مقاله پژوهشی

مجله انجمن مهندسی صوتیّات ایران
سال ۱۳۹۹، دوره: ۸، شماره: ۲، صفحات: ۶۰-۷۷

تأثیر ترکیب انرژی و درون‌یابی بر دقت مکان‌یابی در فضای اندرون بر پایه تقارن زمان ورود علامت گفتار

زهرا حیدری[۱، ۳]، امین‌اله مه‌آبادی*[۱، ۳]، اکبر رنجبر[۲، ۳]

۱. گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
۲. گروه مهندسی الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد
۳. مرکز تحقیقات آکوستیک، دانشگاه شاهد

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۶

چکیده

موقعیت‌یابی بی‌درنگ منابع صوتی روشی سخت و از چالش‌های پیچیدگی محاسباتی، وجود نوفه، انعکاس و معماری چیدمان حسگرها برخوردار است. از روش تفاوت زمان ورود علامت به‌دلیل سادگی و پیچیدگی کم محاسباتی، استفاده می‌شود و در صورت ترکیب نسبت انرژی علامت‌های ورود با تفاوت زمان ورود، نتایج آن تا حدودی بهبود می‌یابد. در این مقاله روشی برای تخمین محل منبع گفتار در فضای سه‌بعدی، جهت محاسبه تأخیر زمان ورود علامت‌ها و مقاومت در برابر نوفه و انعکاس برای تیز شدن قلّه همبستگی علامت‌ها پیشنهاد شده است. این روش ضمن استفاده از چیدمان مناسب حسگرها و بکارگیری صافی طیف فاز با توان بهبوددهنده در کنار درون‌یابی اسپلاین مکعبی، جهت برخورداری از سرعت بالای حل دستگاه‌های معادلات غیرخطی، از الگوریتم‌های چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای ترکیبی با نسبت انرژی علامت‌های ورود به حسگر مبنا بهره برده است. میانگین خطای فاصله مستقیم مختصات تخمینی از اصلی تمامی سنجش‌ها در چیدمان منتخب آرایه در روش چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای ترکیبی با انرژی به‌ترتیب ۱۰٫۹۴ و ۱۰٫۱۸۵ سانتی‌متر است. نتایج آزمون روی داده‌های واقعی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که درون‌یابی همبستگی متقابل و ترکیب نسبت انرژی با تفاوت زمان ورود در خطای مطلق فاصله از موقعیت اصلی منبع، مؤثر است.

کلیدواژه‌ها: موقعیت‌یابی منبع صدا، تقارن زمان ورود علامت، الگوریتم وزن‌دار مربع خطای، نسبت انرژی علامت، درون‌یابی.

۱. مقدمه

موج صوتی در هر راستا منتشر می‌شود؛ تاریکی و محدودیت بصری بر روی آن اثر ندارد؛ سامانه‌های مکان‌یابی صوتی انرژی کمی مصرف می‌کنند؛ با علامت‌های برقامغناطیسی[۱] تداخل ندارند و اغلب به صورت غیرفعال[۲] کار می‌کنند. صوتیّات[۳] یا دانش صدا شامل تولید، انتقال و تأثیرات صدا در محیط و پردازش سریع موج صوتی از مباحث مهم در پردازش علامت است [۱]. مکان‌یابی منابع صوتی به کمک سامانه‌های حسگری از موضوعات تحقیقاتی پرسابقه می‌باشد که در کاربردهای مختلف مهندسی مانند اتاق‌های کنفرانس هوشمند[۴]، نظارت ترافیک، صنایع نظامی و ردیابی گوینده مفید است [۲-۳]. مکان‌یابی صوتی به‌صورت فعال[۵] و غیرفعال انجام می‌شود که در سامانه مکان‌یابی غیرفعال، علامتی در فضا منتشر نمی‌گردد و به‌سادگی قابل کشف نیست. با توجه به ویژگی‌های طرح شده، از مکان‌یابی صوتی به جای رادار[۶] استفاده می‌شود [۴-۵]. روش تفاوت زمان ورود[۷] از جمله روش‌های تخمین تأخیر زمان[۸] است که در این مقاله از آن استفاده شده است. دلیل گرایش به این روش، سادگی روش، پیچیدگی کم محاسباتی و زمان پایین اجرا نسبت

* نویسنده پاسخگو: mahabadi@shahed.ac.ir

[1] Electromagnetism
[2] Passive
[3] Acoustics
[4] Smart conference room
[5] Active
[6] Radar
[7] TDOA; Time Difference of Arrival
[8] Time delay estimation

به سایر روش‌ها است. از طرفی به واسطه ترکیب اندازه‌گیری‌های انرژی و تفاوت زمان ورود علامت و درون‌یابی، دقت مختصات تخمینی حاصل افزایش می‌یابد. مکان‌یابی منبع به‌صورت غیرفعال یک موضوع تحقیقاتی مهم در چند دهه اخیر است. حل مسئله مکان‌یابی، تخمین موقعیت منبع صوتی از اندازه‌گیری‌ها[1] به‌واسطه استفاده از روش‌های مختلف مانند تفاوت زمان ورود، زاویه‌های ورود[2] و قدرت علامت دریافتی[3] مسئله چالش برانگیزی است، زیرا اندازه‌گیری‌ها به‌صورت غیرخطی با عناصر مکان منبع صوتی مرتبط هستند. اندازه‌گیری‌ها می‌توانند به صورت جداگانه یا مشترک برای مکان‌یابی منبع استفاده شوند [۶]. اگر بین منبع و حسگرها حرکت نسبی وجود داشته باشد، می‌توان از اختلاف بسامد ورود[4] برای بهبود دقت تخمین استفاده کرد [۷-۸]. اخیراً، علاقه زیادی به استفاده از قدرت علامت دریافتی در حسگرهای مختلف برای مکان‌یابی منبع صوتی به‌وجود آمده است. این انگیزه از این واقعیت ناشی می‌شود که انرژی علامت دریافت شده با فاصله مربع بین منبع و حسگر متناسب است. به‌دلیل تفکیک فضایی حسگرها، علامت منبع با انرژی‌های مختلف به حسگرها می‌رسد تا بتوان از اختلاف انرژی برای مکان‌یابی منبع استفاده کرد [۹].

در این پژوهش ترکیب انرژی و الگوریتم مکان‌یابی مبتنی بر تفاوت زمان ورود در مختصات دکارتی که در مرجع [۹] پیشنهاد شده، روی الگوریتم چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته بسط داده شده است. اندازه‌گیری‌های انرژی برای منابع صوتی نزدیک به حسگرهای صوتی مناسب‌تر نسبت به منابع صوتی دورتر از حسگرهای صوتی است [۶]. کوی و همکاران در مرجع [۱۰] ترکیب تفاوت زمان ورود و قدرت علامت دریافتی را با هم برای یافتن منبع دوبعدی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از یک جفت حسگر صوتی از یک اندازه‌گیری تفاوت زمان ورود و یک اندازه‌گیری اختلاف سطح شنیداری[5] استفاده کردند. هو و سان [۹] استفاده از نسبت‌های دامنه ورود علامت[6]، که به صورت نسبت دامنه علامت دریافتی به حسگر مبنا تعریف شده است، همراه با تفاوت زمان ورودها برای تعیین محل منبع را مورد مطالعه قرار دادند. مربع نسبت‌های دامنه ورود علامت‌ها اساساً نسبت انرژی است. آن‌ها دریافتند که ترکیب نسبت‌های دامنه ورود در روش‌های مبتنی بر تفاوت زمان ورود می‌تواند به بهبود دقت مکان‌یابی کمک کند. یک علامت منبع با رسیدن به تعدادی از حسگرهای فضایی از هم جدا، تحت تأخیر زمانی و هم‌چنین تنکش (تضعیف) قرار می‌گیرد. تأخیر زمانی و میرایی به فاصله بین منبع و حسگرها بستگی دارد [۹]. دقت مکان‌یابی مستقیماً تحت تأثیر دقت تفاوت زمان ورودها است که با کم شدن پهنای باند علامت منبع کاهش می‌یابد [۹].

مکان‌یابی با تفاوت زمان ورود و قدرت علامت هنگام دریافت توسط تعدادی از حسگرهای جدا از هم در فضا در مرجع [۱۱] بررسی شده و نتایج نشان داده‌اند که نسبت‌های دامنه ورود علامت حساسیت زیادی به فاصله هدف دارد، اما روی‌کرد مشترک آن با تفاوت زمان ورود دارای معایب کم‌تری است. در مرجع [۱۲]، روش مکان‌یابی منبع سه‌بعدی حداقل مربعات محدود[7] برای شبکه‌های حسگر صوتی ارائه شده است و روش پیشنهادی آن از زوایای ورود و نسبت‌های ورود علامت به‌طور هم‌زمان در هر گره برای اندازه‌گیری موقعیت منبع به‌طور مشترک استفاده می‌کند. در مرجع [۱۳]، یک روش مکان‌یابی منبع غیرفعال توزیع شده با استفاده از تفاوت زمان ورود و اندازه‌گیری نسبت‌های ورود علامت پیشنهاد می‌شود به‌طوری‌که پس از حذف عناصر ناشناخته در معادلات تفاوت زمان ورود با استفاده از اندازه‌گیری نسبت‌های ورود علامت، روش پیشنهادی از حداقل مربعات وزنی دو مرحله‌ای استفاده می‌کند و چالش اصلی آن در غیرخطی بودن الگوهای اندازه‌گیری توزیع شده بدون حسگر مبنا مشترک است.

مرجع [۱۴]، با استفاده از اندازه‌گیری‌های مشترک تفاوت زمان ورود، نسبت‌های دامنه ورود و زاویه ورود علامت، یک چارچوب مکان‌یابی منبع ایجاد کرده است و بیان

[1] Measurements
[2] AOA; Angle of Arriaval
[3] RSS; Received Signal Strength
[4] FDOA; Frequency Difference of Arrival
[5] ILD; Interaural Level Difference
[6] GROA; Gain Ratios of Arrival
[7] Constrained least-squares

می‌کند در صورتی که مقدار انسجام فضایی در میان حسگرهای آرایه کم و سرعت انتشار علامت زیاد باشد، بهبود دقت مکان‌یابی از طریق نسبت‌های دامنه ورود علامت افزایش می‌یابد. چندین مزیت در مورد افزودن نسبت دامنه ورود علامت به تفاوت زمان ورود برای تخمین مکان منبع وجود دارد. اولاً، وقتی پهنای باند علامت منبع باریک است یا سرعت انتشار زیاد است، دقت تفاوت زمان ورود به شدت کاهش می‌یابد، در حالی‌که از نسبت دامنه ورود علامت به میزان کم‌تری کاسته می‌شود. ثانیاً، معمولاً از تفاوت زمان ورود برای استخراج روش و به‌دست آوردن موقعیت منبع استفاده می‌شود، بنابراین خطای تخمین تفاوت زمان ورود وقتی ضرب در سرعت انتشار علامت شود، می‌تواند تقویت شود، اما نسبت دامنه ورود نیازی به این مورد ندارد [۹]. به‌منظور حل اثر محصور شدن ناشی از تعداد ثابت نقاط نمونه‌برداری[1] در سامانه مکان‌یابی تفاوت زمان ورود غیرفعال در کاربردهای عملی، یک الگوریتم تخمین تأخیر زمانی براساس درون‌یابی اسپلاین مکعبی[2] پیشنهاد شده است. این الگوریتم از درون‌یابی اسپلاین مکعبی برای درون‌یابی منحنی قلّه طیفی تابع همبستگی استفاده می‌کند. در نتیجه دقت مقدار قلّه و برآورد دقیق تأخیر زمانی منبع علامت بهبود می‌یابد [۱۵].

