

ارائه روشی جدید برای جهت یابی منبع آکوستیکی بر اساس تأخیر زمان ورود با روش مثلثاتی

علی ناعمی^۱، حمید دهقانی^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی پدافند غیرعامل، گروه آفا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، alinaemi@chmail.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی پدافند غیرعامل، گروه آفا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hamid_deh@yahoo.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۱۲/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۵/۵/۲۱)

چکیده: نظارت و مراقبت محیطی از موارد مهم برای جلوگیری از غافل گیری و کنترل شرایط است. این آگاهی برای مقابله و جلوگیری از تهاجمات دشمن و افزایش بازدارندگی لازم است. جهت یابی (DoA) و مکان یابی اهداف در یک محیط، از جمله پایه های اصلی مراقبت و نظارت محیطی محسوب می شوند. جهت یابی آکوستیکی به معنای محاسبه جهت ورود موج آکوستیکی منتشر شده از منبع در گیرنده است. در جهت یابی گیرنده با توجه به یکی از روش های ارائه شده از قبیل MUSIC، MVB و TDoA جهت ورود جبهه موج به خود را مشخص می کند. در این مقاله روشی بر مبنای تأخیر زمان ورود پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی با ساده سازی روابط مثلثاتی محاسبه مکان، روابط جدیدی برای محاسبه جهت ورود سیگنال آکوستیکی برای محیط نیم کره ارائه شده است. جهت یابی برای محیط نیم کره به این علت طرح شده است که اغلب با نصب سامانه جهت یابی بر روی یک بستر نیاز است تا نیمی از محیط مکان یابی یا جهت یابی شوند و همچنین تنها با افزودن یک سنسور سامانه توانایی کار در محیط کره را بدست می آورد. در این ساده سازی، پیچیدگی محاسباتی و تعداد سنسور مورد نیاز برای جهت یابی یک نیم کره کاهش یافته است که از نظر تعداد برابر حالت دو بعدی است. در روش پیشنهادی، پاسخ هایی با خطای قابل قبول در محدوده دور برد برای زاویه های سمت و فراز در شبیه سازی ها بدست آمده است.

کلمات کلیدی: جهت یابی، منبع آکوستیکی، تأخیر زمان ورود، روش مثلثاتی، محیط نیم کره.

Providing a New Method for Acoustic Source DOA Estimation based on TDoA by Trigonometric Methods

Ali Naemi, Hamid Dehghani

Abstract: Environmental surveillance and recognition are important issues to avoid surprises and conditions control. This awareness is necessary to combat and prevent the enemy attacks and increase deterrence. Direction of Arrival (DoA) estimation and localization targets are including the main bases environmental surveillance in an environment. DoA acoustic means calculated to enter acoustic wave emitted by the source in sensors that is provided different methods such as MVB, MUSIC and TDoA for this issue. The proposed method with simplification of trigonometric equations calculate the location is provided new equations to estimate direction of arrival acoustic signal for hemispherical environment that number equal to two-dimensional state. DoA estimation for hemisphere environment is provided for this reason, often with installed DoA estimation system on a platform is needed to be half of environment localization or DoA estimation and also just by adding a sensor, system will obtain the ability to work in sphere environment. In this simplification is decreases the computational complexity and the number of sensors needed to DoA estimation a hemisphere. In the proposed method is obtained the responses with acceptable error for elevation and azimuthal angles in simulations.

Keywords: Direction of arrival estimation, Acoustic source, Time difference of arrival, Trigonometric method, Hemispherical environment.

جدول ۱- نمادها

نماد	توضیح
d, r, a, b, R	اندازه ضلع یا فاصله بر حسب متر (m)
θ	زاویه مربوط به سمت بر حسب درجه
φ	زاویه مربوط به فراز بر حسب درجه
π	عدد پی (۳,۱۴)
TD_{xy}	تأخیر زمان ورود بین دو گره حس گری x و y بر حسب ثانیه (s)
V	سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه (m/s)
dr_{xy}	اختلاف فاصله بین دو گره حس گری بر حسب متر (m)

