یک روش ترکیبی مکان‌یابی منابع صوتی برای کاربردهای میدان دور و نزدیک

محمدرضا رحیمی[۱]، حامد صادقی*[۲]، امیر قاسمی[۳]، میلاد شمسی[۴]

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

۴. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

این مقاله یک روش ترکیبی از دو روش مکان‌یابی هذلولوی و تقاطع باند راستا برای مکان‌یابی منابع صوتی میدان دور یا نزدیک با استفاده از تخمین تاخیرهای زمانی (تی‌دی‌ایی- های) مشاهدات علامت در چند آرایه حسگری پیشنهاد می‌نماید. از آن‌جایی‌که براساس تحقیقات موجود در حوزه مکان‌یابی منابع صوتی، روش پرکاربرد و مطرح مکان‌یابی هذلولوی دقت کمی برای تعیین مکان دارد، در روش ترکیبی پیشنهاد شده، از روش هذلولوی فقط برای تخمین زاویه ورود موج صوتی به هر آرایه بر مبنای (تی‌دی‌ایی‌های) مشاهدات علامت در حسگرها استفاده می‌گردد. سپس با بهره‌گیری از زاویه‌های ورود علامت (حداقل به دو آرایه)، مکان منبع به روش تقاطع راستا تعیین خواهد گردید. بدین صورت در این روش مکان‌یابی ترکیبی، ضمن بهره‌گیری از مزایای روش هذلولوی، دقت تخمین مکان منبع صوتی نسبت به روش مکان‌یابی صرفاً هذلولوی، بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. از آن‌جایی‌که مشکل عمومی روش هذلولوی و نیز مکان‌یابی ترکیبی، استفاده از روش زمان‌بر کمینه‌سازی نِلدِرمید برای کمینه‌سازی تابع هزینه‌ی هذلولوی می‌باشد، در این مقاله یک روش نیز برای بهینه‌سازی محدوده‌ی جستجوی الگوریتم نِلدِرمید پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که متناسب با تعداد حسگرها، محدوده‌ی جستجو کاهش و در نتیجه سرعت اجرای الگوریتم نلدرمید افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، منابع صوتی، جهت ورود، تقاطع راستاها، تخمین تاخیرهای زمانی

۱. مقدمه

یکی از موضوعات تحقیقاتی پر سابقه در پردازش صدا، مبحث مکان‌یابی[۱] منابع صوتی توسط سامانه‌های حسگری است [۱-۳]. در یک تعریف ساده، تعیین مختصات مکانی مولد علامت صوتی با بکارگیری تعدادی حسگر[۲] صوتی را مکان‌یابی گویند. معمولاً علامت‌های صوتی با توجه به باند بسامدی‌شان تقسیم می‌شوند. بسته به بسامد علامت صوتی دریافتی (پایین، میانی و یا بالا)، برد انتشار امواج ناشی از منابع صوتی متفاوت خواهد بود، لذا الگوریتم‌های مختلفی به‌منظور مکان‌یابی منبع استفاده می‌شوند [۴-۶]. با توجه به گذار امواج صوتی در لایه‌های مختلف جوی، امواج صوتی بسامد پایین قابلیت انتشار تا فواصل طولانی را دارند [۷]، لذا مکان‌یابی منابع ساطع‌کننده‌ی این امواج حتی در فواصل دور نیز ممکن خواهد بود؛ به شرط آن‌که توان منبع به اندازه کافی زیاد باشد. از این‌رو مکان‌یابی منابع علامت، به دو دسته‌ی میدان دور و میدان نزدیک طبقه‌بندی می‌شود [۴].

مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی مکان‌یابی علامت‌های صوتی در حوزه زمان نشان می‌دهند که عموماً روش‌های مکان‌یابی [۸] منابع براساس یک روند کلی عمل می‌نمایند. شکل ۱ روند کلی مکان‌یابی با استفاده از یک آرایه[۳] متشکل از n ($n \geq ۲$) حسگر (میکروفون) را نشان می‌دهد. روش مکان‌یابی هذلولوی[۴] [۱، ۳-۴، ۸-۹] رایج، از این روند تبعیت نموده و لذا مختصات مکانی منبع علامت را با استفاده از تنها یک آرایه n- حسگری، تخمین می‌زند.

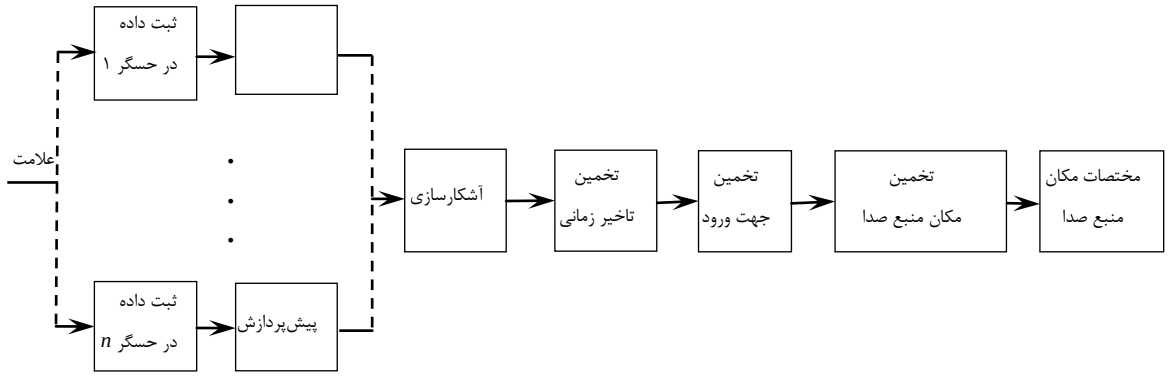
از آن‌جایی‌که مکان‌یابی میدان دور منابع صوتی با استفاده

* نویسنده پاسخگو: h.sadeghi.2015@ieee.org

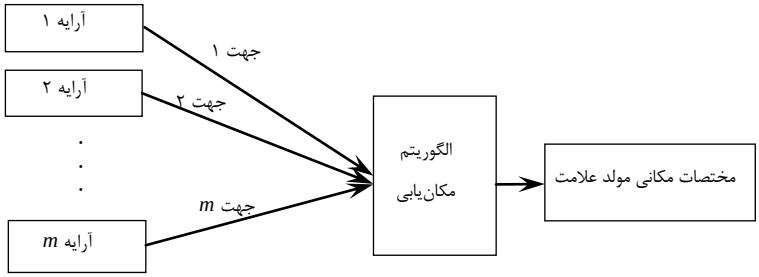
[1] Localization
[2] Sensor
[3] Array
[4] Hyperbolic localization

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]



شکل ۱ الگوریتم مکان‌یابی علامت با استفاده از یک آرایه شامل n حسگر.



شکل ۲ روند کلی مکان‌یابی علامت با استفاده از شبکه حسگری شامل m آرایه.

از یک آرایه، دقت کمی دارد، معمولاً در عمل از مشاهدات چند آرایه برای تخمین مکان منبع علامت استفاده می‌گردد [۱۰] که به این سرایش، شبکه حسگری گویند. شکل ۲ نمودار بلوکی کلی مکان‌یابی منبع توسط یک شبکه حسگری شامل $m \geq ۲$ آرایه را نشان می‌دهد. در حالت کلی، برای مکان‌یابی مبتنی بر شبکه حسگری، باید چند فرآیند اصلی طی شود: ۱- انتخاب تعداد و چیدمان آرایه‌ها نسبت به یکدیگر، ۲- انتخاب پیکربندی[1] آرایه‌ها (مشخص نمودن تعداد حسگرها و چیدمان آن‌ها در هر آرایه)، ۳- پیش- پردازش[2]؛ در مرحله‌ی پیش- پردازش ممکن است کارهایی هم‌چون افزایش یا کاهش نرخ نمونه‌برداری[3] و کاهش نوفه[4] انجام شود، ۴- آشکارسازی علامت؛ لازم به ذکر است در برخی از الگوریتم‌های مکان‌یابی مانند پی‌اِم‌سی‌سی[5] [۱۱] آشکارسازی و جهت‌یابی با هم انجام می‌شوند، ۵- تخمین تأخیر زمانی (تی‌دی‌ایی)[6]؛ از جمله روش‌هایی که برای تخمین تأخیر زمانی علامت در هر حسگر نسبت به حسگر مرجع وجود دارد می‌توان به روش‌های هم‌بستگی متقابل کلاسیک[7] [۱۲]، خانواده‌ی روش‌های هم‌بستگی متقابل تعمیم‌یافته[8] [۱۳] (تبدیل هم‌دوسی هموارشده[9] و تبدیل فاز (فت[10])، روش پیش‌بینی خطی فضایی[11] [۱۴]، ضریب هم‌بستگی متقابل چندکاناله[12] [۱۴] و فنون ویژه- بردار پایه[13] اشاره نمود. خدور [۱۵] در سال ۲۰۱۱ با مقایسه روش‌های مختلف در تخمین تأخیر زمانی، به دقت بالای روش فت نسبت به سایر روش‌های تخمین تأخیر زمانی اذعان نمود. در این مقاله فرض می‌شود که تأخیرهای زمانی مشاهدات علامت در حسگرها محاسبه شده و به‌عنوان ورودی روش ترکیبی پیشنهادی خواهد بود. ۶- تخمین جهت ورود[14] علامت به هر آرایه؛ در هر آرایه، جهت ورود علامت با

[1] Configuration
[2] Pre-processing
[3] Up-sampling or down-sampling
[4] Noise reduction
[5] PMCC; Progressive Multi-Channel Correlation

[6] TDE; Time Delay Estimation
[7] CC; Classical Cross-Correlation
[8] GCC; Generalized Cross-Correlation
[9] SCOT; Smoothed COherence Transform
[10] PHAT; PHAse Transform
[11] Spatial Linear Prediction Method
[12] MCCC; Multi channel Cross-Corrlation Coefficient
[13] Eigenvector-based techniques
[14] DOA; Direction of Arrival

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

استفاده از تأخیرهای زمانی مستخرج از مرحله قبل، تخمین زده می‌شود. روش‌های مختلفی [۴، ۱۶-۱۷] برای تخمین جهت ورود علامت وجود دارند که ساده‌ترین آن‌ها، با فرض سرعت ثابت و معین برای موج در محیط و با استفاده از دو حسگر تحت تأثیر موج میدان‌دور انجام می‌پذیرد. ۷- تخمین مختصات مکان هدف براساس خروجی چند آرایه؛ همانند مراحل قبل، روش‌های مختلفی برای تخمین مختصات مکان هدف در حوزه زمان پیشنهاد شده‌اند. تعدادی از این روش‌ها (مانند روش‌های حداقل مربعات[1] [۴، ۸ و ۱۸] و بیشینه درست‌نمایی[2] [۱۹]) مختصات مکانی هدف را به‌طور مستقیم با استفاده از تاخیرهای زمانی مشاهدات حسگرها نسبت به حسگر مرجع و برخی دیگر [۱۰ و ۲۰] با استفاده از تخمین‌های جهت ورود علامت‌های ثبتی در چند آرایه تخمین می‌زنند.