یکی از فن‌های رایج، درون‌یابی سهموی است. متأسفانه، در درون‌یابی سهموی نسبت علامت ورود به نوفه[3] کم، برخی از مشکلات را به وجود می‌آورد، که منجر به تخریب شدید عملکرد سامانه می‌شود [۱۶]. این روش می‌تواند مکان زیر نمونه را تعیین کند که بیشینه تابع همبستگی را نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر با رشد فن‌اوری و تمایل به خودکارسازی بررسی و حل مشکلات مکالمات در فضای بسته مانند اتاق کنفرانس بسیار مورد توجه است. هدف این مقاله تعیین بی‌درنگ[4] محل منبع صوتی با موقعیت ثابت در فضای بسته به‌همراه حل چالش‌های نوفه و انعکاس جهت افزایش دقت مختصات تخمینی و کاهش پیچیدگی زمان اجرا است. مطالعات انجام شده (از سال ۱۹۷۶ تاکنون) نشان می‌دهند که روش‌های مبتنی بر حل معادلات غیرخطی هذلولی حاصل از تأخیر زمانی بین حسگرها، یکی از پرکاربردترین روش‌های مکان‌یابی هستند. از مزایای روش مکان‌یابی هذلولی، می‌توان به مقاوم بودن نتایج آن در برابر ورودی‌های آغشته به نوفه اشاره نمود.

در سال ۱۹۹۴، چان برای حل معادلات هذلولی، پاسخی به شکل بسته[5] که تخمین‌گر بیشینه درست‌نمایی[6] بود، استفاده نمود. این روش با فرض کوچک بودن خطای تخمین تأخیر زمانی بین حسگرها قابل استفاده می‌باشد [۱۷]. در این راستا دو روش مهم چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته[7] به جهت عدم نیاز به مقادیر اولیه دقیق و صرف نکردن زمان زیاد بالعکس روش سری تیلور، انتخاب و پیاده‌سازی شده و در برابر چالش‌های نوفه و انعکاس تا حدودی مقاوم‌سازی شده و از سرعت بی‌درنگ برخوردار است. در این مقاله نسبت به مقاله [۱۸] تأثیر درون‌یابی همبستگی متقابل علامت‌ها نسبت به علامت مبنا، الگوریتم چان و مربع وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته و ترکیب الگوریتم‌های شکل بسته با نسبت انرژی علامت‌ها جهت حل معادلات غیرخطی هذلولی حاصل و بهبود دقت مختصات دکارتی بررسی شده است.

در ادامه مقاله و در بخش ۲، به بررسی مواد و روش‌ها شامل دو مرحله محاسبه تأخیر و حل معادلات غیرخطی پرداخته شده است. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی و سنجش‌های تجربی ارائه می‌شود. در بخش ۴ و ۵ به‌ترتیب بحث و نتیجه‌گیری بیان می‌شوند.

۲. مواد و روش‌ها

در روش پیشنهادی از دو مرحله ترکیب تفاوت زمان ورود و انرژی علامت صوتی استفاده شده که نمودار بلوکی[8] آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. اکثر روش‌های مکان‌یابی از پردازش دو مرحله‌ای استفاده می‌کنند که در آن ابتدا عناصر موقعیت‌یابی برآورد می‌شوند و سپس موقعیت منبع

[1] Sampling
[2] CSI; Cubic Spline Interpolation
[3] SNR; Signal to Noise Ratio
[4] Real-time
[5] Closed form
[6] Maximum likelihood estimation
[7] ITSWLS; Improved Two-Step Weighted Least Squares
[8] Block diagram

با توجه به این عناصر تخمینی، تعیین می‌شود [۱۹]. در شکل ۱ پس از دریافت علامت به‌واسطه حسگرها و رقومی شدن آن‌ها، جهت افزایش سرعت محاسبات به حوزه بسامد ورود می‌شود. در مرحله اول همبستگی هر علامت با علامت حسگر مبنا محاسبه می‌شود و پس از آن به حوزه زمان ورود می‌شود. سپس روی نتایج مرحله قبل درون‌یابی اسپلاین مکعبی اعمال می‌شود؛ مکانی که بیشینه مقدار گام قبل در آن رخ داده است، میزان تأخیر دریافت هر حسگر نسبت حسگر مبنا است و سپس نسبت دامنه هر علامت نسبت به علامت مبنا که با نسبت انرژی آن‌ها در رابطه است به‌دست می‌آید. در مرحله دوم توسط دو الگوریتم چان ترکیبی با نسبت انرژی[1] و حداقل مربعات دو مرحله‌ای وزن‌دار بهبودیافته[2] ترکیبی با نسبت انرژی، تخمین مکان گوینده صورت می‌گیرد. روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها علاوه بر افزایش دقت تخمین تأخیر حسگرها نسبت به حسگر مبنا به واسطه توان بهبوددهنده و درون‌یابی اسپلاین، در تخمین موقعیت منبع صوتی نیز با ترکیب انرژی و تفاوت زمان ورود عملکرد مناسبی دارد و از سرعت بالای محاسبات برخوردار است. شرح هر کدام از مراحل در ادامه بیان می‌شود.

شکل ۱ نمودار بلوکی روش پیشنهادی.

[1] CHAN-EIB; CHAN-Energy-Interpolation-Based
[2] ITWS-EIB; Improved Two-Step Weighted Least Squares-Energy- Interpolation-Based

مرحله اول (روش تفاوت زمان ورود با استفاده از همبستگی متقابل به همراه دورن‌یابی)؛ 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 [۲۰]. از طرفی به‌واسطه تخمین اختلاف زمانی هر علامت حسگر نسبت به حسگر مبنا و رابطه آن با انرژی، می‌توان نسبت انرژی هر حسگر را نسبت به حسگر مبنا به‌دست آورد. الگوریتم‌های ارائه‌شده برای محاسبه زمان تأخیر، مسأله مورد نظر را با فرض وجود یک منبع و الگوی انتشار تک مسیری حل نموده و در نهایت نتایج حاصل را به سایر حالات تعمیم می‌دهند که مسلماً به‌دلیل این‌که سنجش‌های ما داخل اتاق صورت گرفته الگوی انتشار به واسطه حضور پدیده انعکاس، الگوی تک مسیری نبوده و دارای انعکاس می‌باشد. 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.

$$x_1(t) = s(t) + \xi_1(t)$$
$$x_i(t) = \frac{1}{g_{i1}} s(t - d_{i1}) + \xi_i(t), \quad i = 2, 3, \ldots, M \qquad (1)$$

که در آن $s(t)$ علامت منبع، d_{i1} و g_{i1} به‌ترتیب تأخیر زمانی و ضریب تنکش (انرژی) علامت دریافتی i نسبت به علامت مبنا ۱ است. M تعداد حسگرهای آرایه است. ξ_1 نوفه جمع‌شونده است که با علامت منبع و نوفه‌های دیگر ناهمبسته می‌باشد. برای محاسبه مقدار تأخیر بین دو علامت، با اعمال تابع همبستگی متقابل به آن‌ها، مقدار شباهت آن‌ها نسبت به یکدیگر به‌دست می‌آید. در عمل به خاطر افزایش سرعت محاسبات، برای محاسبه تأخیر بین هر جفت حسگر عملیات در حوزه بسامد انجام می‌شود. استفاده از روش همبستگی متقابل برای محاسبه مقدار تأخیر بین دو علامت، آرمانی نبوده و در صورت وجود نوفه و یا انعکاسات محیطی دقت پایینی دارد. برای افزایش کارایی این روش و کاهش تأثیر چالش‌های ذکر شده، صافی طیف فاز با توان بهبوددهنده در نظر گرفته شده است. مقدار همبستگی متقابل دو علامت با استفاده از

تبدیل فوریه آن‌ها به‌دست می‌آید که در رابطه ۲ نمایش داده شده است و با اعمال صافی $\Psi_g(\omega)$ به‌صورت رابطه ۳ می‌شود. رابطه ۴ صافی طیف فاز با توان بهبوددهنده را نمایش می‌دهد.

$$G_{x_1x_i}(\omega) = X_1(\omega)X_i^{'}(\omega),\ i = 2,3,\dots,M \quad (2)$$

$$R_{x_1x_i}(\omega) = \Psi_g(\omega)G_{x_1x_i}(\omega) \quad (3)$$

$$\Psi_g(\omega) = \frac{1}{\left|G_{x_1x_i(\omega)}\right|^{\beta}},\ \beta = 0.5 \quad (4)$$

ω در روابط ۲ تا ۴، نشان دهنده بسامد است. X_1 و $X_i^{'}$ در رابطه ۲ به‌ترتیب تبدیل فوریه علامت حسگر مبنا و مزدوج[1] تبدیل فوریه علامت‌های سایر حسگرها هستند. β در رابطه ۴، توان بهبوددهنده صافی طیف فاز می‌باشد [۲۱] که مقدار آن بنابر تجربه انتخاب شده است. سپس رابطه ۴ با استفاده از عکس تبدیل فوریه سریع[2] از حوزه بسامد به زمان منتقل می‌شود ($R_{x_1x_i}(\omega) \overset{ifft}{\Rightarrow} R_{x_1x_i}(\tau)$).

در مرحله بعد، در محدوده ۱۰۰ داده قبلی و بعدی مقدار بیشینه تابع $R_{x_1x_i}(\tau)$، به‌واسطه‌ی درون‌یابی اسپلاین مکعبی ۱۰۰ داده بین هر دو داده اضافه می‌شود. 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 یک چندجمله‌ای تکه‌ای است که یک اسپلاین نامیده می‌شود. 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. البته در صورتی که روی علامت دریافتی حسگرها نوفه شدیدی اعمال شود ممکن است درون‌یابی عملکرد خوبی نداشته باشد اما در این مقاله با توجه به تمایل به سرعت بالای الگوریتم‌ها از روش‌های رفع نوفه در محیط بسته صرف نظر شده است. با توجه به این‌که، مکان منبع صوتی در داخل یک محیط کوچک است، در نتیجه میزان تأخیرها به شدت باید کم باشد؛ پس 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 منفی می‌باشد، چون موج صوتی به حسگر ثانویه زودتر از حسگر مبنا رسیده است.