۱- مقدمه

امروزه نظارت و مراقبت محیطی هم در مباحث نظامی و هم غیرنظامی کاربردهای فراوانی نظیر کشف تجهیزات دشمن، تشخیص نشت آلودگی و ... دارد. در نظارت و مراقبت محیطی سامانه‌ای متشکل از یک یا چند آرایه‌ی سنسوری به صورت فعال^۱ یا غیرفعال^۲ یکی از اشکال انرژی ساطع یا بازتابی از هدف را دریافت و بر اساس آن جهت یا مکان هدف را تخمین می‌زند. در جهت یابی^۳ غیرفعال آکوستیکی، موج انتشاری از هدف در آرایه‌ها دریافت می‌شود و بر اساس پارامترهای دریافتی قابل اندازه گیری این موج مانند دامنه، فرکانس و تأخیر زمان ورود، می‌توان فرآیند جهت یابی را انجام داد.

در گذشته تحقیقات زیادی مخصوصاً در محیط جو برای جهت یابی مکان یابی انجام شده است که از روش‌های گوناگونی نیز بهره برده‌اند. برای نمونه در [۱] محققان با استفاده از آرایه‌ای ۱۵ میکروفونی عمل جهت یابی را با روش‌های MUSIC^۴، ML و ... انجام داده‌اند یا در مقالات [۲] و [۳] نیز محققان با استفاده از TDoA^۵ و تکنیک‌های مختلف توانسته‌اند توسط چهار میکروفون عمل مکان یابی و جهت یابی را در محیط جو انجام دهند. همچنین می‌توان از سامانه‌های رادیویی LORAN-C و حتی GPS که برای ناوبری و تعیین موقعیت از تکنیک TDoA استفاده می‌کنند، نیز نام برد [۴]. در این سامانه‌ها از اختلاف رسیدن سیگنال رادیویی ماهواره‌ها یا آنتن‌ها برای تعیین موقعیت استفاده می‌شود. در این سامانه‌ها با استفاده از مشخص بودن مکان آنتن‌ها و یا ماهواره‌ها و اختلاف زمان رسیدن سیگنال آن‌ها به وسیله یا سامانه موردنظر، فرآیند موقعیت یابی انجام می‌شود [۵].

در کل می‌توان روش‌های جهت یابی را به سه دسته اصلی تقسیم نمود، در دسته اول عملکرد بر اساس توان خروجی شکل دهنده موج

است [۶]، در این دسته می‌توان به روش‌های MVB^۶ و DSB^۷ اشاره نمود [۷]. روش‌های این دسته برای افزایش قدرت تفکیک زاویه‌ای، نیازمند افزایش تعداد سنسور هستند [۸]. در دسته‌ی دوم روش‌های ارائه شده، مشکل مکان یابی منابع چندتایی، را بر اساس تکنیک‌های زیرفضای توان تفکیک بالا مثل MUSIC و ESPRIT^۸ برطرف می‌کنند [۶ و ۹]. در روش‌های دسته دوم تعداد بالای سنسورها و مدت زمان بالا و پیچیدگی پردازش جز ویژگی‌های معمول به حساب می‌آید [۱۰]. دسته‌ی سوم روش‌های مبتنی بر تأخیر زمان ورود (TDoA) هستند که روش‌هایی پرکاربرد و ساده برای مکان یابی به صورت زمان واقعی‌اند [۱۱]. در این دسته از اختلاف زمان ورود سیگنال بین سنسورها و اطلاعات چینش سنسورها برای مکان یابی و جهت یابی استفاده می‌شود [۶]. در هر کدام از دسته‌ها پیش نیازهایی وجود دارد که با توجه به محدودیت‌ها و الزامات موجود، مسئله انتخاب دسته و روش حل می‌شود.

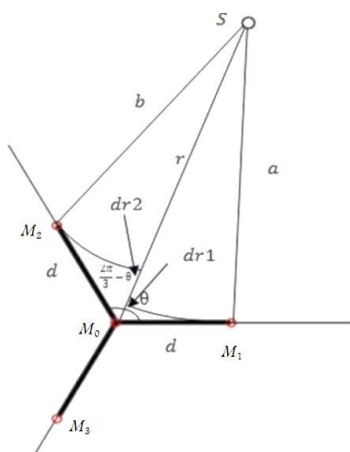
در این مقاله هدف ارائه روش حل مسئله جهت یابی برای محیط نیم کره آبی با فرض‌ها و قابلیت‌هایی خاص است که در ادامه بیان می‌شوند. در این مقاله فرض بر آن است که موج انتشاری از منبع آکوستیکی دریافت می‌شود، مکان سنسورها مشخص است و قابلیت استفاده از دامنه موج و دیگر ویژگی‌ها به جز دریافت و تشخیص سیگنال برای تأخیر زمان ورود امکان پذیر نیست. این قابلیت‌ها موجب امکان بهره‌گیری این روش در AUV^۹ ها، ربات‌ها و تجهیزات مختلف ثابت و متحرک برای جهت یابی است. این قابلیت‌ها عبارت‌اند از:

- استفاده از سنسورها تمام جهت^{۱۰}
- فضای کوچک قرارگیری سنسورها
- جهت یابی اهداف دور و محدوده وسیع
- استفاده از کمینه حس گر برای ایجاد آرایه مناسب در راستای جهت یابی یک فضای مشخص

بر اساس این قابلیت‌ها و فرض‌های بیان شده از دسته‌های ارائه شده برای جهت یابی یک دسته و روشی از آن برای پیشبرد موضوع انتخاب شده است. در دسته اول و دوم روش‌های جهت یابی عموماً تعداد حس گرهای زیادی مورد نیاز بوده [۱۲] و پیچیدگی محاسباتی زیاد است. روش‌های دسته سوم که مبتنی بر TDoA هستند به لحاظ تعداد حس گر کمتر مورد نیاز برای مکان یابی و جهت یابی در فضای دو و سه بعدی [۱۲]، پیچیدگی محاسباتی نسبتاً پایین، عدم محدودیت در نوع چینش سنسورها، روش‌های مناسب تری برای قابلیت‌های موردنظر این مقاله می‌باشند. مراحل جهت یابی یا مکان یابی در این روش را می‌توان به دو

^۶ maximum variance beamformer (MVB)^۷ delay and sum beamformer (DSB)^۸ Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Technique (ESPRIT)^۹ Autonomous Underwater Vehicle (AUV)^{۱۰} Omni directional^۱ Active^۲ Passive^۳ Direction of Arrival (DoA) estimation^۴ Multiple Signal Classification (MUSIC)^۵ Time Difference of Arrival (TDoA)

مثلث میکروفونهای M_1 و M_2 هستند. بر اساس دانسته‌ها که مقدار d ، مکان میکروفون‌ها و زاویه‌ی بین گره‌ها است و بر اساس اندازه‌گیری‌ها که تأخیر زمان ورود سیگنال به میکروفون‌ها است، دو معادله با دو مجهول تشکیل گردیده و با حل آن فاصله (r) و زاویه (θ) منبع محاسبه می‌شود. برای نمونه در شکل (۱) منبع آکوستیکی و M_0 تا M_3 چهار میکروفون که M_1 تا M_3 با فاصله یکسان از مرکز مختصات یا همان میکروفون M_0 و با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه از هم قرار گرفته‌اند. که برای دو مثلث $\overline{ard}$ و $\overline{brd}$ می‌توان بر اساس قضیه (۱) روابط مثلثاتی (۱) و (۲) را نوشت.



شکل ۱- منبع صوتی و میکروفون‌ها و شکل هندسی بین آن‌ها [۲]

$$(d^2) + (r^2) - (2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta) = a^2 \quad (1)$$

$$(d^2) + (r^2) - (2 \cdot r \cdot d \cdot \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta)) = b^2 \quad (2)$$

حال اگر TD_{ij} تأخیر ورود سیگنال بین میکروفون i ام و j ام باشد و از رابطه (۳) محاسبه گردد و v سرعت حرکت موج در محیط بین منبع و سنسورها باشد، اختلاف فاصله منبع تا میکروفون M_1 با فاصله منبع تا میکروفون M_0 برابر dr_{10} و اختلاف فاصله منبع تا میکروفون M_2 با فاصله منبع تا میکروفون M_0 برابر dr_{20} است.

$$TD_{ij} = T_i - T_j \quad (3)$$

$$dr_{10} = TD_{10} \times v \quad (4)$$

$$dr_{10} = TD_{10} \times v \quad (5)$$

با توجه به معادلات و روابط هندسی به جای a و b در رابطه‌های (۱) و (۲) مقادیر روابط (۶) و (۷) را جایگزین می‌شوند:

$$a = r - dr_{10} \quad (6)$$

$$b = r - dr_{20} \quad (7)$$

بخش کلی محاسبه تأخیر زمان ورود (TDoA) و روش‌های ارائه‌شده برای آن و محاسبه مکان یا جهت منبع با روش‌های ارائه‌شده برای آن تقسیم‌بندی نمود.