مطالعات انجام‌شده (از سال ۱۹۷۶ تاکنون) نشان می‌دهند که روش‌های مبتنی بر حداقل مربعات هذلولوی[3]، یکی از پرکاربردترین روش‌های مکان‌یابی بکار رفته در مقالات است [۴، ۸، ۱۸و۲۱-۲۳]. در سال ۱۹۷۶، فوی [۲۱] با استفاده از روش خطی‌سازی سری تیلور[4] و حل باتکرار[5]، معادلات تابع هزینه روش حداقل مربعات هذلولوی را حل نمود. البته این روش نیاز به مقادیر اولیه دقیق و صرف زمان زیاد دارد. لذا در سال ۱۹۹۰ فانگ [۲۲] با یک پیکربندی خاص حسگری در آرایه (۳حسگر) معادلات هذلولوی دو بعدی را حل نمود. در این روش حداقل به تعداد مجهولات تابع هزینه (مختصات مکان منبع)، تخمین تأخیر زمانی (تی‌دی‌ایی)[6] نیاز است. افزایش تعداد تی‌دی‌ایی- ها، تأثیری در دقت روش نخواهد داشت.

آبِل [۲۳] در سال ۱۹۹۰ روش بهینه‌ای ارائه نمود که در صورت بزرگ‌بودن ماتریس اطلاعات فیشر، پاسخ مناسبی دارد. در سال ۱۹۹۴، چان [۱] برای حل معادلات هذلولوی، پاسخی به شکل بسته[7] را که تخمین‌گر بیشینه درست‌نمایی بود، استفاده نمود. این روش با فرض کوچک‌بودن خطای تخمین تی‌دی‌ایی- ها قابل استفاده می‌باشد. هوو [۳] در سال ۲۰۱۲، دو روش برای کاهش بایاس خطای روش چان ارائه نمود. یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد بهینه‌سازی تابع هزینه هذلولوی، جستجو یا کمینه‌سازی نِلدِرمید[8] می‌باشد که بیش‌تر مقالات معرفی‌شده از آن بهره گرفته‌اند. هرچند کمینه‌سازی نلدرمید روش زمان‌بر و وقت‌گیری می‌باشد، ولی به دلیل دقت خوب این روش همواره مورد توجه بوده است. باید توجه داشت که هیچ یک از روش‌های حل معرفی‌شده در فوق، اعم از تحلیلی و با تکرار، قابلیت تخمین سرعت صدا در محیط را ندارند و با فرض سرعت صدای ثابت و مشخص، شروع به تخمین می‌نمایند.

از آن‌جایی‌که روش هذلولوی، از تی‌دی‌ایی- های مشاهدات ثبت‌شده در حسگرها برای تخمین زاویه ورود علامت به آرایه استفاده می‌نماید، می‌توان به‌صورت تقریبی این روش را مستقل از نوع علامت صوتی (بسامد پایین، میانی و بالا) در نظر گرفت. بدین معنی که برای مکان‌یابی هر نوع منبع صدا با این روش، تنها لازم است که روش تخمین تی‌دی‌ایی متناسب با آن علامت بکار رود. از دیگر مزایای روش مکان‌یابی حداقل مربعات هذلولوی، می‌توان به مقاوم بودن نتایج آن در برابر ورودی‌های (علامت‌های) آغشته به نوفه اشاره نمود. هم چنین بر خلاف اکثریت روش‌های مکان‌یابی، روش هذلولوی از سرعت مؤثر[9] صدا در محیط آرایه به جای سرعت صدا در مسیر بین منبع و آرایه بهره می‌برد. وجود چنین مزایایی، از دلایل کاربردی بودن روش هذلولوی می‌باشد.

مقالات مختلف [۱، ۳، ۴، ۸، ۱۸، ۲۱-۲۳] معمولاً ضعف روش مکان‌یابی هذلولوی را در تعیین مختصات (در حالت دکارتی: طول- عرض؛ و در حالت قطبی: شعاع- زاویه) دقیق منبع صدا تصریح می‌نمایند. در این مقاله با بررسی رفتار تابع هزینه هذلولوی نسبت به دقت تخمین تی‌دی‌ایی- ها، نشان داده می‌شود (به پیوست ۱ مراجعه شود) که هرچند روش هذلولوی با یک آرایه نمی‌تواند مختصات دقیق منبع صدا را به‌دست آورد، اما در تخمین زاویه ورود علامت (θ) به آرایه دقت مناسبی دارد، لیکن

[1] LS; Least Square
[2] ML; Maximum Likelihood
[3] Hyperbolic least square
[4] Taylor series
[5] Iterative
[6] TDE; Time Delay Estimation
[7] Closed form
[8] Nelder-Mead Search
[9] Celerity

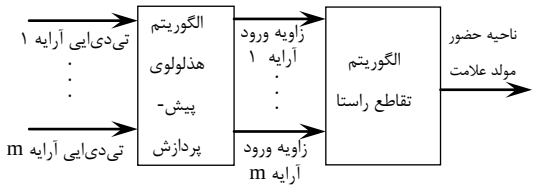
[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

می‌توان این زاویه را به‌عنوان یکی از خروجی‌های جانبی روش هذلولوی، مطابق زیر تعیین نمود:

$$\theta = tan^{-1}\left(\frac{\text{عرض جغرافیایی مکان منبع صدا}}{\text{طول جغرافیایی مکان منبع صدا}}\right) \quad (۱)$$

در این مقاله، یک روش ترکیبی برای مکان‌یابی منابع صوتی در میدان دور و نزدیک پیشنهاد می‌گردد. این روش حداقل نیاز به دو آرایه برای تخمین ناحیه حضور منبع دارد. البته افزایش تعداد آرایه‌ها، دقت تخمین را افزایش خواهد داد. فرض می‌شود که تأخیرهای زمانی (تی‌دی‌ایی-های) مشاهدات علامت در آرایه‌های حسگری با یکی از روش‌های معرفی‌شده، محاسبه شده و به‌عنوان ورودی روش مکان‌یابی پیشنهادی می‌باشد. در روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی، ابتدا زاویه ورود علامت به هر آرایه حسگری توسط الگوریتم مکان‌یابی هذلولوی با کمینه‌سازی نِلدِرمید تخمین زده می‌شود. سپس با استفاده از روش تقاطع راستا[1] با الگوی جبهه موج صفحه‌ای [۲۰] و زاویه ورود علامت محاسبه شده در روش هذلولوی، مکان مولد علامت صوتی محاسبه می‌گردد. شکل ۳ روند کلی روش ترکیبی مکانی‌یابی پیشنهادی این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۳ الگوریتم روش ترکیبی مکان‌یابی پیشنهادی این مقاله.

ساختار ادامه مقاله به این شرح است: در بخش ۲، الگوی سامانه و پیش‌فرض‌ها برای روش مکان‌یابی حداقل مربعات هذلولوی مبتنی بر روش جستجوی نلدرمید معرفی می‌شود. روش پیشنهادی مکان‌یابی بسط داده می‌شود. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی‌ها و در بخش ۴ نیز بحث، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

[1] Cross bearing

۲. روش مکان‌یابی پیشنهادی

۲-۱. الگوی سامانه و پیش‌فرض‌ها

همان‌طور که ذکر شد الگوی اصلی روش پیشنهادی این مقاله بر مبنای روش مکان‌یابی هذلولوی می‌باشد. در روش مکان‌یابی حداقل مربعات هذلولوی مبتنی بر محاسبه‌ی تأخیرهای زمانی علامت‌های صوتی ثبت‌شده، ابتدا یک تابع هزینه محاسبه شده و سپس با استفاده از روش جستجوی نلدرمید، مسئله بهینه‌سازی این تابع هزینه به منظور محاسبه مختصات مکان مولد علامت (با استناد به معادله (۱) جهت ورود علامت) حل می‌شود. برای محاسبه این تابع هزینه، فرض کنید که موقعیت مکانی حسگر i-ام از تعداد $N+1$ حسگر به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{r}_i \triangleq [x_i, y_i, z_i]^T, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (۲)$$

که در آن T نماد ترانهاده ماتریس و x_i، y_i و z_i به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع مختصاتی i-امین حسگر می‌باشند. برای سادگی محاسبات، موقعیت اولین حسگر به‌عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته می‌شود. موقعیت منبع صدا نیز $\vec{r}_s \triangleq [x_s, y_s, z_s]^T$ می‌باشد. لذا فاصله بین i-امین حسگر و منبع عبارت خواهد بود از:

$$D_i \triangleq \|\vec{r}_s - \vec{r}_i\| = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} \quad (۳)$$

با توجه به تعاریف بالا، تفارق مسیر[2] بین دو حسگر i و j (d_{ij})، یعنی همان تفاضل مسیرهای طی‌شده توسط موج برای رسیدن به حسگرهای i و j، عبارت خواهد بود از:

$$d_{ij} \triangleq D_i - D_j \qquad i, j = 0, \dots, N \quad (۴)$$

این متغیرها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. با فرض حرکت موج در خط مستقیم (جبهه موج میدان دور) و با سرعت ثابت در محل آرایه‌ها، افتراق مسیر در رابطه ۴ را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$d_{ij} = c.\tau_{ij} \qquad i, j = 0, \dots, N \quad (۵)$$

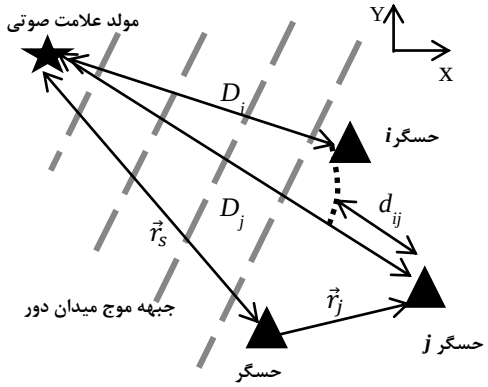
که در آن c سرعت صدا در محل آرایه و τ_{ij} اختلاف زمان ورود علامت بین دو حسگر i و j می‌باشند. تعداد کل این تاخیرها $\frac{N(N+1)}{2}$ است. برای کاهش محاسبات می‌توان اختلاف زمانی N حسگر را نسبت به حسگر مرجع ($\tau_{i0}, i = 1, \dots, N$) در نظر گرفت. در این مقاله فرض

[2] Path difference

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

می‌شود که تی‌دی‌ایی- ها محاسبه شده‌اند.