مرحله دوم (روش‌های حل‌معادلات غیرخطی هذلولی)؛ برای محاسبه مکان منبع با استفاده از تأخیرها، باید معادلاتی تشکیل شود که به صورت غیرخطی هذلولوی بوده و از محاسبه محل تقاطع آن‌ها، محل منبع مشخص می‌گردد. در ادامه دو روش چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با اندازه‌گیری‌های انرژی که دارای پیچیدگی محاسباتی کمی هستند بررسی می‌شوند. مختصات دکارتی منبع صوتی و حسگرها در فضای سه‌بعدی به‌ترتیب با $[x_s, y_s, z_s]$ و $[x_i, y_i, z_i], (i = 1,2\dots)$ نمایش داده می‌شود. فاصله بین هر دو حسگر طبق رابطه ۵ است که در آن c همان سرعت صوتی بر حسب متر بر ثانیه و τ_{i1}، تأخیر بین دو جفت حسگر i و ۱ است. هم‌چنین r_i و r_1 به‌ترتیب، فاصله حسگر i از منبع صوتی و فاصله حسگر مبنا (حسگر ۱) از منبع صوتی هستند.

$$r_{i1} = c * \tau_{i1} = r_i - r_1 = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2} \quad (5)$$

از طرفی برای محاسبه نسبت دامنه حسگرها به حسگر مبنا می‌توان از رابطه آن با انرژی طبق رابطه ۶ استفاده نمود.

$$g_{i1} = \frac{r_i}{r_1} = \sqrt{\frac{E_1}{E_i}}, (i = 2\dots, M)$$
$$E_1 = \frac{\sum |x_1(t)|}{length(x_1(t))},\ E_i = \frac{\sum |x_i(t)|}{length(x_i(t))} \quad (6)$$

E_1 و E_i به‌ترتیب انرژی علامت دریافتی حسگر i و انرژی علامت دریافتی حسگر مبنا هستند. Σ، جمع‌کننده تمامی درایه‌های ماتریس علامت دریافتی حسگر مورد نظر است و

[1] Conjugate
[2] IFFT; Inverse Fourier Fast Transform

length نیز طول علامت را محاسبه می‌کند. M تعداد حسگرهای آرایه است.

در رابطه ۵، τ_{i1} تأخیرهای تخمینی مرحله اول است. به این ترتیب مجهولات مختصات منبع را می‌توان به‌دست آورد. در استفاده از حسگرها، باید به این نکته نیز توجه داشت که اگرچه با افزایش تعداد حسگرها، دقت محاسبات افزایش می‌یابد اما این افزایش دقت، کاهش سرعت اجرای الگوریتم را به‌همراه دارد که یکی از دلایل محدودکننده برای استفاده تعداد زیادی از حسگرها در محاسبات بی‌درنگ می‌باشد. سرعت صوتی عامل مؤثری در تخمین مکان منبع است. علاوه بر این نتایج محاسبات به هندسه و یا چیدمان آرایه حسگرها نیز به شدت وابسته است [۲۲].

۲-۱. روش چان ترکیبی با انرژی

در تشخیص مکان منبع روش چان، به دلیل امکان بهره‌برداری از محاسبات تأخیرهای اضافی و نیز حل دقیق و بدون خطی‌سازی، بهینه‌ترین روش برای حل معادلات غیرخطی هذلولی حاصل می‌باشد. این روش تخمینی از تخمین‌گر بیشینه درست‌نمایی بوده است [۱۷]. در این روش ماتریس خطا ترکیبی با انرژی به‌صورت رابطه ۷ تشکیل می‌گردد.

$$\Psi = h - G_a z_a,$$

$$h = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\left(r_{21}^2 - k_2 + k_1\right) \\ \frac{1}{2}\left(r_{31}^2 - k_3 + k_1\right) \\ \vdots \\ \frac{1}{2}\left(r_{M1}^2 - k_M + k_1\right) \\ r_{21} \\ r_{31} \\ \vdots \\ r_{M1} \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} x_{i1} &= x_i - x_1 \\ y_{i1} &= y_i - y_1 \\ z_{i1} &= z_i - z_1 \\ k_i &= x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \\ (i &= 2 \dots, M) \end{aligned} \tag{۷}$$

$$G_a = \begin{bmatrix} -x_{21} & -y_{21} & -z_{21} & -r_{21} \\ -x_{31} & -y_{31} & -z_{31} & -r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{M1} & -y_{M1} & -z_{M1} & -r_{M1} \\ 0 & 0 & 0 & g_{21} - 1 \\ 0 & 0 & 0 & g_{31} - 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & g_{M1} - 1 \end{bmatrix}, \quad z_a = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ R_1 \end{bmatrix}$$

z_a موقعیت تخمینی اولیه منبع صوتی در سه‌بعد $[x_s, y_s, z_s]$ به‌همراه عنصر اضافی R_1 است که به‌طور مسلم تخمین آن حاوی خطاست. R_1 فاصله حسگر مبنا از منبع صوتی است و به دقت تخمین مکان الگوریتم در مرحله دوم کمک می‌کند. g_{i1} تخمین نسبت دامنه حسگر i به حسگر مبنا و یا جذر نسبت انرژی حسگر مبنا به حسگر i است. r_{i1} نیز تخمین میزان تفاوت فاصله حسگر i از حسگر مبنا است. M، نشانگر تعداد حسگرها 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 به‌صورت تقریبی از رابطه ۸ به‌دست آورد.

$$z_a \approx \left(G_a^T F_a^{-1} G_a\right)^{-1} G_a^T F_a^{-1} h, \tag{۸}$$

مقدار F_a ماتریس وزنی است که رابطه ۹ نمایشگر آن است

$$F_a = C^2 D_a^{-T} \begin{bmatrix} Q_{rr}^{-1} & 0_{M-1} \\ 0_{M-1} & Q_{gg}^{-1} \end{bmatrix} D_a^{-1}, \quad D_a = \begin{bmatrix} B_a & 0_{M-1} \\ I_{M-1} & -r_{M1} I_{M-1} \end{bmatrix} \tag{۹}$$

C میزان سرعت صوتی تخمینی در محیط انتشار امواج صوتی است. T و ۱- در قسمت فوقانی ماتریس‌ها به‌ترتیب بیانگر ترانهاده[1] و وارون[2] ماتریس هستند. 0_{M-1} ماتریس مربعی صفر با تعداد سطر و ستون $M-1$ است. 1_{M-1} ماتریس مربعی یک با تعداد سطر و ستون $M-1$ است. I_{M-1} ماتریس همانی با تعداد سطر و ستون $M-1$ است. B_a ماتریس قطری فاصله هر حسگر با حسگر مبنا است که با $B_a = diag(r_{i1})$ نمایش داده می‌شود. Q_{rr} ماتریس کواریانس[3] تفاوت زمان ورودهای تخمین زده شده بردار $r = [r_{21}, r_{31}, \dots, r_{M1}]$ و Q_{gg} ماتریس کواریانس نسبت دامنه ورودهای تخمینی بردار $g = [g_{21}, g_{31}, \dots, g_{M1}]$ است که در رابطه ۱۰ نمایان هستند. ∇_r و ∇_g، گرادیان ماتریس r و g هستند. SNR، نسبت علامت به نوفه است که در سنجش با داده‌های واقعی برای محاسبه تقریبی آن از علامت بدون گفتار ضبط شده در اتاق به‌عنوان نوفه استفاده شد و نسبت علامت به آن محاسبه و مقدار کمینه

[1] Transpose
[2] Inverse
[3] Covariance matrix

آن در چند بار سنجش به عنوان نسبت علامت به نوفه در نظر گرفته شد. در داده‌های شبیه‌سازی نیز نسبت علامت به نوفه همان مقدار در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. در رابطه ۱۹، ω پهنای باند علامت منبع دریافتی توسط حسگرها و T دوره مشاهده علامت یا طول علامت دریافتی حسگرها است.

$$\begin{aligned} Q_{rr} &= \left(\nabla_r^{'}\nabla_r^{'T}\right) diag\left(\nabla_r^{'}\nabla_r^{'T}\right)1_{M-1}, \\ Q_{gg} &= (\nabla_g^{'}\nabla_g^{'T}) diag(\nabla_g^{'}\nabla_g^{'T})1_{M-1} \\ \nabla_r &= \frac{T}{3\pi}\omega^3 \frac{SNR^2}{1+M.SNR}(M.I_{M-1} - 1_{M-1}1_{M-1}^T), \\ \nabla_g &= \frac{T}{\pi}\omega \frac{SNR^2}{1+M.SNR}(M.I_{M-1} - \frac{1-M.SNR}{1+M.SNR}1_{M-1}1_{M-1}^T), \\ \nabla_r^{'} &= C^2\nabla_r^{-1}, \nabla_g^{'} = \nabla_g^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه ۸، z_a حاوی خطایی به مقدار Ψ' است که هدف الگوریتم سعی در کاهش مقدار این خطاست. خطای محاسبه را می‌توان به صورت رابطه ۱۱ بیان کرد. مقدار z_a' (مختصات تخمینی نهایی) را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۲ محاسبه کرد.

$$\begin{aligned} \Psi^{'} &= h^{'} - G_a^{'} z_a^{'}, \\ h^{'} &= \begin{bmatrix} (z_{a,1}-x_1)^2 \\ (z_{a,2}-y_1)^2 \\ (z_{a,3}-z_1)^2 \\ (z_{a,4})^2 \end{bmatrix}, \quad G_a^{'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ z_a^{'} &= \begin{bmatrix} (x_s-x_1)^2 \\ (y_s-y_1)^2 \\ (z_s-z_1)^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$z_a^{'} = (G_a^{'T} F_a^{'-1} G_a)^{-1} G_a^{'} F_a^{'-1} h^{'} \quad (12)$$

ماتریس وزنی F_a' از طریق رابطه ۱۳ در دو مرحله به‌دست می‌آید. ابتدا ماتریس وزنی F_b تخمین زده می‌شود، سپس به واسطه آن ماتریس F_a' برآورد می‌شود. cov، کوارایانس ماتریس است. $z_{a,1}$، $z_{a,2}$، $z_{a,3}$ و $z_{a,4}$ به‌ترتیب مؤلفه‌ی اول تا چهارم تخمینی z_a در رابطه ۸ هستند.