در رابطه با روش‌های محاسبه تأخیر زمان ورود می‌توان به عنوان نمونه تحقیقات به [۱۳] اشاره نمود. بر اساس تحقیقات، روش PHAT یکی بهترین روش‌های تشخیص اختلاف زمان ورود موج به گره‌های سنسوری به‌ویژه برای شرایط نویزی معرفی شده است [۱۳ و ۱۲]. اما بحث این مقاله در مورد این تکنیک‌ها نیست. اما در راستای روش‌های محاسبه مکان یا جهت منبع با TDoA دو روش اصلی معادلات هذلولی و معادلات مثلثاتی قابل طرح هستند. در [۲] طرحی بر مبنای TDoA استفاده از معادلات مثلثاتی برای مکان‌یابی ارائه شده است. در [۲] با استفاده از معادلات مثلثاتی بجای معادلات هذلولی مسئله مکان‌یابی با دقت بهتری انجام گرفته است. البته در طرح ارائه شده در [۲] نیز محدودیت‌ها و مشکلاتی وجود دارد. از جمله محدودیت‌ها و مشکلات، استفاده از چهار گره سنسوری برای مکان‌یابی محیط دو بعدی است. در روش پیشنهادی با استخراج معادلات جهت‌یابی از معادلات مکان‌یابی مطرح شده در [۲] و پذیرفتن یک فرض، مشکل تعداد اضافی گره سنسوری رفع شده و با گره سنسوری کمتر محدودیت فضای پوشش بهبود داده شده است.

در ادامه در بخش دو مبانی نظری و معادلات استفاده شده در مکان‌یابی با استفاده از معادلات مثلثاتی تشریح شده و در بخش سه معادلات با حذف یک گره و هندسه خاص روش پیشنهادی و بازنویسی می‌گردد و مبانی نظری روش پیشنهادی توسعه داده می‌شود. در بخش چهار روش پیشنهادی پیاده‌سازی نرم‌افزاری شده و در بخش پنج تحلیل روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های دیگر بیان شده است.

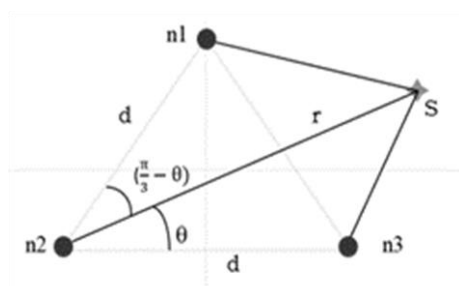
۲- مکان‌یابی به روش مثلثاتی

در [۲] مؤلفان برای حل مسئله مکان‌یابی در حالت دو بعدی از چهار میکروفون به نام‌های M_0 تا M_4 مطابق شکل (۱) استفاده نموده‌اند. میکروفون M_0 در مبدأ قرار گرفته است و فاصله میکروفون‌های دیگر از مبدأ یک متر و هر کدام با دیگری ۱۲۰ درجه اختلاف زاویه دارند. در این طرح همواره دورترین میکروفون از منبع (S) در مکان‌یابی بدون استفاده است که به این معنی است که می‌توان مکان‌یابی را با سه میکروفون هم انجام داد.

شیوه مکان‌یابی این طرح بدین صورت است که در گام یک با اطلاعات دریافتی از میکروفون‌ها و توسط روش‌های تخمین TDoA، تأخیر زمان ورود سیگنال‌ها به گره‌ها محاسبه می‌شود. در گام دو با استفاده از اطلاعات تأخیر زمان ورود و دانسته‌ها، روابط مثلثاتی ایجاد و مجهولات مکان‌یابی یا همان فاصله و زاویه منبع محاسبه می‌شوند. برای ایجاد روابط مثلثاتی، دو مثلث با یک ضلع مشترک تشکیل می‌شود. این ضلع از رأس منبع S تا رأس میکروفون M_0 است. دو رأس دیگر این دو