شکل ۴ نمایش متغیرهای مورد استفاده در مکان‌یابی هذلولوی.

۲-۲. الگوریتم پیشنهادی

هدف این مقاله، مکان‌یابی منبع صدا با توجه به الگوی ارائه‌شده در شکل ۳ است. در این بخش، ابتدا کلیات روش هذلولوی به‌عنوان روش جهت‌یابی در الگوریتم مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی ارائه می‌شود و در ادامه یک نمونه روش نلدرمید ارتقاء یافته با زمان محاسبات کم و دقت بیشتر نسبت به روش نلدرمید معمول برای کمینه‌سازی تابع هزینه‌ی هذلولوی پیشنهاد می‌شود. در روش نلدرمید ارتقایافته، پیشنهادی برای بهینه‌نمودن محدوده جستجوی الگوریتم برای آرایه‌های حسگری ارائه می‌گردد. سپس روش تقاطع راستا به‌عنوان بلوک نهایی الگوریتم مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی تشریح می‌گردد.

۲-۲-۱. روش هذلولوی

افتراق مسیرهای طی‌شده توسط موج برای رسیدن به حسگرهای i و مرجع (d_{i0}) عبارت خواهند بود از:

$$d_{i.} \triangleq \|\vec{r}_s - \vec{r}_i\| - \|\vec{r}_s\| \qquad i = 1, \dots, N \qquad (۶)$$

به کمک (۳) می‌توان این‌گونه نوشت:

$$d_{i.} = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} - \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \qquad (۷)$$

مشاهده می‌شود که رابطه فوق نسبت به پارامترهای مجهول منبع ($\vec{r}_s \triangleq [x_s, y_s, z_s]^T$)، مکان هندسی یک هذلولوی می‌باشد و لذا این رابطه را تابع هذلولوی می‌نامند [۱، ۳ و ۸]. با حل دستگاه معادلات هذلولوی (۷) می‌توان موقعیت منبع را به‌دست آورد. این دستگاه معادلات غیرخطی بوده و حل تحلیلی ندارد. لذا برای حل آن باید از روش‌های باتکرار و تکاملی[1] استفاده نمود. مزیت مهم و کاربردی رابطه (۷)، بکارگیری سرعت موثر صدا در محل آرایه می‌باشد. در حالی‌که اکثر روش‌های مکان‌یابی، به محاسبه سرعت موج در طول مسیر حرکت نیاز دارند. مزیت دیگر رابطه (۷)، کاربرد آن در مکان‌یابی منابع مولد علامت‌های صوتی با باندهای بسامدی مختلف می‌باشد، زیرا وابسته به بسامد کاری مولد نمی‌باشد. برای سهولت محاسبات، بهتر است معادلات بیان شده را در دستگاه مختصات کروی بازنویسی کرده و نمایش داد. لذا برای تغییر نمایش معادلات هذلولوی، فاصله منبع تا حسگر مرجع و هم‌چنین فاصله سایر حسگرها تا حسگر مرجع را به ترتیب با R_s و R_i به‌صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$$R_i \triangleq \|\vec{r}_i\| = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \qquad i = 1, \dots, N$$
$$R_s \triangleq \|\vec{r}_s\| = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \qquad (۸)$$
$$\theta_s = tan^{-1}\left(\frac{y_s}{x_s}\right)$$

اگر طرفین معادله اخیر به توان دو رسانده شود، و با جای‌گذاری متغیرها در نهایت خواهیم داشت:

$$\vec{r}_i^T \vec{r}_s + d_{i.} R_s = \frac{1}{2}\left(R_i^2 - d_{i0}^2\right) \qquad i = 1, \dots, N \qquad (۹)$$

این معادلات به توابع کروی معروف می‌باشند. دستگاه معادلات (۹) علاوه بر دارا بودن مزایای تابع هذلولوی، نسبت به پارامترهای مجهول R_s و $\vec{r}_s$ نیز خطی است. حال برای حل دستگاه معادلات (۹) می‌توان معادلات را به شکل بسته زیر نوشت:

$$G\vec{w} = \vec{h} \qquad (۱۰)$$

آن:

$$G \triangleq [S \vdots \vec{d}];$$
$$S \triangleq \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix}; \qquad (۱۱)$$
$$\vec{d} = \begin{bmatrix} d_{1.} \\ d_{2.} \\ \vdots \\ d_{N.} \end{bmatrix}$$

[1] Evolutionary

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

$$\vec{w} \triangleq \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ R_s \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$\vec{h} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} R_1^2 - d_{10}^2 \\ R_2^2 - d_{20}^2 \\ \vdots \\ R_N^2 - d_{N0}^2 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

می‌باشند. در روابط بالا [.:.] به مفهوم اتصال دو ماتریس می‌باشد. حال با تعریف فوق می‌توان معادله نهایی را به‌صورت زیر نمایش داد:

$$A = G\vec{w} - \vec{h} = 0$$

برای حل دستگاه معادلات ماتریسی فوق، همانند تابع هذلولوی، می‌توان از روش جستجوی تکاملی و با تکرار استفاده نمود [۸]. اما از آن جایی که این دو روش زمان بر می‌باشند، تعدادی از مقالات سعی در حل مستقیم دستگاه معادلات خطی (۱۰) نموده‌اند [۱، ۳، ۸ و ۲۱-۲۳].

رابطه (۱۰) معادل این است که هر یک از مولفه‌های ماتریس A صفر شود. در روش کمینه‌سازی حداقل مربعات به‌جای کمینه‌سازی ماتریس A، مجموع مجذورات مولفه‌های ماتریس A ($Y = A^T A$) کمینه می‌شود. در این مقاله، دستگاه معادلات (۱۰) تحت معیار حداقل مربعات حل می‌شود. لذا باید تابع هزینه:

$$Y = \left(G\vec{w} - \vec{h}\right)^T \left(G\vec{w} - \vec{h}\right) \quad (۱۴)$$

تحت قید معیار حداقل مربعات

$$\vec{w}^T \Sigma\, \vec{w} = 0 \quad (۱۵)$$

کمینه گردد که در آن $\Sigma \triangleq diag\left(1, 1, 1, -1\right)$ و $diag(.,.,.,.)$ ماتریس قطری و متعامد می‌باشند. به عبارت دیگر با مسئله بهینه‌سازی زیر روبرو هستیم:

$$\min_{w} Y$$

مسئله فوق تحت قید زیر حل می‌شود:

$$\vec{w}^T \Sigma\, \vec{w} = 0$$

البته همان‌طور که اشاره شد، مسئله بهینه‌سازی فوق به کمک الگوریتم نلدرمید حل خواهد شد.

۲-۲-۱-۱. روش پیشنهادی حل مسئله کمینه‌سازی تابع هذلولوی

برای حل مسئله کمینه‌سازی مقید مطرح‌شده بخش قبل (روابط (۱۴) و (۱۵))، الگوریتم‌های مختلفی استفاده می‌شوند. در این مقاله، الگوریتم جستجوی نِلدِرمید [۲۴] که روشی قدرت‌مند و سریع برای یافتن کمینه مطلق است، برای حل مسئله (۱۵) پیشنهاد می‌گردد.

با وجود اینکه اکثر روش‌های مکان‌یابی و تخمین جهت بر مبنای الگوریتم‌های جستجوی فضایی (کلی یا محلی) عمل می‌نمایند، لیکن الگوریتم‌های جستجوی فضایی دارای دو عیب عمده می‌باشند؛ نخست این‌که در کمینه‌سازی توابع هدف شامل کمینه‌های محلی، خطای جستجوی زیادی دارند. دوم این‌که نیازمند زمان به نسبت زیادی برای محاسبه پاسخ هستند. لذا در ادامه، این مقاله روشی پیشنهاد می‌شود که با استفاده از علامت تاخیر زمانی[1] علامت‌های صوتی ثبتی، ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید محدود می‌گردد.

۲-۲-۱-۱-۱- ناحیه جستجوی بهینه پیشنهادی برای الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید

در این بخش از مقاله، روشی برای محدود نمودن ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی جستجوی فضایی نلدرمید پیشنهاد می‌شود. با توجه به علامت‌های (مثبت و یا منفی بودن) بردار اختلاف زمانی ثبت علامت در حسگرها می‌توان در الگوریتم‌های جستجوی فضایی، ناحیه جستجو را محدود نمود. ابتدا حالت ساده دو حسگری در نظر گرفته می‌شود و در نهایت روش ارائه شده برای حالت چندحسگری گسترش داده می‌شود.

اگر زمان دریافت علامت در حسگر ۱ و ۲ به ترتیب با t_1 و t_2 نمایش داده شود، اختلاف زمانی دریافت علامت در این دو حسگر، به‌صورت $\Delta t = t_2 - t_1$ تعریف می‌گردد. چون این اختلاف زمانی به مکان منبع صدا وابسته است، لذا مطابق شکل ۵ با فرض جبهه‌ی موج صفحه‌ای[2] می‌توان سه حالت برای اختلاف زمانی علامت‌های ثبتی حسگرها در نظر گرفت:

۱- اگر محل وقوع رویداد به حسگر ۱ نزدیک‌تر باشد (مانند شکل ۵، رویداد ۱) در این حالت $\Delta t > 0$ ،

۲- اگر محل وقوع روی‌داد به حسگر ۲ نزدیک‌تر باشد

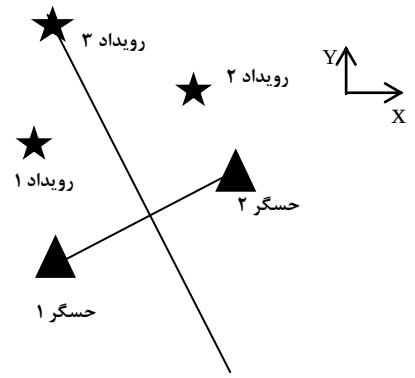
[1] Time delay
[2] Planar wave

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

(مانند شکل ۵، رویداد ۲) در این حالت $\Delta t < ۰$ ،

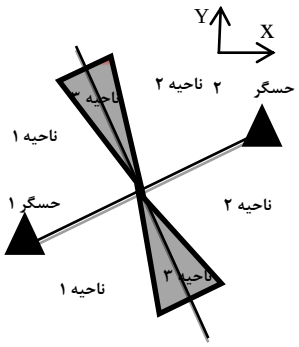
۳- اگر رویداد بر روی خط (صفحه) عمودمنصف خط واصل دو حسگر واقع شود (مانند شکل ۵، رویداد ۳) در این حالت $\Delta t = ۰$ خواهد بود.



شکل ۵ مکان‌های مختلف وقوع رویداد نسبت به حسگرها.