$diag$ ماتریس قطری است. با توجه به رابطه ۱۱، موقعیت منبع محاسبه می‌شود؛ از هر سه مؤلفه‌ی z_a' جذر گرفته می‌شود سپس جایگشت قرینه این سه مؤلفه که هشت حالت است با مختصات حسگر مبنا ($[x_1, y_1, z_1]$) جمع می‌شوند، حاصل هر کدام از هشت عبارت به‌دست آمده از z_a' کاسته می‌شود. مقدار حاصل از مرحله قبل در ترانهاده‌اش ضرب شده و در نهایت مقدار کمینه آن برابر با مختصات تخمینی منبع است.

$$\begin{aligned} F_a^{'} &= B_b^{-T} cov(z_a)^{-1} B_b^{-1}, \\ cov(z_a) &= \left(G_a^T F_b G_a\right)^{-1}, \\ B_b &= \begin{bmatrix} 2(z_{a,1}-x_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2(z_{a,2}-y_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2(z_{a,3}-z_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_1^{'} \end{bmatrix}, \\ F_b &= D_a^{'-T} \begin{bmatrix} Q_{rr}^{-1} & 0_{M-1} \\ 0_{M-1} & Q_{gg}^{-1} \end{bmatrix} D_a^{'-1}, \\ r_1^{'} &= \sqrt{\left(z_{a,1}-x_1\right)^2 + \left(z_{a,2}-y_1\right)^2 + \left(z_{a,3}-z_1\right)^2}, \\ r_i^{'} &= \sqrt{\left(z_{a,1}-x_i\right)^2 + \left(z_{a,2}-y_i\right)^2 + \left(z_{a,3}-z_i\right)^2}, \\ D_a^{'} &= \begin{bmatrix} B_a^{'} & 0_{M-1} \\ I_{M-1} & -r_1^{'} I_{M-1} \end{bmatrix}, \; B_a^{'} = diag(r_i^{'}) \end{aligned} \quad (13)$$

۲-۲. روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی

روش حداقل مربعات وزنی دو مرحله‌ای یک روش حل جبری ساده 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 عمل ریشه دوم در مرحله دوم روش حداقل مربعات وزنی است. اگر چه علامت راه‌حل نهایی می‌تواند به‌طور تقریبی با توجه به علامت تخمینی موقعیت به‌دست‌آمده در اولین گام روش حداقل مربعات وزنی تعیین شود، اما تخمین موقعیت در اولین گام روش حداقل مربعات وزنی به اندازه کافی دقیق نیست. با استفاده از این واقعیات، روش بهبودیافته روش حداقل مربعات وزنی دو مرحله‌ای در مرحله‌ی اول از ایده کمینه‌سازی روش حداقل مربعات وزنی پیروی می‌کند، اما در مرحله دوم، با رابطه محدودیت بین عنصر اضافی و مکان منبع به روش متفاوتی سروکار دارد [۲۳]. با توجه به رابطه ۱۴، ماتریس خطا به‌صورت رابطه ۱۵ تعریف می‌شود. d_1 فاصله حسگر مبنا از منبع صوتی است و به‌عنوان عنصر اضافی جهت تخمین دقیق‌تر مختصات نهایی در نظر گرفته می‌شود.

$$\theta_1 = [x, y, z, d_1]^T \quad (14)$$

$$\varepsilon_1 = h_1 - G_1\theta_1,$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) & 2r_{21} \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) & 2r_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2(x_M - x_1) & 2(y_M - y_1) & 2(z_M - z_1) & 2r_{M1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & g_{21} - 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & g_{31} - 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & g_{M1} - 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$k = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2,$$

$$h_1 = \begin{bmatrix} -(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - k - r_{21}^2) \\ -(x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - k - r_{31}^2) \\ \vdots \\ -(x_M^2 + y_M^2 + z_M^2 - k - r_{M1}^2) \\ r_{21} \\ r_{31} \\ \vdots \\ r_{M1} \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \left(G_1^T W_1 G_1\right)^{-1} G_1^T W_1 h_1 \quad (16)$$

W_1 ماتریس وزنی است که در رابطه ۱۷ نمایش داده شده است. ماتریس‌های Q_{rr} و Q_{gg} نیز طبق رابطه ۱۰ قابل محاسبه هستند.

$$W_1 = D_1^{-T} \begin{bmatrix} Q_{rr}^{-1} & \cdot_{M-1} \\ \cdot_{M-1} & Q_{gg}^{-1} \end{bmatrix} D_1^{-1},$$
$$D_1 = \begin{bmatrix} B_1 & \cdot_{M-1} \\ I_{M-1} & -r_{M1} I_{M-1} \end{bmatrix}, B_1 = diag(2r_{i1}) \quad (17)$$

با استفاده از رابطه ۱۶ مختصات تخمینی اولیه به‌دست می‌آید. مقدار حاصل شده θ_1 حاوی خطاست. خطای محاسبه را می‌توان به صورت رابطه ۱۸ بیان کرد. سپس با استفاده از رابطه ۱۹ مختصات تخمینی نهایی منبع صوتی به‌دست می‌آید. $\hat{x}$، $\hat{y}$ و $\hat{z}$ به‌ترتیب عناصر مختصات تخمینی اولیه رابطه ۱۶ و $\hat{d}_1$ نیز جزء چهارم تخمینی رابطه ۱۶ است.

$$\varepsilon_2 = h_2 - G_2\theta_2,$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 \\ -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \end{bmatrix}, h_2 = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{k} + k - \hat{d}_1^2 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & -1 & \cdot \\ -2\hat{x} & -2\hat{y} & -2\hat{z} & 2\hat{d}_1 \end{bmatrix}, \quad k = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2, \quad \hat{k} = \hat{x}^2 + \hat{y}^2 + \hat{z}^2$$

$$\theta_2 = \left(G_2^T W_2 G_2\right)^{-1} G_2^T W_2 h_2 \quad (19)$$

ماتریس وزنی W_2 از طریق رابطه ۲۰ در دو مرحله به‌دست می‌آید. ابتدا ماتریس وزنی w_1' تخمین زده می‌شود سپس به‌واسطه آن ماتریس W_2 برآورد می‌شود. cov، کوارایانس ماتریس است.

$$W_2 = \left[E\left(\varepsilon_2\varepsilon_2^T\right)\right]^{-1} = \left[B_2 cov(\theta) B_2^T\right]^{-1}$$
$$cov(\theta) = \left(G_1^T w_1' G_1\right)^{-1},$$
$$w_1' = D_1'^{-T} \begin{bmatrix} Q_{rr}^{-1} & \cdot_{M-1} \\ \cdot_{M-1} & Q_{gg}^{-1} \end{bmatrix} D_1'^{-1}, \quad (20)$$
$$D_1' = \begin{bmatrix} B_1' & \cdot_{M-1} \\ I_{M-1} & -r_1' I_{M-1} \end{bmatrix}, B_1' = diag(r_i'),$$
$$r_i' = \sqrt{\left(z_{a,1} - x_i\right)^2 + \left(z_{a,2} - y_i\right)^2 + \left(z_{a,3} - z_i\right)^2}$$

۳. نتایج

بخش نتایج شامل دو قسمت شبیه‌سازی داده‌های مصنوعی و سنجش‌های تجربی (داده‌های واقعی) است. در هر قسمت تنظیمات، نتایج و تحلیل مربوط به آن مطرح می‌شود.

۳-۱. شبیه‌سازی

در این بخش در ابتدا به نحوه‌ی شبیه‌سازی علامت در اتاق و آرایه حسگری پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقاله [۱۸] و روش‌های جدید مطرح و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱-۱. تنظیمات شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های داده‌ها در محیط ویندوز ۱۰ و نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹ انجام گرفته است. بسامد نمونه‌برداری ۴۴۱۰۰ نمونه در ثانیه و ابعاد اتاق ۶٫۹۴×۷٫۰۹×۳٫۵ مترمکعب، سرعت صوتی ۳۴۶٫۱۳ متر بر ثانیه و دما ۲۵ درجه سلسیوس است. برای ایجاد علامت‌ها شبیه به داده‌های واقعی ابتدا یکی از علامت‌های گفتار ضبط شده انتخاب و شبیه‌سازی روی آن بسط داده می‌شود. بعد از آن به واسطه‌ی روش تصویر[1] به کار گرفته

[1] Image method

شده در مراجع [۲۴-۲۵] و داشتن ابعاد دقیق اتاق و مختصات منبع صوتی و حسگرها و با در نظر گرفتن زمان انعکاس[1] برابر ۰/۵ ثانیه و طول پاسخ ضربه اتاق[2] برابر ۱۰۲۴ نمونه، پاسخ ضربه اتاق به‌صورت تقریبی به‌دست می‌آید و به اندازه فاصله بین حسگرها و دانستن مکان منبع صوتی تأخیر بین علامت هر حسگر به علامت‌ها اضافه می‌شوند. در انتها نوفه سفید گوسی[3] با نسبت علامت به نوفه ۲۰- تا ۲۰+ با گام ۵ به علامت‌ها افزوده می‌شوند. برای چهار موقعیت منبع ثابت و آرایه‌های ۵، ۶ و ۷ حسگری در دو چیدمان مختلف شبیه‌سازی علامت ۱۰ بار صورت گرفت که به دلیل تولید نتایج مشابه به هم، انحراف معیار آن‌ها بسیار نزدیک به صفر و حتی در مواردی صفر شد و از تعداد دفعات شبیه‌سازی بیشتر توسط روش تصویر صرف نظر شد.

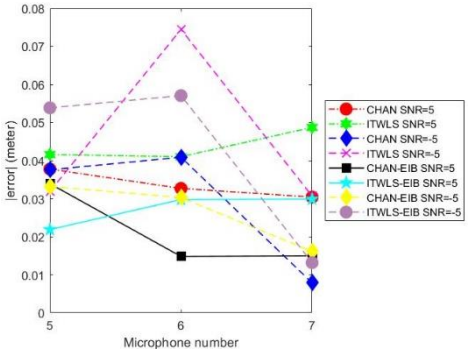
چیدمان اول یک چیدمان نامتقارن و چیدمان دوم یک چیدمان متقارن است. جدول ۱ مختصات چهار موقعیت منبع گفتار را نمایش می‌دهد. جدول‌های ۲ تا ۴ به‌ترتیب نمایانگر مختصات چیدمان آرایه‌های پنج، شش و هفت حسگری هستند. مقادیر جداول بر حسب متر است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۳-۱-۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱ موقعیت‌های منبع صوتی ثابت (بر حسب متر).