انتخابی به عنوان گره مشترک در مبدأ و در نتیجه تغییر هندسه چینش گره‌ها به جای عبارت $(\frac{2\pi}{3} - \theta)$ در رابطه (۹) باید از عبارت $(\frac{\pi}{3} - \theta)$ استفاده نمود. از آنجا که در این مقاله هدف محاسبه جهت است. از این رو اگر بتوان در روابط (۸) و (۹) پارامتر r را حذف نمود، می‌توان به روابط ساده‌تری رسید که حتی با حل یک معادله‌ی یک مجهولی می‌توان عمل جهت یابی را انجام داد. برای حذف r در روابط (۸) یا (۹) لازم است عبارت‌های $(d^2 - (d_{r10})^2)$ یا $(d^2 - (d_{r20})^2)$ که در چینش جدید به عبارت‌های $(d^2 - (d_{r12})^2)$ یا $(d^2 - (d_{r32})^2)$ نوشته می‌شوند، حذف شوند که با پذیرفتن یک فرض در محدودیت صحت جهت یابی می‌توان این عبارت‌ها را به علت اثرگذاری کم حذف نموده و از معادله (۸) یا (۹) به تنهایی برای جهت یابی استفاده نمود. این فرض به شرح ذیل است:

اگر فاصله منبع از گره‌ها بیشتر از حدود $10 \times d$ باشد، در این صورت نقش d در رابطه کم اثر می‌گردد. البته جهت یابی برای فواصل دورتر از حدود $10 \times d$ قابل قبول است که با توجه به قابلیت‌های بیان شده که یکی از آن‌ها فاصله نزدیک سنسورها از هم یا همان مقدار کم d است، محدوده غیر معتبر یا کمتر از $10 \times d$ ، محدوده‌ای کوچک خواهد بود.



شکل ۲- نحوه قرارگیری گره‌ها و ایجاد مثلث بین آن‌ها

علاوه بر فرض بیان شده باید گره مشترک و دیگر گره‌ها به نحوی انتخاب شوند که برای این هندسه چینش، در مثلث فرضی زاویه θ یا $\frac{\pi}{3} - \theta$ بیشتر از 60° درجه نباشد تا مقدار d_{r10} و d_{r32} کوچک نشود و در نتیجه آن اثرگذاری عبارت‌های $(d^2 - (d_{r12})^2)$ و $(d^2 - (d_{r32})^2)$ در روابط (۸) و (۹) به حداقل برسد و با حذف این عبارت‌ها میزان خطای حاصل کم باشد. لازم به ذکر است زاویه 60° درجه برای آرایه‌هایی با تعداد بیشتر سنسور و البته با شرط قرارگیری سنسورها بر روی محیط یک دایره فرضی، قابل کم شدن است و این زاویه را می‌توان از رابطه $(\frac{360}{2 \times n})$ که n تعداد سنسورهاست محاسبه نمود.

با برقراری فرض بیان شده و نکته پاراگراف قبل می‌توان عبارت $d^2 - d_{r12}^2$ و $d^2 - d_{r32}^2$ را به ترتیب در روابط (۸) و (۹) حذف کرد و همچنین با جایگذاری عبارت $(\frac{\pi}{3} - \theta)$ بجای عبارت $(\frac{2\pi}{3} - \theta)$ در رابطه (۹) به علت بیان شده، روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب به جای روابط (۸) و (۹) حاصل می‌گردد.

حال با جایگزینی روابط (۶) و (۷) در معادله (۱) و (۲) و مرتب سازی معادلات می‌توان نوشت:

$$d^2 - d_{r10}^2 + 2 \cdot r \cdot d_{r10} - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \theta = 0 \quad (۸)$$

$$d^2 - d_{r20}^2 + 2 \cdot r \cdot d_{r20} - 2 \cdot r \cdot d \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{3} - \theta \right) = 0 \quad (۹)$$

با حل دو معادله‌ی دو مجهولی (۸) و (۹) می‌توان مقدار r و θ را محاسبه نمود که همان فاصله منبع تا مبدا مختصات و θ زاویه آن نسبت به مبدا است. البته حل دو معادله دو مجهولی بالا کمی پیچیده است و علت آن وجود عبارت $\cos(2\pi/3 - \theta)$ در رابطه (۹) است. همچنین در محیط واقعی، زمانی که فاصله منبع از گره‌ها زیاد باشد، خطای محاسبه r بیش از خطای محاسبه زاویه θ افزایش می‌یابد و دلیل آن تجمع خطای محاسبه θ و r برای r است. این امر ممکن است حتی فرآیند مکان یابی را غیر ممکن گرداند و امکان مکان یابی به جهت یابی تبدیل شود. خطا در اندازه گیری مقادیر، روند حل معادله و خطای ژند سازی عوامل اصلی به وجود آمدن خطا در محاسبه r و θ است.