در نتیجه به‌راحتی و با دانستن بردار اختلاف زمانی ثبت علامت در حسگرها و در نظر گرفتن سه حالت اشاره شده، می‌توان ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی را محدود نمود. به‌عنوان مثال، برای دو حسگر در حالتی که Δt مثبت و یا منفی باشد، ناحیه جستجو به نصف کاهش می‌یابد. در ادامه این موضوع به تفصیل تشریح می‌گردد.

برای فواصل نزدیک به عمودمنصف خط واصل دو حسگر و بس‌آمد نمونه‌برداری بالای[1] حسگرها، اختلاف زمانی صفر معادل این است که محل وقوع رویداد، روی عمودمنصف خط واصل دو حسگر قرار دارد (مانند شکل ۵، رویداد ۳). لیکن در باند نزدیک عمودمنصف خط واصل به‌ازای تاخیرهای زمانی ثبت‌شده‌ی کم تر از معکوس بسامد نمونه‌برداری حسگرها، اختلاف زمانی به‌اشتباه صفر تخمین زده می‌شود. برای رفع این مشکل، تغییر ناحیه جستجوی متناظر با $\Delta t = ۰$ پیشنهاد می‌گردد. ناحیه پیشنهادی در این حالت، مطابق ناحیه ۳ (باند تیره‌رنگ) شکل۶ می‌باشد که با دورشدن از خط واصل دو حسگر ناحیه متناظر نیز گسترش می‌یابد.



شکل ۶ ناحیه جستجوی بهینه‌ی پیشنهادی برای الگوریتم کمینه‌سازی نِلدِرمید متناظر با اختلاف زمانی صفر.

معادله عمودمنصف خط واصل بین دو حسگر (Y=mX+h) را در نظر بگیرید. در این معادله، m شیب خط عمودمنصف و h عرض از مبدا آن می‌باشد. اکنون اگر $\Delta t < ۰$ باشد ناحیه ۲ (نیم‌صفحه نزدیک به حسگر ۲ یا Y>mX+h) و اگر $\Delta t > ۰$ باشد، ناحیه ۱ (نیم‌صفحه نزدیک به حسگر ۱ و یا Y<mX+h) به‌عنوان محدوده جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی پیشنهاد می‌گردد.

روابط مطرح شده را می‌توان در قید زیر خلاصه نمود:

$$sign\left(\left[۱, -m, -h\right] \times \left[Y, X, ۱\right]^T\right) \times sign\left(t(Y_{Low}) - t(Y_{High})\right) > ۰ \quad (۱۶)$$

که در آن $sign$ تابع علامت، T ترانهاده، $t(Y_{Low})$ زمان ثبت علامت در حسگر با مختصات Y کم‌تر و $t(Y_{High})$ زمان ثبت علامت در حسگر با مختصات Y بالاتر می‌باشد.

به بیان ساده‌تر، ناحیه‌ای از صفحه که تمام نقاط ((X,Y)-های) آن در رابطه‌ی بالا صدق نماید، به‌عنوان ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی انتخاب می‌شود.

آن‌چنان‌که گفته شد اگر $\Delta t = ۰$ باشد، ناحیه ۳ به‌عنوان ناحیه جستجو انتخاب می‌گردد. در این حالت، ناحیه بین دو خط با شیب‌های $m + dm$ و $m - dm$ خواهد بود که در آن dm مقدار کوچکی در محدوده ۰٫۰۵ تا ۰٫۱ پیشنهاد می‌شود. بنابراین به بیان ریاضی، ناحیه‌ای از صفحه که تمام نقاط ((X,Y)-های) آن در رابطه‌ی زیر صدق نمایند، به‌عنوان ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی در $\Delta t = ۰$ انتخاب می‌شود:

[1] بس‌آمد بالا؛ بیش از دوبرابر بس‌آمد نمونه‌برداری حسگرهای صوتی بسامد پایین (در حدود ۲۰۰ هرتز)

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران/سال سوم/شماره ۱/ بهار و تابستان ۱۳۹۴

$$sign\left(\left[1,-m-dm,-h\right]\times\left[Y,X,1\right]^T\right)\times sign\left(\left[1,-m+dm,-h\right]\times\left[Y,X,1\right]^T\right)<0 \quad (۱۷)$$

با توضیحات ارائه شده، می‌توان ناحیه جستجوی پیشنهادی الگوریتم کمینه‌سازی برای دو حسگر را مطابق زیر تعیین نمود:

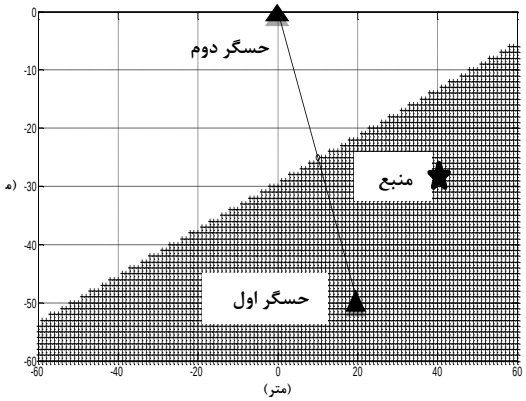
۱- ابتدا اختلاف زمانی علامت‌های ثبت‌شده در دو حسگر محاسبه می‌شوند.

۲- اگر اختلاف زمانی محاسبه شده در دو حسگر مخالف صفر بود، ناحیه جستجوی پیشنهادی بر اساس (۱۶) مشخص می‌شود.

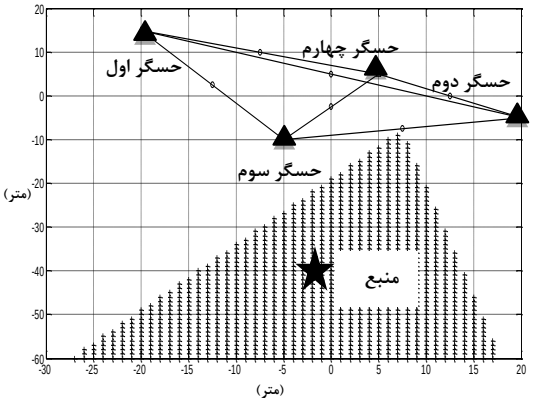
۳- اگر اختلاف زمانی دو حسگر نزدیک صفر بود، ناحیه جستجوی پیشنهادی بر اساس (۱۷) مشخص می‌شود.

به عنوان مثال، فرض کنید مطابق شکل ۷ آرایه‌ای با دو حسگر با مختصات [۵۰- , ۲۰] و [۰ , ۰] متر داشته باشیم. در این حالت، اگر منبعی در مختصات [۳۰- , ۵۰] قرار داشته باشد، اختلاف زمان دریافت علامت در حسگر دوم ۰/۰۶ ثانیه نسبت به حسگر اول تاخیر خواهد داشت. سرعت صدا در محیط آرایه ۳۹۰ متر بر ثانیه فرض می‌شود. با توضیحات بالا، چون اختلاف تاخیرهای زمانی عددی مثبت است، لذا ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی طبق (۱۶) تعیین می‌شود. ناحیه هاشورخورده شکل۷، ناحیه پیشنهادی مستخرج از (۱۶) می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود نیم‌صفحه نزدیک به حسگر اول، به‌عنوان ناحیه جستجو انتخاب خواهد شد. نکته قابل توجه این است که در این روش، ناحیه جستجوی الگوریتم حداقل به نصف کاهش می‌یابد. در ادامه ملاحظه می‌شود که افزایش تعداد حسگرها، می‌تواند ناحیه جستجو را بسیار کوچک‌تر نماید و در نتیجه الگوریتم جستجو، با خطا و زمان کم‌تر اجرا می‌شود.

اگر آرایه‌ای بیش از دو حسگر داشت (N حسگر)، باید قیود مطرح شده برای هر زیرمجموعه دوتایی از حسگرها در نظر گرفته شوند. سپس ناحیه اشتراک میان نتایج حاصل از اجرای قیود برای زیرمجموعه‌های مذکور، به‌عنوان ناحیه جستجوی پیشنهادی انتخاب می‌گردد. شکل ۸، ناحیه جستجوی پیشنهادی مربوط به آرایه‌ای با ۴ حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۷ تعیین ناحیه جستجوی بهینه برای روش کمینه‌سازی نلدرمید با استفاده از روش پیشنهادی (الگوریتم ۱) در یک آرایه‌ی دو حسگری.



شکل ۸ تعیین ناحیه جستجوی بهینه برای روش کمینه‌سازی نلدرمید با استفاده از روش پیشنهادی (الگوریتم ۱) در یک آرایه‌ی چهارحسگری.

ناحیه هاشورخورده به‌عنوان ناحیه جستجو انتخاب شده است. مختصات مکان حسگرها و زمان دریافت علامت متناسب با هر کدام از آن‌ها در ماتریس‌های زیر آمده است. مولد علامت در [۵۰- , ۰] قرار دارد. سرعت صدا در محیط آرایه ۳۹۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

[۵,۵ ; ۵,-۱۰ ; -۵ , ۲۰ ; ۱۵,-۲۰] = مختصات حسگرها (متر)

[۰; -۰/۰۵۵۲; -۰/۰۸۱۵; -۰/۰۳۷۶] = زمان دریافت علامت در هر حسگر (ثانیه)

بررسی یک حالت خاص:

در قیود مطرح شده در روابط (۱۶) و (۱۷) فرض بر این بود که شیب خط عمودمنصف عددی معین باشد. اما برای حالتی که مختصات Y دو حسگر برابر باشد، شیب خط

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

واصل دو حسگر برابر صفر و در نتیجه شیب خط عمود منصف بی‌نهایت خواهد شد. برای حل این مشکل در این حالت، معادله خط عمودمنصف به شکل $X = X_m$ در نظر گرفته می شود که در آن X_m طول نقطه‌ی میانی دو حسگر می‌باشد. با توضیحات مطرح شده و در حالت $\Delta t \neq ۰$ قید (۱۶) به‌صورت زیر اصلاح می‌شود:

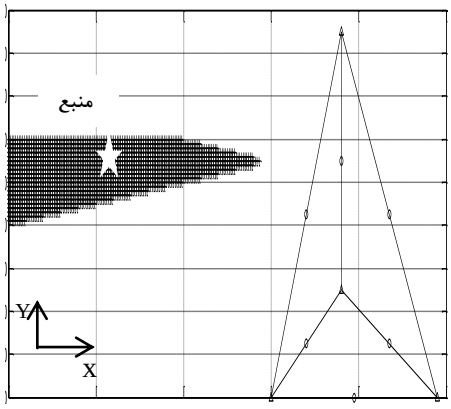
$$sign(X - X_m) \times sign\left(t(X_{Low}) - t(X_{High})\right) > ۰ \quad (۱۸)$$

هم چنین در حالت $\Delta t = ۰$ قید (۱۷) به‌صورت زیر تغییر می‌نماید:

$$\frac{|Y - Y_m|}{|X - X_m|} > M \quad (۱۹)$$

که در آن Y_m و X_m مختصات نقطه میانی دو حسگر و M یک عددی اختیاری بزرگ در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ می‌باشد که به‌صورت تجربی به‌دست آمده است.