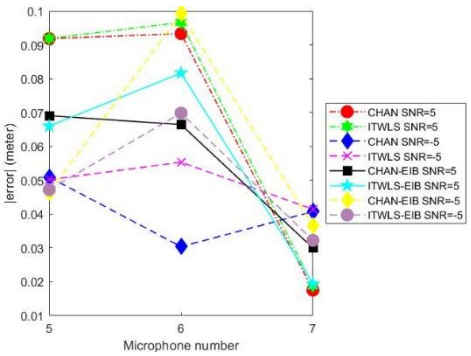
موقعیت	x	y	z
۱	۳/۵۲	۲/۶۴۵	۱/۱۶
۲	۴/۴۷	۳/۶۴۵	۱/۲۱
۳	۳/۷۲	۴/۲۴۵	۱/۲۱
۴	۳/۹۲	۴/۰۴۵	۱/۴۱

۳-۱-۲. نتایج شبیه‌سازی

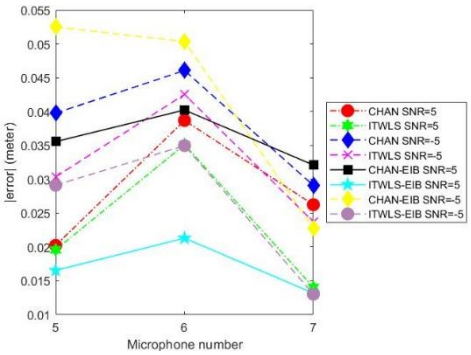
میانگین خطای مطلق مکان منبع دو روش معرفی شده چان و مربع وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته در مقاله [۱۸] و روش پیشنهادی با نسبت علامت به نوفه ۵ و ۵- دسی‌بل در ۱۰ بار شبیه‌سازی در شکل‌های ۲ تا ۹ نسبت به تعداد حسگر (پنج، شش و هفت حسگر) ثبت شده است. همان‌طور که بیان شد انحراف معیار ده مورد شبیه‌سازی برای هر موقعیت منبع و چیدمان خاص حسگرها بسیار نزدیک به صفر بود به‌همین علت از آن صرف نظر شد. علت نزدیک به صفر بودن انحراف معیارهای شبیه‌سازی‌ها نسبت به هم این است که تفاوت نوفه سفید در علامت‌ها به تنهایی نمی‌تواند تأثیر چندانی در تخمین پرتی از موقعیت منبع داشته باشد.



شکل ۲ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۱، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۳ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۲، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۴ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۳، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.

[1] Reflection time
[2] Room impulse response
[3] Gaussian white noise

جدول ۲ چیدمان‌های آرایه پنج حسگری (بر حسب متر).

چیدمان اول				چیدمان دوم			
حسگر	x	y	z	حسگر	x	y	z
۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱	۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱
۲	۳٫۵۷	۳٫۲۹۵	۱٫۰۱	۲	۳٫۱۲	۳٫۵۴۵	۱٫۱۱
۳	۳٫۳۷	۳٫۷۹۵	۱٫۰۱	۳	۳٫۸۲	۳٫۵۴۵	۱٫۱۱
۴	۳٫۸۷	۳٫۳۹۵	۱٫۳۲	۴	۳٫۲۹۵	۳٫۸۴۸۱	۱٫۰۱
۵	۳٫۰۷	۳٫۶۹۵	۱٫۴۲	۵	۳٫۲۹۵	۳٫۲۴۱۹	۱٫۰۱

جدول ۳ چیدمان‌های آرایه شش حسگری (بر حسب متر).

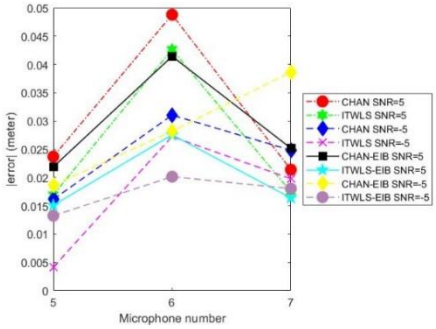
چیدمان اول				چیدمان دوم			
حسگر	x	y	z	حسگر	x	y	z
۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱	۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱
۲	۳٫۱۲	۳٫۳۴۵	۱٫۱۱	۲	۳٫۲۹۵	۳٫۸۴۸۱	۱٫۰۱
۳	۳٫۵۷	۳٫۲۹۵	۱٫۰۱	۳	۳٫۸۲	۳٫۵۴۵	۱٫۱۱
۴	۳٫۸۲	۳٫۷۴۵	۱٫۱۱	۴	۳٫۶۴۵	۳٫۸۴۸۱	۱٫۰۱
۵	۳٫۸۷	۳٫۳۹۵	۱٫۳۲	۵	۳٫۶۴۵	۳٫۲۴۱۹	۱٫۰۱
۶	۳٫۰۷	۳٫۶۹۵	۱٫۴۲	۶	۳٫۲۹۵	۳٫۲۴۱۹	۱٫۰۱

جدول ۴ چیدمان‌های آرایه هفت حسگری (بر حسب متر).

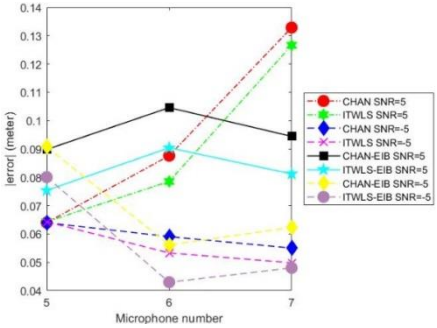
چیدمان اول				چیدمان دوم			
حسگر	x	y	z	حسگر	x	y	z
۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱	۱	۳٫۴۷	۳٫۵۴۵	۱٫۲۱
۲	۳٫۱۲	۳٫۳۴۵	۱٫۱۱	۲	۳٫۱۲	۳٫۵۴۵	۱٫۱۱
۳	۳/۵۷	۳٫۲۹۵	۱٫۰۱	۳	۳٫۲۹۵	۳٫۸۴۸۱	۱٫۰۱
۴	۳/۸۲	۳٫۷۴۵	۱٫۱۱	۴	۳٫۸۲	۳٫۵۴۵	۱٫۱۱
۵	۳٫۳۷	۳٫۷۹۵	۱٫۰۱	۵	۳٫۶۴۵	۳٫۸۴۸۱	۱٫۰۱
۶	۳٫۸۷	۳٫۳۹۵	۱٫۳۲	۶	۳٫۶۴۵	۳٫۲۴۱۹	۱٫۰۱
۷	۳٫۰۷	۳٫۶۹۵	۱٫۴۲	۷	۳٫۲۹۵	۳٫۲۴۱۹	۱٫۰۱

انحراف معیار زیاد در داده‌های واقعی بیش‌تر به علت این است که فرد صحبت‌کننده ممکن است در صورت خطای انسانی سر خود را تکان دهد و یا حتی خطای انسانی در اندازه‌گیری‌ها نیز بر آن مؤثر است. چون ۱۰ بار در هر موقعیت فرد گوینده باید علامت‌های شبیه به هم تولید می‌کرد که در عمل قابل انجام نیست و به‌طور حتم علامت‌ها در هر بار آزمایش با هم تفاوت زیادی دارند.

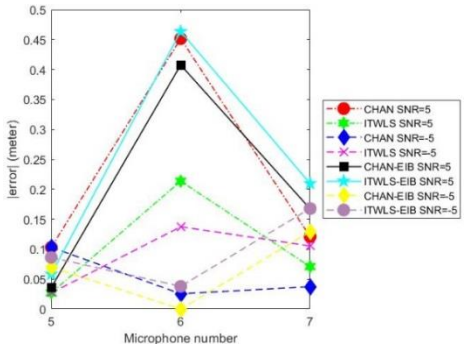
جداول ۵ و ۶، به‌ترتیب میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش چان ترکیبی با انرژی در آرایه ۷ حسگری هر دو چیدمان متقارن و نامتقارن آرایه حسگری را در نسبت علامت به نوفه ۵+ و ۵- دسی‌بل نمایش می‌دهد. جداول ۷ و ۸ نیز به‌ترتیب میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی در آرایه ۷ حسگری هر دو چیدمان آرایه حسگری را در نسبت علامت به نوفه ۵+ و ۵- دسی‌بل را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشخص است انحراف معیار در شبیه‌سازی به شدت نزدیک به صفر است و برای حل این مسئله بهتر است محدوده نوسان برای مختصات منبع



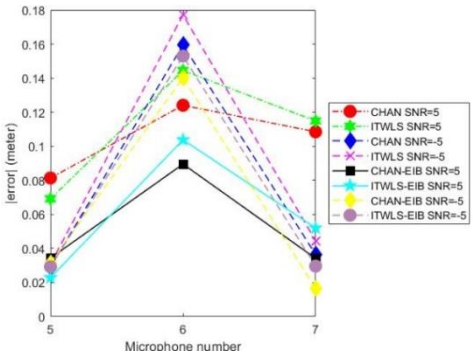
شکل ۵ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۴، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



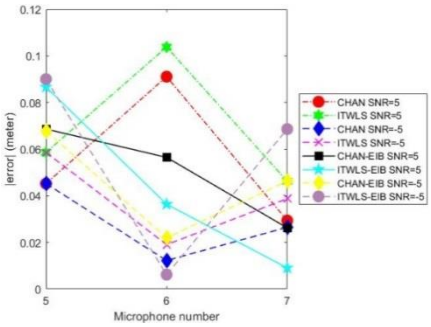
شکل ۶ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۱، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۷ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۲، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۸ میانگین خطای مطلق مکان منبع در موقعیت ۳، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۹ میانگین خطای‌مطلق مکان‌منبع در موقعیت ۴، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.

جدول ۵ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش چان ترکیبی با انرژی در آرایه هفت حسگری دو چیدمان آرایه در نسبت علامت به نوفه ۵+ دسی‌بل.

موقعیت منبع	چیدمان اول		چیدمان دوم	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
۱	۰٫۰۱۵	۰	۰٫۰۹۴۴	۰
۲	۰٫۰۳	۰	۰٫۱۶۷۳	$۰٫۰۸۷۸\times۱۰^{-۱۶}$
۳	۰٫۰۳۲۱	$۰٫۲۱۹۴\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۳۴۲	۰
۴	۰٫۰۲۵۲	$۰٫۲۱۹۴\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۲۶۲	$۰٫۱۰۹۷\times۱۰^{-۱۷}$

جدول ۶ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش چان ترکیبی با انرژی در آرایه هفت حسگری دو چیدمان آرایه در نسبت علامت به نوفه ۵- دسی‌بل.

موقعیت منبع	چیدمان اول		چیدمان دوم	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
۱	۰٫۱۰۷۸	۰	۰٫۰۵۵۴	$۰٫۰۰۰۲\times۱۰^{-۱۴}$
۲	۱٫۵۴۰۹	۰	۰٫۱۵۵۵	۰
۳	۰٫۰۳۲۸	$۰٫۰۲۱۹\times۱۰^{-۱۶}$	۰٫۱۳۳۱	$۰٫۰۸۷۸\times۱۰^{-۱۶}$
۴	۰٫۰۴۲۶	$۰٫۲۱۹۴\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۳۹۹	$۰٫۰۰۲۲\times۱۰^{-۱۵}$

جدول ۷ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی در آرایه هفت حسگری دو چیدمان آرایه در نسبت علامت به نوفه ۵+ دسی‌بل.

