital
 43 Azimuth
 44 Elevation
 45 Global Positioning System (GPS)
 46 Impulsive
 47 Continues
 48 Infrasound
 49 Ultrasound
 50 Narrowband
 51 Broadband
 52 Convolution
 53 Electric
 54 Electroacoustic
 55 Time Delay Estimation
 56 Beamforming
 57 Maximum Likelihood
 58 Subspace Signal
 59 Monaural Cues
 60 Binaural Cues
 61 Head-Related Transfer Function (HRTF)
 62 Filter
 63 Interaural Level Difference
 64 Interaural Time Difference
 65 High Resolution
 66 Parameter
 67 Eigenvalue
 68 Multiple Signal Classification (MUSIC)
 69 Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (ESPRIT)
 70 Correlation matrix
 71 Coherent
 72 Non-Coherent
 73 Direction of Arrival (DOA)
 74 Covariance matrix
 75 Time Difference of Arrival (TDOA)
 76 Beam Steered Response Power
 77 Synchronous
 78 Classical Cross-Correlation (CC)
 79 General Cross Correlation (GCC)
 80 Multi-channel Cross-Correlation Coefficient (MCCC)
- 81 Spatial Linear Prediction Method
 82 Second Order Statistics
 83 Eigenvector-based techniques
 84 Fast Fourier Transform (FFT)
 85 Maximum Likelihood (ML)
 86 Phase Transform (PHAT)
 87 Smooth Coherence Transform (SCOT)
 88 Echart
 89 Roth
 90 Hilbert Transform (HT)
 91 Empirical Mode Decomposition (EMD)
 92 Least-Squares (LS)
 93 Iterative
 94 Closed Form
 95 Friedlander
 96 Spherical Intersection (SX)
 97 Spherical Interpolation (SI)
 98 Divide and Conquer
 99 Fisher Information Matrix
 100 Fang
 101 Chan
 102 Linear Least Squares
 103 Linear Weighted Least Squares
 104 Constrained Weighted Least Squares (CWLS)
 105 Separated Constrained Weighted Least Squares (SCWLS)
 106 Constrained Weighted Least Squares (CWLS)
 107 Constrained Total Least Squares (CTLS)
 108 Two-Step Constrained Total Least-Squares
 109 Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM)
 110 Non-Convex Optimization
 111 Convex relaxation
 112 Newton-Raphson (NR)
 113 Firefly Algorithm (FA)
 114 Particle Swarm Optimizer (PSO)
 115 Kalman
 116 Euclidean Distance Matrix (EDM)
 117 Angle of Arrival (AoA)
 118 Free-Field
 119 High Accuracy
 120 Cone Tangent Plane Constraint
 121 Robustness
 122 Hybrid Firefly Algorithm
 123 Iteration
 124 Algebraic Method
 125 Computationally Efficient
 126 Good Performance
 127 Data Selection
 128 Decrease Computation
 129 Preconditioned Closed-form Weight Estimation (PCWE)
 130 Optimal Location
 131 Iterative Minimization
 132 Euclidean Distance Matrices
 133 Stable
 134 Works in Different SNR Conditions
 135 Convex Constrained Weighted Least Squares
 136 High Efficiency
 137 Phase Difference of Arrival (PDOA)
 138 Frequency Difference of Arrival (FDOA)
 139 Intensity Level Difference (ILD)

Acoustic Target Localization Broadband Methods based on Time Difference of Arrival Approach - A Survey

Zahra Heydari^{1,2} Aminollah Mahabadi^{1,2}

¹ Computer Engineering Department, Shahed University, Tehran, Iran

² Acoustic Research Center, Shahed University, Tehran, Iran

Abstract

Sound localization is one of the main characteristics of humans and creatures that respond to this process through the power and sensitivity of their sensitive hearing. Orientation and localization of acoustic sources by sensor systems are important research topics in signal processing. The automatic positioning system of acoustic sources faces several challenges, the accuracy of estimating the source coordination and the real-time speed finding is difficult. The time difference between arrival sound signals is the key factor due to the low computational complexity and the simplicity of the approach for big acoustic data. This survey focuses on these methods and challenges by analyzing the basics of the time difference of the arrival (TDOA) approach. Also, the state-of-the-art algorithms and important TDOA methods will compare in terms of sound basics, positioning techniques, localization algorithms, sound sensor architecture, and their existing challenges.

Keywords: Sound Localization; Sound Direction Finding; Time Difference of Arrival (TDOA); Acoustic Sensor; Broadband.