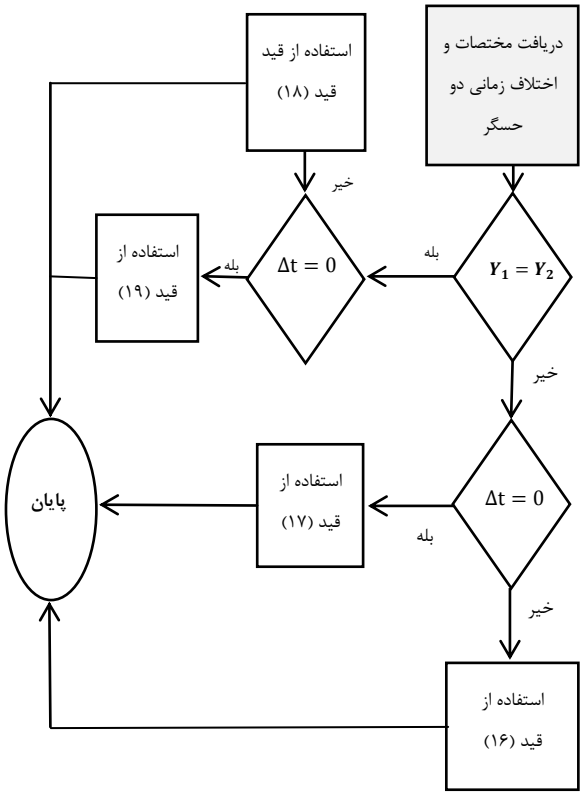
به‌عنوان جمع‌بندی، تعیین ناحیه جستجوی پیشنهادی الگوریتم کمینه‌سازی برای حالت دو حسگری در الگوریتم ۱ نشان داده شده است. تمامی شکل‌های ۷-۹ بر مبنای این الگوریتم بدست آمده‌اند.



شکل ۹ تعیین ناحیه جستجوی بهینه برای روش کمینه‌سازی نلدرمید با استفاده از روش پیشنهادی (الگوریتم ۱) در یک آرایه چهارحسگری.

در مثالی دیگر برای آرایه‌ای با مختصات [۴۰,۸۵; ۹۵,۰; ۰,۰; ۴۰,۲۵] و زمان دریافت علامت [۰/۰۲۲۶۸; ۰/۰۷۴۴۹; ۰/۰۷۴۴۹; ۰]، با استفاده از الگوریتم ۱، ناحیه پیشنهادی جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی به صورت ناحیه هاشورخورده شکل ۹ خواهد بود. هم چنین مکان واقعی مولد [-۱۰۰,۵۵] می‌باشد. ملاحظه می گردد که در این آزمون، هر دو حالت خاص زمان دریافت مساوی و هم چنین دو حسگر با Y یکسان رخ داده است.

الگوریتم ۱ روش پیشنهادی برای تعیین ناحیه جستجوی بهینه در الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید برای حالت دو حسگری.



۲-۲-۱-۲. استفاده از نواحی بهینه پیشنهادی جستجو در الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید

معمولاً مسائل کمینه‌سازی، علاوه بر یک تابع هدف (هزینه)، دارای قید[1] و کران (مرز)[2] جستجو می‌باشند. بر این اساس می‌توان روش پیشنهادی این مقاله برای تعیین ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید (الگوریتم۱) را در دو حالت زیر استفاده نمود:

الف- الگوریتم‌های کمینه‌سازی دارای قید: در این حالت قیود مطرح شده در الگوریتم ۱، به‌عنوان قید الگوریتم کمینه‌سازی و با تفکیک الگوریتم کمینه‌سازی در کل فضا بررسی می‌شوند؛ یعنی در هر بار اجرای حلقه الگوریتم کمینه‌سازی، قیود الگوریتم ۱ بررسی می‌گردند.

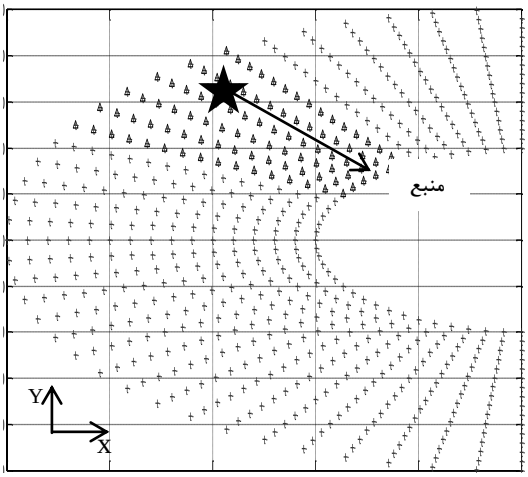
از آن‌جا که الگوریتم‌های کمینه‌سازی با تفکیک بالا

[1] Constraint
[2] Bound

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

جستجو می‌نمایند، بنابراین روش بسیار زمان‌بر خواهد بود.

ب- الگوریتم کمینه‌سازی کران‌دار: در حالت دوم، ابتدا در یک روند با تفکیک پایین، قیدهای الگوریتم ۱ در کل فضا بررسی شده و باند (کران بالا و پایین) ناحیه جستجو تعیین می‌گردد. سپس الگوریتم کمینه‌سازی در باند مشخص شده با تفکیک بالا اجرا می‌گردد. در این حالت، حجم و زمان محاسبات بسیار کم‌تر از حالت قبل خواهد بود. به‌عنوان مثال در شکل ۱۰ محل فرضی وقوع روی‌داد با ستاره مشخص شده است. در الگوریتم کمینه‌سازی دارای قید، تمام فضای گسسته‌شده (فضای شامل نقاط مثلث یا به علاوه و یا هردو) شکل ۱۰، با تفکیک بالا برای قیود مطرح شده در الگوریتم ۱ بررسی می‌شوند. در حالی که در الگوریتم کمینه‌سازی کران‌دار، جستجو با تفکیک بالا، فقط در ناحیه مشخص‌شده با مثلث در شکل ۱۰ انجام می‌شود. در هر دو روش، دقت و خطای محاسبات یکسان خواهد بود، زیرا در ناحیه اطراف مولد علامت، در هر دو حالت دارای قید یا کران‌دار، جستجو با تفکیک بالا داریم. اما آن‌چنان‌که گفته شد، حجم و زمان محاسبات در حالت کمینه‌سازی کران‌دار بسیار کم‌تر می‌باشند.



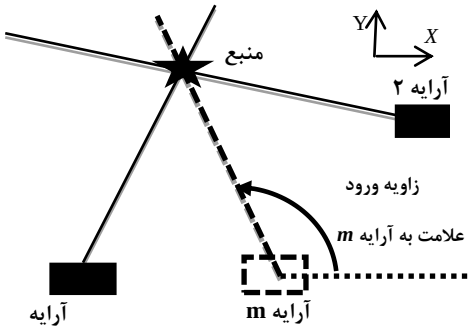
شکل ۱۰ ناحیه منتخب جستجو در الگوریتم کمینه‌سازی کران‌دار (ناحیه مشخص شده با مثلث‌ها) و دارای قید (ناحیه مشخص شده با به‌علاوه‌ها و مثلث‌ها). مکان مولد علامت با ستاره‌ی توپر مشخص شده است.

۲-۲-۲. روش تقاطع راستا برای مکان‌یابی

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل، مشخص شد که روش مکان‌یابی هذلولوی، زاویه ورود علامت را با دقت خوبی تخمین می‌زند. از آن جایی‌که هدف این مقاله، تخمین مختصات مکانی منبع صدا می‌باشد، لذا در ادامه، روش تقاطع راستا به‌عنوان بلوک نهایی روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی این مقاله بررسی می‌گردد.

یکی از روش‌های مکان‌یابی منبع صدا با استفاده از چند آرایه میکروفونی، تقاطع راستا می‌باشد. در این روش با دانستن حداقل زاویه‌های ورود علامت به دو آرایه، مکان مولد علامت تخمین زده می‌شود. برای توضیح بیش‌تر روش تقاطع راستا به مرجع [۲۰] مراجعه شود.

نمایی از روش تقاطع راستا برای m آرایه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این روش برای هر آرایه و بر مبنای زاویه ورود علامت به آن آرایه نیم‌خطی رسم می‌شود. با فرض دقیق‌بودن زوایای ورودی، تمام نیم‌خط‌ها در یک نقطه با یکدیگر تلاقی خواهند داشت. با توجه به نظریه روش تقاطع راستا، این نقطه همان مکان رویداد خواهد بود.



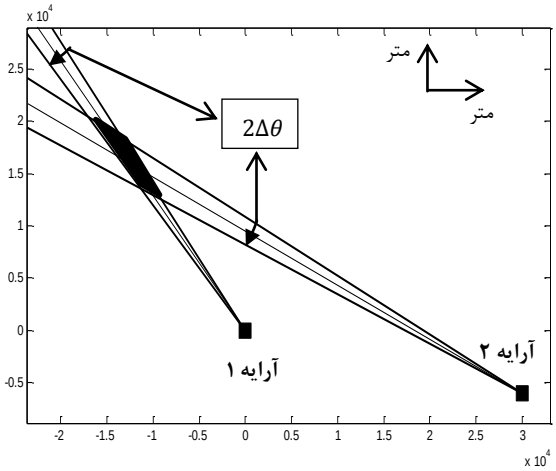
شکل ۱۱ نمایی از روش تقاطع راستا.

پیش‌تر ذکر شد که تخمین تی‌دی‌ایی-ها با خطا همراه است. لذا تخمین زاویه ورود علامت توسط هر یک از روش‌های معرفی‌شده نیز با خطا همراه خواهد بود. در این مقاله، زاویه ورود علامت با استفاده از روش هذلولوی محاسبه می‌شود. در پیوست ۱ نشان داده شده است که خطای محاسباتی تی‌دی‌ایی در تخمین زاویه ورود علامت با بهره‌گیری از روش هذلولوی نیز موثر است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که در روش تقاطع راستا برای جبران خطاهای محاسباتی زاویه ورود علامت همانند شکل ۱۲، به جای یک نیم‌خط یک ناحیه متناسب با اندازه خطای تخمین زاویه ورود علامت در نظر گرفته شود. در این حالت به جای یک نقطه تلاقی، یک سطح (ناحیه) تلاقی خواهیم داشت که رویداد در آن واقع شده است. واضح

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

است که هر چه تعداد آرایه‌ها بیش‌تر باشد و آرایه‌ها به خوبی در فضای اطراف رویداد توزیع شده باشند، ناحیه تلاقی بهینه بدست می‌آید.