موقعیت منبع	چیدمان اول		چیدمان دوم	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
۱	۰٫۰۲۹۹	۰	۰٫۰۸۱۲	۰
۲	۰٫۰۱۹۵	$۰٫۱۰۹۵\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۲۰۹۵	$۰٫۰۸۷۸\times۱۰^{-۱۶}$
۳	۰٫۰۱۳۲	$۰٫۰۵۴۹\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۵۲۰	۰
۴	۰٫۰۱۶۴	$۰٫۱۰۹۷\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۰۹	$۰٫۰۵۴۹\times۱۰^{-۱۷}$

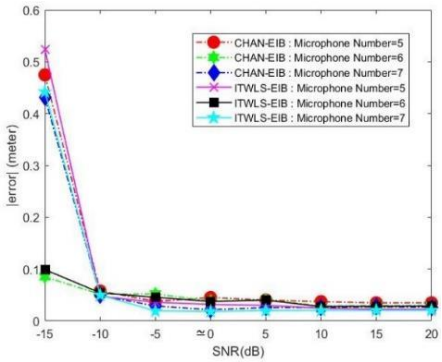
صوتی نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود تا نزدیک به

واقعیت شود. هم‌چنین تغییر در پاسخ بسامدی اتاق به واسطه تغییر در زمان انعکاس نیز می‌تواند در شبیه‌سازی بهتر علامت‌های گفتار در فضای بسته کمک کند.

جدول ۸ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی در آرایه هفت حسگری دو چیدمان آرایه در نسبت علامت به نوفه ۵- دسی‌بل.

موقعیت منبع	چیدمان اول		چیدمان دوم	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
۱	۰٫۱۲۳۶	$۰٫۴۳۸۹\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۴۸۹	$۰٫۰۰۰۲\times۱۰^{-۱۴}$
۲	۱٫۵۶۴۶	۰	۰٫۲۰۱۶	$۰٫۰۸۷۸\times۱۰^{-۱۶}$
۳	۰٫۰۳۳۵	$۰٫۰۲۱۹\times۱۰^{-۱۶}$	۰٫۱۰۸۶	$۰٫۰۴۳۹\times۱۰^{-۱۶}$
۴	۰٫۰۴۵۵	$۰٫۲۱۹۴\times۱۰^{-۱۷}$	۰٫۰۶۶۲	$۰٫۰۰۴۴\times۱۰^{-۱۵}$

روش پیشنهادی در نسبت علامت به نوفه‌های متفاوتی از ۲۰- تا ۲۰ دسی‌بل با گام ۵ مورد بررسی قرار گرفت. در نسبت علامت به نوفه ۲۰- الگوریتم کاملاً ناکارآمد بود. در نسبت علامت به نوفه ۱۵- نیز در بعضی از موارد دارای خطای زیادی بود. اما الگوریتم‌ها از نسبت علامت به نوفه ۱۰- تا نسبت علامت به نوفه ۲۰+ کارایی خود را اثبات کرد. گرچه الگوریتم در نسبت علامت به نوفه صفر (فقط خود صفر) به‌دلیل استفاده از رابطه ۱۰ باعث ایجاد صفر در مخرج کسر می‌شود و الگوریتم نمی‌تواند پاسخگو باشد اما در نسبت علامت به نوفه‌های نزدیک به صفر الگوریتم به خوبی عمل می‌کند. شکل ۱۰ میانگین خطای مطلق مکان منبع در چهار موقعیت چیدمان اول آرایه در نسبت علامت به نوفه ۱۵- تا ۲۰ دسی‌بل در تعداد حسگرهای ۵ تا ۷ برای هر دو روش پیشنهادی، مقایسه می‌شود.



شکل ۱۰ میانگین خطای مطلق مکان منبع در چهار موقعیت چیدمان اول آرایه در نسبت علامت به نوفه‌های ۱۵- تا ۲۰ دسی‌بل در تعداد حسگرهای ۵ تا ۷ برای هر دو روش پیشنهادی.

۳-۱-۳. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

به‌دلیل استفاده الگوریتم چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته از خواص ماتریسی و نیز استفاده از تفاضل مکان قرارگیری حسگرها، قرار دادن حسگرها در مکان‌هایی که یکی از عناصر سه‌گانه مختصات دکارتی برابر باشند، باعث صفر شدن مقادیر تفاضل می‌گردد و الگوریتم‌ها را دچار مشکل می‌کند. با توجه به شکل‌های ۲ تا ۹، می‌توان گفت به‌طور معمول ترکیب انرژی و درون‌یابی اسپلاین مکعبی در بهبود برخی از مختصات‌های تخمینی مؤثر بوده است. نتایج روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته به صورت کلی نسبت به روش چان بهتر است. موقعیت منبع نباید فاصله زیاد و یا کمی با آرایه داشته باشد. الگوریتم‌های پیشنهادی از نسبت علامت به نوفه ۱۰- تا ۲۰+ کارایی خود را اثبات کردند.

روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی به‌طور معمول دارای خطای مطلق کم‌تری نسبت به سایر روش‌های مقایسه شده است و از این رو روش مؤثر در بهبود دقت مختصات تخمینی مکان‌یابی منبع صوتی انتخاب می‌شود. با توجه به مشاهدات، هرچه نسبت علامت به نوفه کم‌تر باشد روش پیشنهادی بهتر عمل می‌کند. روش پیشنهادی مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی در هر دو چیدمان نسبت به روش پیشنهادی چان بهتر است.

۳-۲. سنجش‌های تجربی

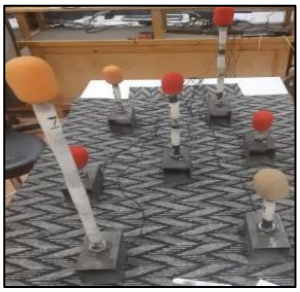
در بخش سنجش‌های تجربی به تنظیمات سنجش‌ها، نحوه ضبط داده‌های صوتی واقعی در محیط آزمایشگاه پرداخته می‌شود. سپس نتایج تجربی حاصل از سنجش‌ها و تحلیل نتایج تجربی بیان می‌شود.

۳-۲-۱. تنظیمات سنجش‌ها

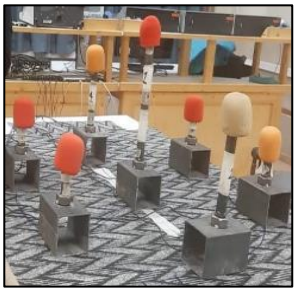
سنجش‌ها روی داده‌های واقعی با همان شرایطی که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت، انجام شده است. چون هدف از شبیه‌سازی ایجاد داده‌های صوتی مشابه داده‌های واقعی است. بسامد نمونه‌بردای ۴۴۱۰۰ نمونه در ثانیه است. امواج صوتی دریافتی حسگرها، قیاسی[1] و

[1] Analog

بـه‌طـول پـنج ثانیـه هسـتند. از دسـتگاه حسـگر آرایـه‌ای چندکانالـه بـا پـیش تقویـت‌کننـده موتـو ۲۴ ورودی/خروجی[1] جهت رقومی نمودن علامت، استفاده شد. منبع صوتی، گفتار انسان می‌باشد که کلمه سلام در هر بار سنجش توسط یک شخص بیان شده است. هـدف داشـتن تصویر کامل از صورت گوینده است، با فرض قـاب دوربـین به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متـر مربـع، خطاهـای کـم‌تـر از ۲۰ سانتی‌متر عملاً خطا محسوب نمی‌شـوند. سـنجش‌هـا ۱۰ مرتبه برای دو چیدمان و تعداد پنج تا هفت حسگر و چهار موقعیـت منبـع صـوتی ثابـت در فضـای سه‌بعدی انجام گرفتـه‌انـد. شـکل ۱۱ چیـدمان اول و دوم آرایه هفت حسگری در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



(الف)



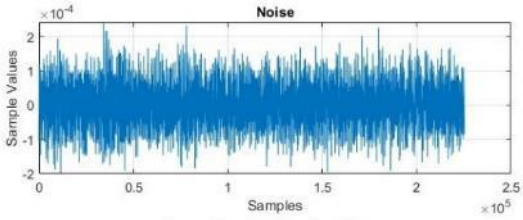
(ب)

شکل ۱۱ آرایه هفت حسگری؛ (الف) چیدمان اول، (ب) چیدمان دوم.

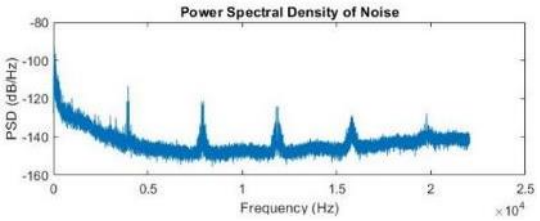
۳-۲-۲. نتایج تجربی

نوفه سفید به علامتی گفته می‌شود کـه تـوان آن بـه‌طـور یکنواخت در همه بسامدها توزیـع شـده باشـد. زیـرا تـابع چگالی طیف توان[2] آن در همه بسـامدهـا مقـداری تقریبـاً ثابت دارد. چگالی طیفی تـوان بیـانگر نحـوه توزیـع تـوان علامت در بسامدهای سازنده آن بسـامد اسـت. در محـیط آزمایشگاه، همچنین صدای محـیط بـدون وجـود علامـت گفتار ضبط شد و به‌عنوان نوفـه محـیط بسـته آزمایشـگاه تعیین شد.

در شکل ۱۲، قسمت (الف) دامنـه نوفـه در طـول زمـان و قسمت (ب) چگـالی طیـف تـوان نوفـه محیطـی در طـول بسامدهای علامت نوفه است که به‌واسطه کم بودن نوسـان آن از یک مقدار ثابت، تقریب تا حدودی مناسب برای نوفه ناهمبسته است. البته در عمل یا واقعیت نمی‌توان نوفـه را سفید فرض کرد، چون امکان ایـن مسـئله کـه بـر تمـامی بسامدها، توان یکسانی اعمال شود، دور از انتظار است.



(الف)

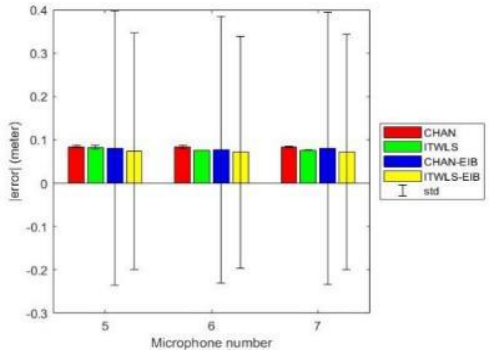


(ب)

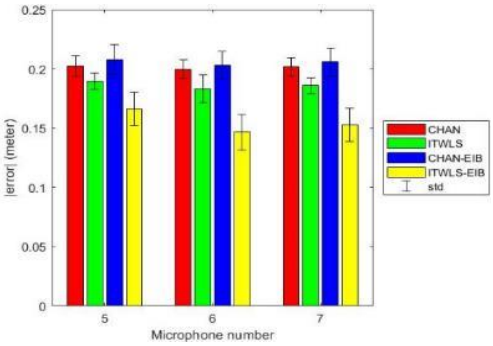
شکل ۱۲ نوفه محیط واقعی آزمایش و چگالی طیف توان نوفه (به‌ترتیب در قسمت الف و ب شکل).