لازم به ذکر است، در این روش بر خلاف بعضی روش‌ها، پاسخ فرآیند مکان یابی بصورت قطبی و متشکل از فاصله (r) و زاویه (θ) است و این بدان معناست که اگر تنها زاویه θ محاسبه شود، به جای فرآیند مکان یابی، فرآیند جهت یابی انجام شده است.

همچنین برای حل مسئله مکان یابی یا جهت یابی به صورت نیم کره باید گره بدون استفاده را برای تشکیل یک معادله دیگر بکار گرفت. یعنی برای حل مسئله جهت یابی یا مکان یابی باید سه معادله و سه مجهول تشکیل شود.

۳- جهت یابی با روش پیشنهادی

همانطور که بیان شد، هدف این مقاله جهت یابی با قابلیت‌هایی است که بیان گردید. همچنین لازم به ذکر است که نوع محیط مد نظر در این مقاله، محیط آب است و حداقل سه سنسور برای جهت یابی یک نیم کره مورد نیاز است. در مورد نوع محیط که آب فرض گردیده است، باید در نظر داشت که سرعت امواج آکوستیکی در آب حدود 1450 متر بر ثانیه محیط جو است و این مورد در شرایط فاصله یکسان سنسورها در محیط آب نسبت به محیط جو باعث افزایش خطا می‌شود و حداکثر محدوده مکان یابی کاهش می‌یابد، اما میزان دقت و حداکثر رنج در جهت یابی را می‌توان با توسعه روابط حفظ نمود.

۳-۱- شرح روش پیشنهادی

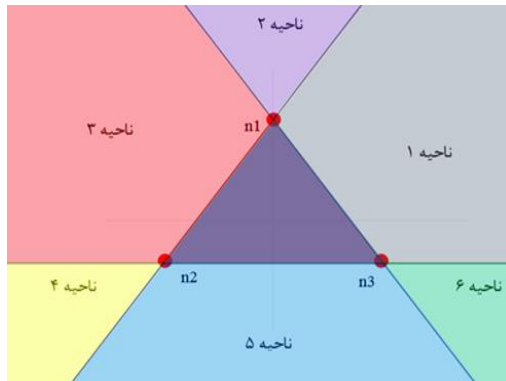
در روش پیشنهادی این مقاله گره‌های سنسوری همانند شکل (۲) چیده شده‌اند. گره سنسوری مبدأ نسبت به شکل (۱) حذف شده است و بجای آن در روش پیشنهادی این مقاله گره دور از منبع که در طرح قبلی برای حالت دو بعدی بدون استفاده بود، به عنوان یک گره انتخاب می‌گردد. در روش پیشنهادی به علت حذف گره مبدأ و نبودن گره

$$d^2 + R^2 - 2.R.d.\cos(\frac{\pi}{3} - \theta).\sin \varphi = B^2 \quad (17)$$

با جایگذاری روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب در روابط (۱۶) و (۱۷) و انجام فرآیندهای ساده سازی و حذف مطابق آنچه قبلاً بیان شد، روابط (۱۸) و (۱۹) حاصل می گردد.

$$\sin \varphi \times \cos \theta \times d = d_{R12} \quad (18)$$

$$\sin \varphi \times \cos(\frac{\pi}{3} - \theta) \times d = d_{R32} \quad (19)$$