شکل ۱۲ روش تقاطع راستا با در نظرگرفتن باریکه‌های ناحیه‌ای برای هر آرایه. مولد علامت در زاویه ۱۲۶٫۸و فاصله ۲۰۰۰۰ متری آرایه ۱ قرار دارد. ناحیه مشکی، ناحیه تخمینی مکان منبع صدا (وقوع رویداد) را نشان می‌دهد.

برای تفسیر ریاضی ناحیه جواب آرایه i–ام بر مبنای اندازه زاویه ورود علامت به آرایه (θ_i)، ابتدا معادلات دو خط محصورکننده ناحیه حضور منبع به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$m_i = tan^{-1}\theta_i \qquad (۲۰)$$

$$m_i' = m_i \pm dm$$

$$y - m_i'x + m_i'x_i + y_i = ۰ \qquad (۲۱)$$

که در آن m_i' شیب خطوط محصورکننده ناحیه و (x_i, y_i) مختصات مکان آرایه i–ام می‌باشند. لذا ناحیه مورد نظر برای آرایه i–ام با شروط ذیل ایجاد می‌شود:

الف- اگر $-۹۰ < \theta_i < +۹۰$ تخمین زده شود (ناحیه‌های مثلثاتی اول و چهارم):

$$\begin{cases} y - m_i'x + m_i'x_i + y_i < ۰ & m_i' = m_i + dm \\ y - m_i'x + m_i'x_i + y_i > ۰ & m_i' = m_i - dm \end{cases} \qquad (۲۲)$$

ب- اگر $۹۰ < \theta_i \leq ۱۸۰$ یا $-۱۸۰ \leq \theta_i < -۹۰$ تخمین زده شود (ناحیه‌های مثلثاتی دوم و سوم):

$$\begin{cases} y - m_i'x + m_i'x_i + y_i > ۰ & m_i' = m_i + dm \\ y - m_i'x + m_i'x_i + y_i < ۰ & m_i' = m_i - dm \end{cases} \qquad (۲۳)$$

پ- اگر $\theta_i = \pm ۹۰$ تخمین زده شود به ازای هر دو شیب باید شرایط زیر را در نظر گرفت:

$$\begin{cases} y - m_i'x + m_i'x_i + y_i > ۰ & \theta_i = +۹۰ \\ y - m_i'x + m_i'x_i + y_i < ۰ & \theta_i = -۹۰ \end{cases} \qquad (۲۴)$$

در نهایت، ناحیه‌ای به‌عنوان ناحیه پاسخ انتخاب می‌شود که شرط‌های مذکور را برای تمام آرایه‌ها برقرار نماید. شایان ذکر است که برای بدست آوردن مختصات ناحیه پاسخ باید کلیه نقاط فضا در شروط فوق بررسی شوند.

۳. نتایج شبیه‌سازی

در بخش‌های قبل، مبانی علمی و هدف عمده این مقاله، روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی و نحوه بهینه‌سازی فضای جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید، تشریح شدند. در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش مکان‌یابی مذکور با استفاده از نرم‌افزار متلب آر۲۰۱۲- بی[1] ارائه می‌گردند.

۳-۱. نتایج تخمین جهت ورود علامت به آرایه با استفاده از روش هذلولوی

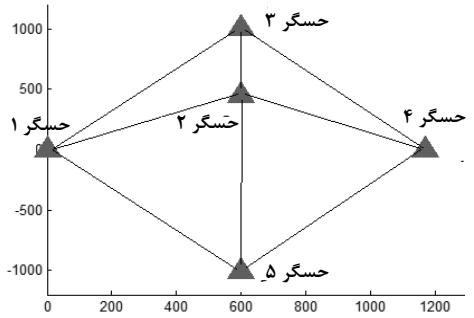
در پیوست ۱ نشان داده می‌شود که خطای تخمین زاویه ورود علامت به آرایه با استفاده از روش هذلولوی با خطای تخمین تی‌دی‌ایی-ها رابطه مستقیم دارد. شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان می‌دهند که تخمین زاویه ورود علامت به آرایه در حالت تی‌دی‌ایی-های دقیق با روش مکان‌یابی هذلولوی تقریبا بدون خطا (کم‌تر از ۰٫۲ درجه) می‌باشد. شکل ۱۴ خطای تخمین زاویه ورود علامت به آرایه‌ای با پیکربندی آرایه‌ای شکل ۱۳ را در زوایا و فواصل مختلف به‌ازای ۰٫۰۲ ثانیه خطای تخمین تی‌دی‌ایی-ها نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، تخمین زاویه ورود علامت در اکثر زاویه‌ها تقریبا کم‌تر از ۱ درجه می‌باشد (ناحیه‌های تیره در شکل ۱۴). این در حالی است که در محدوده برخی زوایای خاص این خطا بیشینه‌ای نزدیک به ۶ درجه دارد (ناحیه‌های روشن در شکل ۱۴). به اصطلاح به این زوایای خاص نقطه کور اطلاق می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این نقاط کور کاملا مربوط به

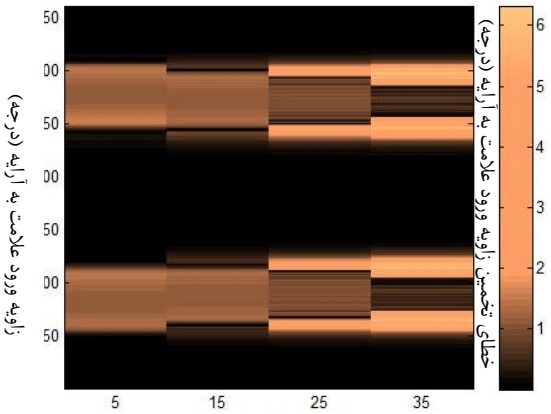
[1] R2012-b

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]



شکل ۱۳ پیکربندی حسگرهای آرایه بکار رفته در این مقاله.

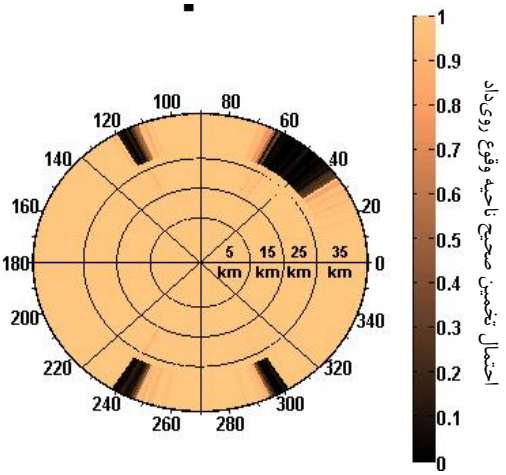


شکل ۱۴ خطای تخمین زاویه ورود علامت به آرایه شکل ۱۳ به ازای ۰٫۰۲ ثانیه خطای تخمین تی‌دی‌ایی. آرایه در مبدا قرار دارد.

پیکربندی آرایه (چیدمان حسگرها) می‌باشند. به‌عنوان مثال برای پیکربندی شکل ۱۳ تقریبا ناحیه اطراف زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۲۷۰ و ۳۰۰ درجه نقطه کور خواهند بود. از آن جایی‌که روش هذلولوی بر اساس تی‌دی‌ایی-ها عمل می‌کند، لذا با کمی دقت در پیکربندی آرایه مشخص می‌شود که در زوایای کور روش هذلولوی، حداقل یکی از تی‌دی‌ایی‌های تخمینی برای به‌کارگیری در روش هذلولوی به منظور تخمین زاویه ورود علامت ناکارآمد خواهد بود. برای نمونه اگر منبع صدا در زوایای ۶۰ یا ۲۴۰ درجه باشد و سرعت حرکت موج در محیط آرایه ثابت فرض شود، به‌ازای تمام فاصله‌ها، تی‌دی‌ایی-های بین دو حسگر ۱ و ۳ و هم چنین ۴ و ۵ ثابت و بدون تغییر می‌باشند؛ زیرا در این زوایا حسگرهای ۱ و ۳ و نیز ۴ و ۵ با منبع صدا در یک راستا هستند و لذا مسافت طی‌شده توسط علامت‌های منتشر شده بین حسگرهای مذکور در این زوایای خاص و فاصله‌های مختلف از آرایه، ثابت و برابر فاصله دو حسگر مذکور است. لذا انتخاب پیکربندی آرایه‌ای در روش ارائه شده بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

۳-۲. نتایج تخمین ناحیه حضور مولد علامت با استفاده از روش پیشنهادی مکان‌یابی

مشاهده گردید که روش پیشنهادی جهت‌یابی (روش هذلولوی) برای هر مجموعه آرایه‌ای در هر فاصله و زاویه خاص، خطای مشخصی دارد. این ناحیه در شکل ۱۴ برای پیکربندی شکل ۱۳ نشان داده شد. ناحیه مذکور به پیکربندی درون آرایه‌ای وابسته می‌باشد. لذا با توضیحات ارائه شده، انتظار می‌رود که روش پیشنهادی مکان‌یابی این مقاله در محدوده‌های مشخص پاسخ مناسب و صحیح داشته باشد. واضح است که این محدوده به پیکربندی برون آرایه‌ای (محل قرارگیری آرایه‌ها نسبت به یکدیگر) وابسته است. شکل زیر، برد پاسخ‌دهی مناسب روش پیشنهادی مکان‌یابی را برای دو آرایه شکل ۱۲ نمایش می‌دهد.



شکل ۱۵ احتمال تخمین صحیح ناحیه وقوع روی‌داد با استفاده از روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی این مقاله با باند خطای $|\Delta\theta| \leq ۲\ (deg)$ با استفاده از دو آرایه نشان داده شده در شکل ۱۲ (آرایه‌ی اول در مرکز ناحیه و آرایه‌ی دوم در ۱۵ کیلومتری از مرکز و در امتداد افقی سمت راست آرایه‌ی اول واقع شده است).

در حالت آرمانی اگر فرض شود که خطای تخمین زاویه فقط به فاصله از آرایه‌ها وابسته باشد (در هر فاصله مشخص از آرایه در تمام زاویه‌ها خطا یکسان باشد)،

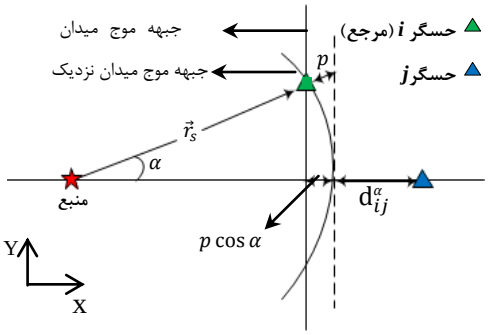
[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

محدوده (فاصله از آرایه و زاویه وقوع روی‌داد از آرایه‌ها) پاسخ صحیح برای روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی، تقریبا یک بیضی با کانون‌های دو آرایه مذکور خواهد بود.