میانگین خطای مطلق[3] و انحـراف معیـار[4] مکـان منبـع دو روش معرفی شـده چـان و مربـع وزن‌دار دو مرحلـه‌ای در مقاله [۱۸] و دو روش پیشنهادی در ۱۰ بار شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۳ تا ۲۰ نسـبت بـه تعـداد حسـگر نشـان داده شده است. در نهایت میانگین خطای مطلق چهار موقعیـت منبع صوتی در چیدمان اول آرایه برای مقایسه تأثیر وجود و عدم وجود انرژی و درون‌یـابی در روش‌هـای پیشـنهادی ارائه شده است.

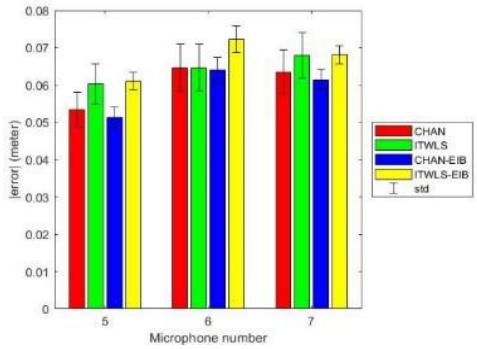
[1] Motu 24 I/O
[2] PSD; Power Spectral Density
[3] Absolute average error
[4] StD; Standard Deviation



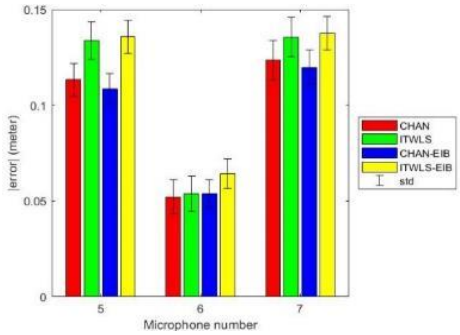
شکل ۱۳ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۱، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



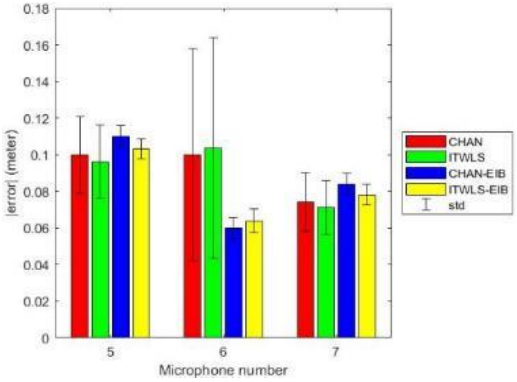
شکل ۱۴ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۲، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



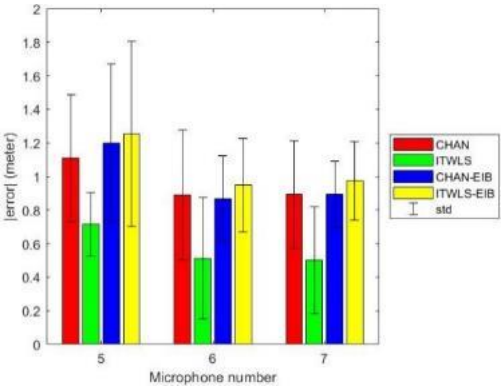
شکل ۱۵ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۳، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



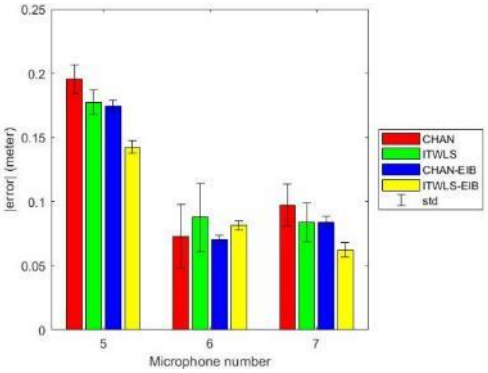
شکل ۱۶ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۴، چیدمان اول نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۱۷ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۱، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.

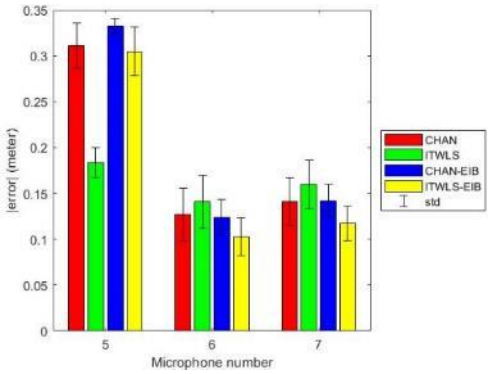


شکل ۱۸ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۲، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.

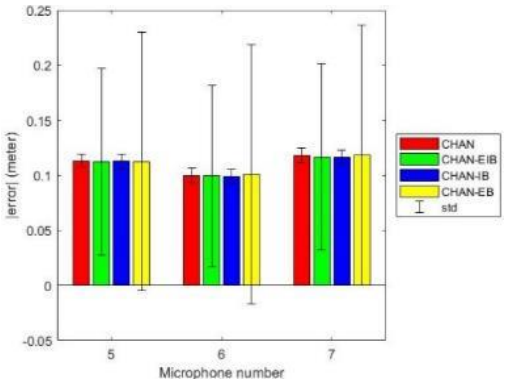


شکل ۱۹ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۳، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.

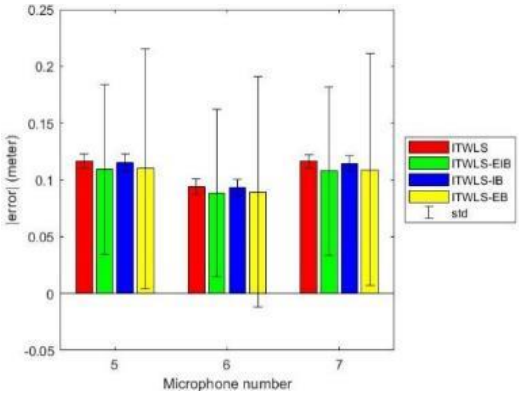
شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به‌ترتیب مقایسه میانگین خطای مطلق و انحراف معیار چهار موقعیت منبع صوتی در چیدمان اول روش چان معمولی و ترکیبی با انرژی و روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته معمولی و ترکیبی با انرژی در صورت عدم وجود و یا وجود انرژی و درون‌یابی را نمایش می‌دهند.



شکل ۲۰ میانگین خطای مطلق و انحراف معیار مکان منبع در موقعیت ۴، چیدمان دوم نسبت به تعداد حسگر.



شکل ۲۱ مقایسه میانگین خطای مطلق و انحراف معیار چهار موقعیت چیدمان اول روش چان معمولی و ترکیبی با انرژی در صورت عدم وجود و یا وجود انرژی و درون‌یابی نسب به تعداد حسگر.



شکل ۲۲ مقایسه میانگین خطای مطلق و انحراف معیار چهار موقعیت چیدمان اول روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته معمولی و ترکیبی با انرژی در صورت عدم وجود و یا وجود انرژی و درون‌یابی.

۳-۲-۳. تحلیل نتایج تجربی

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۲۰، می‌توان گفت ترکیب انرژی و درون‌یابی اسپلاین مکعبی در بهبود برخی از مختصات تخمینی مؤثر بوده است. برخی از مختصات تخمینی روش‌های پیشنهادی دارای خطای بیشتری نسبت به روش‌های مقاله [۱۸] است، علت این موضوع آن است که علامت دریافتی دارای نوفه و انعکاس است و هیچ‌گونه صافی برای پیش‌پردازش علامت ورودی در نظر گرفته نشده است. میانگین خطای مجموعه سنجش‌ها در چیدمان اول آرایه حسگری در روش چان ترکیبی با انرژی ۱۰٫۹۴ سانتی‌متر و در چیدمان دوم ۳۴٫۵۲ سانتی‌متر است به طوری که به اندازه این مقدار مختصات تخمینی با مختصات منبع صوتی در واقعیت فاصله مستقیم دارد. هم‌چنین میانگین خطای تمامی سنجش‌ها در روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای ترکیبی با انرژی برابر ۱۰٫۱۸۵ سانتی‌متر و در چیدمان دوم ۳۵٫۳ سانتی‌متر است. براساس بررسی تمام نتایج و شکل‌های ۱۳ تا ۲۰ روش مربع خطای وزن‌دار دومرحله‌ای ترکیبی با انرژی به‌طور کل نتایج بهتری دارد.

۴. بحث

روش تخمین تفاوت زمان ورود، با استفاده از همبستگی متقابل با صافی طیف فاز از متداول‌ترین روش‌ها جهت تعیین موقعیت منابع صوتی است. اما صافی طیف فاز موجب کنار گذاشتن دامنه طیف همبستگی می‌شود به‌همین‌علت توان بهبوددهنده به‌همراه صافی طیف فاز باعث بهبود در تخمین تفاوت زمان ورود می‌شود و مقدار آن بنابر تجربه در داده‌های صوتی بین ۰ تا ۱ است که در داده‌های گفتاری با مقدار ۰٫۵ به جواب بهتری دست می‌یابد.

از طرفی درون‌یابی طیف همبستگی در حوزه زمان می‌تواند به یافتن قلّه همبستگی جدید و کارآمدتری دست یافت که در سایر مقالات، ترکیب این دو مورد جهت بهبود دقت تخمین مشاهده نشد. در روش‌های برآورد مکان روش مربع خطای وزن‌دار بهبود یافته ترکیبی با انرژی و بررسی تأثیر انرژی در تخمین مکان و از طرفی روش چان در قسمت نهایی با جایگشت هشت‌تایی در مرجع دیگری دیده نشد.

روش پیشنهادی با مرجع [۱۸] مورد مقایسه قرار گرفته و سعی در بررسی اعمال انرژی و درون‌یابی بر نتایج تخمین

مکان منبع صوتی دارد.

مقایسه روش پیشنهادی با مرجع [۱۸] در شکل‌های ۲ تا ۹ در قسمت شبیه‌سازی داده مصنوعی و شکل‌های ۱۳ تا ۲۲ در بخش سنجش‌های تجربی نمایش داده شده است. عدم وجود صافی در ابتدای الگوریتم پیشنهادی باعث می‌شود درون‌یابی برای داده‌های اطراف قلّه همبستگی متقابل، به واسطه وجود نوفه، انتخاب قلّه جدید همبستگی را دچار مشکل کند و منجر به تخمین مختصات با خطای بیشتری نسبت به عدم وجود درون‌یابی شود. از طرفی انرژی صوتی همواره به‌صورت کامل نمی‌تواند به دقت مختصات تخمینی ختم شود. اما انرژی و دورن‌یابی در کنار هم نتایج مناسبی را ایجاد می‌کنند و به‌صورت کلی اثر مثبتی را بر بهبود مختصات تخمینی دارد. نتایج روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی و درون‌یابی به‌صورت کلی نسبت به روش چان ترکیبی با انرژی روش پیشنهادی بهتری است.

زیاد بودن انحراف معیار روش‌ها به این دلیل است که هر سنجش شرایط متفاوتی داشته به‌جهت اینکه ممکن است عاملی باعث افزایش یا کاهش نوفه در محیط آزمایشگاه شود و از طرفی شرایط انرژی صوتی و نحوه‌ی بیان گوینده ممکن است در هر بار از ده سنجش تغییر کند. به‌صورت‌کلی با افزایش تعداد حسگرها میانگین خطاها کاهش می‌یابد و به دقت مکان‌یابی افزوده می‌شود در برخی موارد این‌طور نیست و علت آن به نوع چیدمان حسگرها مربوط است.

روش پیشنهادی چان ترکیبی با انرژی و هم‌چنین مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی در چیدمان نامتقارن اول دارای خطای کم‌تری هستند. موقعیت سوم منبع صوتی، به دلیل داشتن خطای کم‌تر نسبت به سایر موقعیت‌ها در هر دو چیدمان می‌تواند به‌عنوان موقعیت مناسب و جایگاه سخنران اصلی انتخاب شود.

۵. نتیجه‌گیری

روش همبستگی متقابل با صافی طیف فاز دارای توان بهبوددهنده، روش مناسب جهت تخمین تأخیر علامت‌های دریافتی در شرایط وجود نوفه و انعکاسات محیطی است. در بررسی تأثیر درون‌یابی و انرژی بر روش تفاوت زمان ورود علامت مشاهده شد که به‌طور معمول درون‌یابی همبستگی متقابل هر علامت نسبت به علامت مبنا و از طرفی ترکیب نسبت دامنه ورود علامت به علامت مبنا که رابطه عکس با جذر نسبت انرژی علامت مبنا به علامت ورود دارد و تفاوت زمان ورود علامت می‌تواند به بهبود دقت مختصات تخمینی مکان منبع صوتی کمک کند. اما در برخی موارد به دلیل عدم نوفه‌گیری در پیش‌پردازش علامت ورودی دچار مشکل می‌شود. زیرا مهم‌ترین بخش الگوریتم‌های دو مرحله‌ای تفاوت زمان ورود، تخمین دقیق تفاوت زمان ورود علامت حسگرها از حسگر مبنا است. روش مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته ترکیبی با انرژی دارای میانگین خطای کم‌تری است. الگوریتم چان و مربع خطای وزن‌دار دو مرحله‌ای بهبودیافته از خواص ماتریسی استفاده می‌کنند و باعث می‌شود که قرار دادن حسگرها در مکان‌هایی که یکی از عناصر سه‌گانه مختصات دکارتی برابر باشند، باعث صفر شدن مقادیر تفاضل گردد و الگوریتم‌ها را دچار مشکل کند. به همین علت چیدمان‌های حسگری نامتقارن نسبت به چیدمان‌های متقارن برای روش‌های منتخب مقاله مناسب‌تر هستند. در بررسی نتایج حاصله از سنجش‌ها چیدمان نامتقارن ۱ به عنوان چیدمانی مناسب جهت مکان‌یابی معرفی شده است. افزایش حسگرها عاملی در جهت بهبود نتایج تخمین مکان منبع است. چیدمان حسگرها به شدت در تخمین نتایج، مؤثر است. استفاده از صافی مناسب جهت کاهش نوفه در مرحله پیش‌پردازش علامت‌های ورود حسگر آرایه‌ای، بررسی انواع مختلف درون‌یابی به منظور بهبود مختصات تخمینی تغییر روابط و همچنین اصلاح سطح انرژی علامت‌های ورودی حسگرها و حذف تفاوت زمان ورود علامت و نسبت دامنه ورود علامت نامناسب که باعث افزایش خطای مختصات تخمینی می‌گردد از جمله کارهای آینده است.

۶. تقدیر و تشکر

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شاهد تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست منابع

[1] T.D. Rossing, "Springer Handbook of Acoustics," Springer Science & Business Media, pp. 1-10, 2007.

[2] M.M. Faraji, S.B. Shouraki, E. Iranmehr, "Fuzzy based algorithm for acoustic source localization using array of microphones," Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 2102-2105, 2017.

[3] A. Pourmohammad, S.M. Ahadi, "Real time high accuracy 3-D PHAT-based sound source localization using a simple 4-microphone arrangement," IEEE Systems Journal, vol. 6, no. 3, pp. 455-468, 2011.

[4] B.G. Ferguson, K.W. Lo, "Extracting tactical information from acoustic signals," Proceedings of the 2004 Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, pp. 149-153, 2004.

[5] J. Jia, M. Liu, X. Li, "Acoustic passive localization algorithm based on wireless sensor networks," International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1145-1149, 2009.

[6] M. Sun, K.C. Ho, "The effect of energy measurements on improving the range and bearing estimation in a hybrid energy and TDOA localization system," 5th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, pp. 77-80, 2008.

[7] K. Ho, Y.T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," IEEE transactions on aerospace and electronic systems, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997.

[8] K. Ho, 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.

[9] K. Ho, M. Sun, "Passive source localization using time differences of arrival and gain ratios of arrival," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 56, no. 2, pp. 464-477, 2008.

[10] W. Cui, Z. Cao, J. Wei, "Dual-microphone source location method in 2-D space," IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings, vol. 4, pp. IV-IV, 2006.

[11] S.F. Talari, K. Mohamedpour, "Sensors and target geometry effects on passive source localization using joint time deference of arrival & gain ratio of arrival measurements," Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1624-1628, 2017.

[12] J.A. Luo, S.W. Pan, D.L. Peng, Z. Wang, Y.J. Li, "Source localization in acoustic sensor networks via constrained least-squares optimization using AOA and GROA measurements," vol. 18, no. 4, pp. 937, 2018.

[13] Z. Liu, D. Hu, Y. Zhao, Y.J. Zhao, "A closed-form distributed source localisation method using TDOA and GROA," vol. 106, no. 1, pp. 69-86, 2019.

[14] J.A. Luo, X.P. Zhang, Z. Wang, X.P. Lai, "On the accuracy of passive source localization using acoustic sensor array networks," vol. 17, no. 6, pp. 1795-1809, 2017.

[15] T. Yan, Y. Zhang, "TDOA time delay estimation algorithm based on cubic spline interpolation," International Conference on Computer Engineering and Networks, pp. 154-162, 2018.

[16] G. Giunta, "Digital algorithm for maximisation of symmetric ambiguity functions and application to signal time-delay estimation," IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing, vol. 146, no. 6, pp. 313-316, 1999.

[17] Y.T. Chan, K.C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Transactions on signal processing, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, 1994.

[18] Z. Heydari, A. Mahabadi, A. Ranjbar, "Intelligent speech localization in closed space using time difference of speech signal arrival," The Sixth Congress of Acoustical Engineering Society of Iran (National)-ASI, 2020.

[19] X. Chen, D. Wang, J. Yin, C. Jia, Y. Wu, "Bias reduction for TDOA localization in the presence of receiver position errors and synchronization clock bias," vol. 2019, no. 1, pp. 7, 2019.

[20] B. Jin, X. Xu, T. Zhang, "Robust time-difference-of-arrival (TDOA) localization using weighted least squares with cone tangent plane constraint," Sensors, vol. 18, no. 3, pp. 778, 2018.

[21] H.G. Kang, M. Graczyk, J. Skoglund, "On pre-filtering strategies for the GCC-PHAT algorithm," IEEE International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC), pp. 1-5, 2016.

[22] A.K. Tellakula, "Acoustic source localization using time delay estimation," Degree Thesis Bangalore, Supercomputer Education and Research Centre Indian Institute of Science, India, 2007.

[23] J. Chen, Y. Zhao, C. Zhao, Y. Zhao, "Improved Two-Step Weighted Least Squares Algorithm for TDOA-Based Source Localization," 19th International Radar Symposium (IRS), pp. 1-6, 2018.

[24] J.B. Allen, D.A. Berkley, "Image method for efficiently simulating small room acoustics,"

The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, pp. 943-950, 1979.

[25] E.A. Habets, "Room impulse response generator," Technische Universiteit Eindhoven, Tech. Rep, vol. 2, no. 4, pp. 1-20, 2006.

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 8, No. 2, 2021

(Research Article)
The effect of energy and interpolation combination on the accuracy of indoor localization based on the speech signal time difference of the arrival

Z. Heydari[1,3], A. Mahabadi[*1,3], A. Ranjbar[2,3]
1. Faculty of Engineering, Computer Engineering Group, Shahed University
2. Faculty of Engineering, Electronic Engineering Group, Shahed University
3. Acoustic Research Center, Shahed University

Received: 2020/09/15, Accepted: 2021/02/04

Abstract

Real time source localization is a difficult method and includes challenges such as computational complexity, noise, reflection and sensor layout architecture. The time difference of the arrival signal method is used because of its simplicity and low computational complexity and if the energy ratio of the signal is combined with the time difference of arrival the results will be somewhat improved. In this paper, a method for estimating the location of the speech source in a three-dimensional space is proposed to calculate the delay in the time difference of the arrival signals and noise resistance and reflection to sharpen the peak of the signal correlation. This method, while using the appropriate arrangement of sensors and applying phase spectrum smoothness while amplifying power along with cubic spline interpolation, to have high speed solution of nonlinear equation devices, improved Chan and weighted least squares two-stage algorithms with the ratio of sensor energy to signal, thus the basis sensor has benefitted. The mean error of the direct distance of the estimated coordinates from the true position of all measurements in the selected arrangement of the array in the Chan and weighted least squares two-stage combined with energy is 10.94 and 10.185 cm, respectively. The test results on real and simulation data show that the interpolation of cross-correlation and the combination of the energy ratio with the time difference of the arrival signal of the proposed method is efficacious.

Keywords: Sound source localization, Time difference of arrival signal, Weighted least squares algorithm, Signal energy ratio, Interpolation.

pp. 60-77 (In Persian)

[*]Corresponding author E-mail: mahabadi@shahed.ac.ir