۳-۳. بررسی تاثیر فاصله در خطای تخمین ناحیه وقوع رویداد با روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی

در انتها خاطر نشان می‌گردد، از آن جایی که ورودی روش مکان‌یابی پیشنهادی این مقاله، تی‌دی‌ایی می‌باشد و تاثیرات فاصله در خطای تخمین تی‌دی‌ایی-ها (اثرات نسبت علامت به نوفه) ثابت فرض شده است (در تمام فاصله‌ها خطای تخمین تی‌دی‌ایی‌ها ۰٫۰۲ ثانیه فرض شده است)، لیکن با افزایش فاصله، احتمال تخمین صحیح ناحیه وقوع رویداد کاهش می‌یابد که برای توضیح این امر باید اثرات فاصله را در انتشار علامت صوتی در نظر گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، با افزایش فاصله منبع نسبت به حسگرها، تغییراتی در جبهه‌ی موج ایجاد می‌گردد. با توجه به تعریف میدان دور و نزدیک، می‌توان مرز میدان دور و نزدیک را زمانی دانست که انحنا در قطاع از بین رفته و موج دریافتی با جبهه‌ی موج تخت و مسطح دریافت گردد.



شکل ۱۶ تاثیرات فاصله آرایه از منبع علامت در محاسبه فاصله طی‌شده موج میان دو حسگر و در نتیجه تی‌دی‌ایی آن‌ها.

با این تعریف، اگر فاصله منبع از حسگرها به اندازه‌ای باشد که موج دریافتی تخت و مسطح باشد، مطابق شکل ۱۶، p به سمت صفر میل کرده و در نتیجه $p\cos\alpha$ نیز به سمت صفر میل خواهد نمود. لذا مادامی که بتوان جبهه موج را کروی فرض نمود، فاصله تخمینی d_{ij}^{α} نیز متغیر و در نتیجه تی‌دی‌ایی-ها تغییرات محسوس خواهند داشت. اما اگر مولد علامت در فاصله‌ای باشد که بتوان جبهه موج را مسطح فرض نمود d_{ij}^{α} تغییرات محسوسی نداشته و لذا تغییرات تی‌دی‌ایی به‌ازای تغییرات فاصله مولد از آرایه بسیار ناچیز خواهد بود. به همین علت کم‌ترین خطا در تخمین تی‌دی‌ایی در فاصله‌های دور از حسگرها موجب خطای زیادی در تخمین زاویه می‌شود. به زبان ریاضی می‌توان نوشت (اگر منبع در بی‌نهایت باشد):

$$\vec{r}_s \to \infty$$

با توجه به شکل ۱۶ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \alpha \to ۰ \quad \to \quad \cos\alpha \to ۱ \\ \qquad p \to ۰ \end{cases}$$

$$\mathrm{d}_{ij}^{0} = \mathrm{d}_{ij}^{\alpha} + \mathrm{p}\cos\alpha$$

در نتیجه $p\cos\alpha \to ۰$ خواهد شد. لذا d_{ij}^{α} و متعاقبا تی‌دی‌ایی-ها در فاصله‌های دور، تقریبا ثابت تخمین‌زده می‌شوند. به همین علت کم‌ترین خطا در تخمین تی‌دی‌ایی در فاصله‌های دور از حسگرها موجب خطای زیادی در تخمین زاویه و در نتیجه تخمین ناحیه وقوع روی‌داد در روش مکان‌یابی پیشنهادی می‌شود.

با استدلال ارائه شده، می‌توان نشان داد که چرا روش‌های مکان‌یابی بر مبنای تی‌دی‌ایی، دقت مناسبی در تخمین زاویه و مکان هدف ندارند.

۵. بحث

می‌توان ادعا کرد که روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی، به دلیل استفاده از الگوریتم هذلولوی در بلوک ورودی، نسبت به ورودی‌های نوفه‌دار مقاوم بوده و هم چنین با توجه به توضیحات ارائه شده، برای انواع علامت‌های صوتی ورودی قابل استفاده است. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان دادند که در روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی، با بکارگیری مشاهدات علامت در چند آرایه، دقت تخمین مکان منبع صدا نسبت به روش هذلولوی، بسیار افزایش می‌یابد. هم چنین این روش، همانند روش هذلولوی از سرعت موثر صدا در محیط آرایه در محاسبات بهره می‌برد.

یکی از عمده مشکلات روش ترکیبی پیشنهادی، استفاده از روش کمینه‌سازی نلدرمید در بلوک جهت‌یابی (روش هذلولوی) آن است. همان‌طور که اشاره شد کمینه‌سازی نلدرمید، به دلیل ناحیه جستجوی وسیع، بسیار کُند است. لذا در این مقاله روشی نیز پیشنهاد می‌گردد که در آن با

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

استفاده از مثبت و یا منفی‌بودن تاخیرهای زمانی ثبت علامت‌های صوتی در یک آرایه‌ی حسگری، ناحیه جستجوی الگوریتم کمینه‌سازی نلدرمید کاهش و در نتیجه دقت و سرعت الگوریتم، افزایش خواهد یافت (حسگرهایی که ثبت علامت در آن‌ها قبل از حسگر مرجع انجام گیرد، تی‌دی‌ایی منفی و حسگرهایی که بعد از حسگر مرجع علامت را ثبت می‌نمایند، تی‌دی‌ایی مثبت خواهند داشت).

به‌عنوان جمع‌بندی، پیشنهادات و اهداف اصلی این مقاله را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

الف- معرفی روش مکان‌یابی هذلولوی مبتنی بر روش جستجوی نِلدِرمید به‌عنوان یک روش مناسب و با دقت بالا برای تخمین جهت ورود علامت؛

ب- پیشنهاد روشی برای محدود نمودن ناحیه جستجوی روش کمینه‌سازی نِلدِرمید و کاهش بار و در نتیجه زمان محاسباتی این روش؛

پ-پیشنهاد یک روش مکان‌یابی ترکیبی از دو روش مکان‌یابی هذلولوی و تقاطع راستا که علاوه بر دارا بودن مزایای روش هذلولوی، دقت به مراتب بیش‌تری نسبت به روش هذلولوی دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با ارائه یک روش ترکیبی مکان‌یابی، علاوه بر بهبود دقت مکان‌یابی، از مزایای روش مکان‌یابی بر مبنای تی‌دی‌ایی (عدم وابستگی به نوع علامت ورودی، مقاومت بیش‌تر در مقابل علایم ورودی آغشته به نوفه و استفاده از سرعت موثر صدا در محیط آرایه به جای سرعت صدا در مسیر حرکت) نیز بهره گرفته شده است. هم‌چنین، زمان محاسباتی، نسبت به روش هذلولوی، به حالت زمان-واقعی نزدیک‌تر شد و نشان داده شد که کاهش زمان محاسبات با افزایش تعداد حسگرهای آرایه نسبت مستقیم دارد. در آخر با استفاده از روش تقاطع راستا ناحیه‌ی مورد نظر جواب بدست آمد که البته می‌توانست دچار خطایی در تخمین ناحیه باشد که این خطا ناشی از بلوک قبلی یعنی تعیین جهت توسط آرایه بود که علت بروز خطا تعیین زاویه توضیح داده شد.

از جمله کارهای آتی، اضافه نمودن سرعت صوت به‌عنوان یکی از پارامترهای تخمینی در حل معادلات هذلولوی و هم چنین ایجاد تغییرات در تابع هزینه هذلولوی به‌منظور بهبود عملکرد مکان‌یابی این روش در میدان دور خواهد بود و نیز بدست آوردن پاسخ اولیه جواب در ناحیه مورد نظر از روش بازگشتی برای تعیین صحت جواب بدست آمده، یعنی آن که منبع در مکان جواب تولید علامت می‌نماید و در آرایه‌ها همان تی‌دی‌ایی-ها دریافت می‌گردد، از جمله کارهای آتی خواهد بود.

۷. فهرست منابع

[1] Y.T. Chan, K.C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, pp. 1905–1915, Aug. 1994.

[2] K. Yang, G. Wang, Z.Q. 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, pp. 2775–2784, Jul. 2009.

[3] K.C. Ho,"Bias Reduction for an explicit solution of source localization using TDOA," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, no. 5, pp. 2101-2114, May. 2012.

[4] Z. Xu, N. Liu, B.M. Sadler," A simple closed-form linear source localization algorithm," Military Communications Conference IEEE, MILCOM, 2007.

[5] F.C. Schweppe, "Sensor array data processing for multiple signal sources," IEEE Transactions. on Information Theory, vol. 14, no. 2, pp. 294-305, Mar. 1968.

[6] I. Ziskind, 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, Oct.1998.

[7] A.L. Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne, Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Springer Science+Business Media B.V., New York: 2010.

[8] G.W.E. Yiteng Huang, Jacob Benesty, R.M. Mersereau, "Real-time passive source localization: A practical linear-correction least squares approach," IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. 9, no. 8, Nov.2001.

[9] K. Yang, J. An, Z. Xu, "A quadratic constraint total least-squares algorithm for hyperbolic location," International Journal of Communications, Network, and System Sciences, pp. 130–135, 2008.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

[10] S.J. Arrowsmith, R. Whitaker, S.R. Taylor, R. Burlacu, B. Stump, M. Hedlin, G. Randall, C. Hayward, D. ReVelle, "Regional monitoring of infrasound events using multiple arrays: application to Utah and Washington State," Geophysical Journal International, 175, 291300, 2008.

[11] Y. Cansi, "An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method," Geophysical Research Letters, 22, pp. 1021-1024, 1995.

[12] G.C. Carter, Coherence and Time Delay Estimation: An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers, IEEE Press, USA: 1993.

[13] C.H. Knapp, G.C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. ASSP-24, pp. 320–327, Aug. 1976.

[14] J.d. Chen, J. Benesty, Y. Huang, "Time delay estimation using spatial correlation techniques," International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control, Kyoto, Japan, Sep. 2003.

[15] H. Khaddour, "A comparison of algorithms of sound source localization based on time delay estimation," Elektrorevue, vol. 2, no. 1, Apr. 2011.

[16] H. Staras, S.N. Honickman, "The accuracy of vehicle location by trilateration in a dense urban environment," IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. VT-21, no. 1, pp. 38–44, Feb. 1972.

[17] J.W.S. Turin, T.S. Johnston, "Simulation of urban vehicle monitoring systems," IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. VT-21, no. 1, pp. 9–16, Feb. 1972.

[18] T.G. Ulrich Klee, J. McDonough, "Kalman filters for time delay of arrival-based source localization," EURASIP Journal on Applied Signal Processing, pp. 1–15, 2006.

[19] J.C. hen, K. Yao, "Wideband signal detection and maximum-likelihood source localization," Signals, Systems and Computers, vol.2, no. 4-7, pp. 931-935, Nov. 2001.

[20] R.J. Kozick, B.M. Sadler, "Source localization with distributed sensor arrays and partial spatial coherence," IEEE Transaction on Signal Processing, vol. 52, no. 3, Mar. 2004.

[21] W.H. Foy, "Position-location solutions by Taylor-series estimation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, pp. 187–194, Mar. 1976.

[22] B.T. Fang, "Simple solutions for hyperbolic and related position fixes," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26, pp. 748-753, Sep. 1990.

[23] J.S. Abel, "A divide and conquer approach to least-squares estimation," IEEE Transctions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26, pp. 423-427, Mar. 1990.

[24] N. Pham, B.M. Wilamowski, "Improved Nelder mead's simplex method and applications," Journal of Computing, vol. 3, no. 3, Mar. 2011.

پیوست ۱

روش مکان‌یابی هذلولوی، حساسیت شدیدی نسبت به تخمین دقیق تی‌دی‌ایی-ها دارد. در شرایط واقعی چون رقومی‌کننده‌های حسگرهای صوتی بسامد پایین، نرخ نمونه‌برداری بالایی ندارند (کم‌تر از یک کیلوهرتز)، بنابراین محاسبات هم‌بستگی علامت‌ها دارای خطا خواهد بود و در نهایت، تخمین‌های تی‌دی‌ایی، منجر به خطای بسیار بزرگ‌تری در تخمین مختصات مکان منبع علامت خواهد گردید. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، نشان می‌دهند که خطای کوچک در تخمین تی‌دی‌ایی-ها، خطای بسیار بزرگ‌تری را در تخمین مختصات مولد علامت نتیجه می‌دهد [۳ و ۲۱-۲۳]. اما همان‌طور که قبلا ذکر شد، خطای کوچک تی‌دی‌ایی-ها، در دقت تخمین زاویه ورود علامت به آرایه با استفاده از روش هذلولوی تاثیر چندانی نخواهد داشت که البته در مقابل، موجب خطای بسیار بزرگ در تخمین فاصله (شعاع) مولد علامت از آرایه و نیز سرعت موج در محیط خواهد شد.

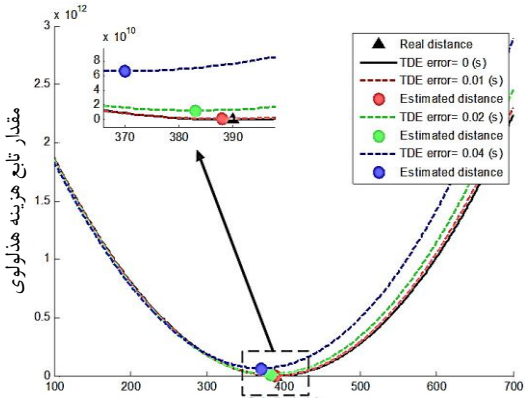
برای بررسی بیش‌تر تاثیر دقت تخمین تی‌دی‌ایی-ها در روش مکان‌یابی هذلولوی، رفتار تابع هزینه هذلولوی نسبت به فاصله، زاویه و سرعت موثر در حالت‌های تی‌دی‌ایی دقیق و خطادار برای یک آرایه مثلثی ۴ حسگری تحلیل می‌شود. به دلیل نوع عملکرد حسگرهای صوتی بسامد پایین، رفتار تابع هزینه مذکور با خطای تی‌دی‌ایی ۰/۰۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ ثانیه بررسی می‌شود.

فرض کنید که یک مولد علامت صوتی در زاویه ۱۲۶/۸ درجه و فاصله ۵۰۰۰ متری آرایه حسگری مذکور قرار دارد. سرعت انتشار موج ۳۹۰ متر بر ثانیه می‌باشد. رفتار تابع هزینه (۱۴) با تی‌دی‌ایی-های دقیق و خطادار بر حسب تغییرات سرعت، فاصله و یا زاویه به‌ترتیب در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ بررسی شده‌اند. ابتدا در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، رفتار تابع هزینه (۱۴) به‌ازای مقادیر واقعی و

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

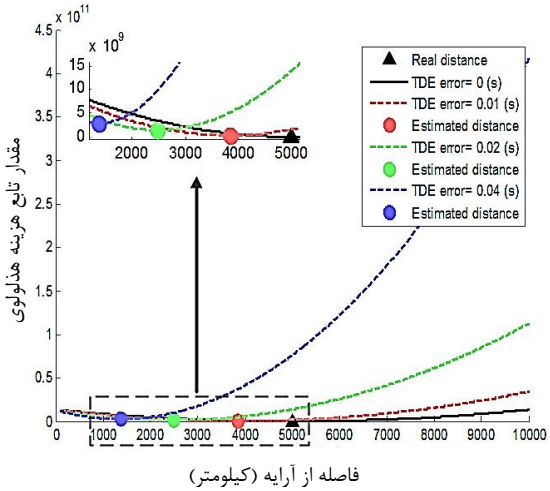
ثابت فاصله (۵۰۰۰ متر)، زاویه (۱۲۶/۸ درجه) برای تی‌دی‌ایی-های دقیق و خطادار، بر حسب تغییرات سرعت صدا در بازه ۱۰۰ تا ۷۰۰ متر بر ثانیه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در روش هذلولوی با تی‌دی‌ایی-های دقیق، تخمین سرعت صدا با دقت بسیار بالایی انجام شده است (نمودار مشکی). در صورتی‌که با افزایش خطای تی‌دی‌ایی-ها، خطای تخمین سرعت صدا در محیط آرایه چند ده متر بر ثانیه خواهد بود. اضافه نمودن امکان تخمین دقیق سرعت صدا با استفاده از تابع هزینه هذلولوی از کارهای آتی نویسندگان این مقاله خواهد بود.



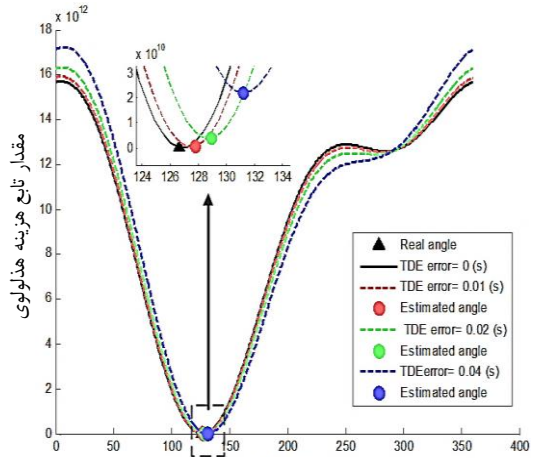
شکل ۱۷ رفتار تابع هزینه هذلولوی برای محاسبه سرعت موثر به‌ازای مقادیر ثابت فاصله، زاویه و تی‌دی‌ایی دقیق و خطادار.

در شکل ۱۸، رفتار تابع هزینه (۱۴) به‌ازای مقادیر واقعی و ثابت سرعت (۳۹۰ متر بر ثانیه)، زاویه (۱۲۶/۸ درجه) برای تی‌دی‌ایی-های دقیق و خطادار، بر حسب تغییرات فاصله منبع از ۱ تا ۱۰۰۰۰ متر نمایش داده شده است. در این حالت، رفتار تابع هزینه هذلولوی به شدت تحت تاثیر تخمین تی‌دی‌ایی- ها می‌باشد و کوچک‌ترین خطای تخمین تی‌دی‌ایی موجب چند کیلومتر خطا در تخمین فاصله می‌شود. این مشکل در روش مکان‌یابی ترکیبی پیشنهادی این مقاله تا حد زیادی برطرف شد.

در شکل ۱۹، رفتار تابع هزینه (۱۴) به‌ازای مقادیر واقعی و ثابت سرعت (۳۹۰ متر بر ثانیه)، فاصله (۵۰۰۰ متر) برای تی‌دی‌ایی- های دقیق و خطادار، بر حسب تغییرات زاویه ورود علامت از ۱ تا ۳۶۰ درجه نشان داده شده است. مشهود است که در این حالت، رفتار تابع هزینه هذلولوی نسبت به زاویه مطلوب بوده و با وجود خطای ناشی از تخمین تی‌دی‌ایی، کمینه منحنی نسبت به مقدار واقعی (۱۲۶/۸ درجه)، فقط با چند درجه خطا تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که خطای تخمین زاویه ورود علامت به آرایه با استفاده از روش مکان‌یابی هذلولوی با خطای تخمین تی‌دی‌ایی رابطه مستقیم دارد.



شکل ۱۸ رفتار تابع هزینه هذلولوی برای محاسبه فاصله به‌ازای مقادیر ثابت سرعت، زاویه و تی‌دی‌ایی دقیق و خطادار.



شکل ۱۹ رفتار تابع هزینه هذلولوی برای محاسبه زاویه به‌ازای مقادیر ثابت فاصله و سرعت و تی‌دی‌ایی دقیق و خطادار.

به‌عنوان جمع‌بندی، بکارگیری تابع هزینه هذلولوی برای تخمین سرعت و برد منبع صدا، نامطلوب و غیرقابل‌اطمینان است؛ در حالی‌که زاویه ورود علامت به آرایه با خطای مناسبی توسط این روش قابل تخمین خواهد بود.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]

Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 3, no. 1, 2015

A hybrid localization method for near and far-field acoustical sources

M.R. Rahimi[1], H. Sadeghi[*2], A. Ghasemi[3], M. Shamsi[4]

1. Faculty of Electronic and Computer Engineering, Shiraz University
2. Department of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University
3. Department of Electrical and Computer Engineering, Kashan University
4. Department of Biomedical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

This paper proposes a hybrid acoustical source-location finding method using the hyperbolic localization and cross-bearing intersection techniques. The method employs the time delays estimations (TDE) observed from multiple sensors in order to find the location of the acoustic source in the near or far-filed. Since according to the existing literature, the conventional hyperbolic localization method does not provide enough accuracy for position-finding (PF), we propose that this method only be employed for obtaining TDEs. Then, using TDEs, the source position will be determined using the cross-bearing method. The simulation results show the significant improvement in source-position estimations as compared to traditional hyperbolic PF method. Furthermore, we also propose a method for accelerating the runtime of the optimization algorithm in the hybrid PF method.

Keywords: Localization, Acoustical sources, Direction of arrival, Cross bearing, Time delay estimations.

pp. 10-25 (In Persian)

[*] Corresponding author E-mail: h.sadeghi.2015@ieee.org

[Downloaded from joasi.ir on 2026-02-19]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1394.3.1.5.5]