شکل ۴- ناحیه های مناسب برای استفاده از روابط روش پیشنهادی

۳-۳ ناحیه بندی محیط

با توجه به چینش گره های سنسوری و داده خام که همان تأخیر زمان ورود است، می توان مطابق شکل (۵) و روابط جدول (۱)، ۳۶۰ درجه اطراف گره ها را از لحاظ زاویه θ به شش ناحیه ۶۰ درجه ای، تقسیم بندی نمود، اما همانطور که بیان شد برای این که در مثلث فرضی زاویه θ یا $\theta - \frac{\pi}{3}$ بیشتر از ۶۰ درجه نباشد و بتوان از روابط بیان شده به درستی استفاده کرد، باید ناحیه بندی مطابق شکل (۴) انجام شود. برای تشخیص نواحی مطابق شکل (۴) باید بتوان نیمساز نواحی شکل (۵) را بدست آورد. برای محاسبه نیمسازها کافی است نسبت تأخیر زمان ورود بزرگ به تأخیر زمان ورود کوچک در حالتی که منبع در روی نیمساز است، محاسبه شود و سپس با استفاده از آن مقدار و میزان تأخیر گره ها می توان نواحی شکل (۴) را تشخیص داد. البته این عدد با تغییر فاصله تغییر اندکی می کند که برای دقت بیشتر می توان منبع را در چند فاصله مختلف قرار داد و چند بار نسبت بیان شده را محاسبه نمود و از نتایج میانگین گرفت و از این میانگین به عنوان عددی برای تشخیص نیمسازهای شکل (۵) استفاده نمود. لازم به ذکر است دلیل استفاده از نسبت تأخیر ورود بزرگ به کوچک حذف نقش پارامتر زاویه φ است.

$$2.r.d_{r12} - 2.r.d.\cos \theta = 0 \quad (10)$$

$$2.r.d_{r32} - 2.r.d.\cos(\frac{2\pi}{3} - \theta) = 0 \quad (11)$$

با ساده سازی روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب روابط (۱۲) و (۱۳) بدست می آید.

$$\theta = \cos^{-1}(\frac{d_{r12}}{d}) \quad (12)$$

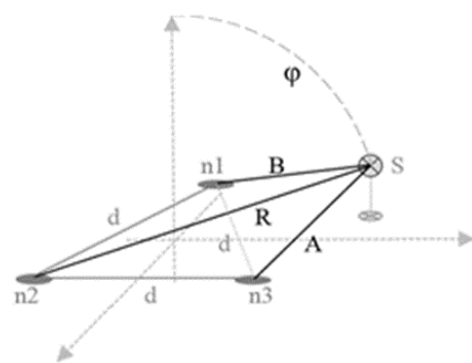
$$\theta = \frac{\pi}{3} - \cos^{-1}(\frac{d_{r32}}{d}) \quad (13)$$

می توان از هر یک مستقل برای جهت یابی دو بعدی استفاده نمود. با توجه به رابطه (۱۲) و (۱۳) می توان نتیجه گرفت که زاویه ورود به گره اصلی در حالتی که دو گره سنسوری با فاصله d از هم قرار داشته باشند با شرایط فرض بیان شده برابر است با:

– زاویه انحراف از صفر درجه گره دوم به گره اصلی = زاویه ورود
 $\cos^{-1}(d / \text{اختلاف فاصله منبع تا دو گره})$

۳-۲ بسط روابط جهت یابی برای جهت یابی نیم کره

مطابق شکل (۳) در مختصات کروی پارامتر φ به دو پارامتر بیان شده r و θ افزوده می شود که بیانگر زاویه عمودی یا همان زاویه وابسته به ارتفاع در محیط است. بنابراین در جهت یابی برای محیط نیم کره باید نقش پارامتر φ در روابط لحاظ شود. بنابراین در مختصات کروی باید به جای روابط (۶) و (۷) از روابط (۱۴) و (۱۵) استفاده کرد.



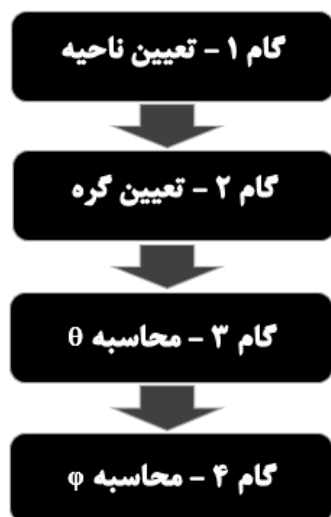
شکل ۳- منبع و خطوط مثلثاتی ترسیمی در محیط ۳ بعدی

$$d_{R12} = R - A \quad (14)$$

$$d_{R32} = R - B \quad (15)$$

همچنین مطابق شکل (۳) باید به جای روابط (۱) و (۲) از روابط (۱۶) و (۱۷) استفاده نمود.

$$d^2 + R^2 - 2.R.d.\cos \theta.\sin \varphi = A^2 \quad (16)$$



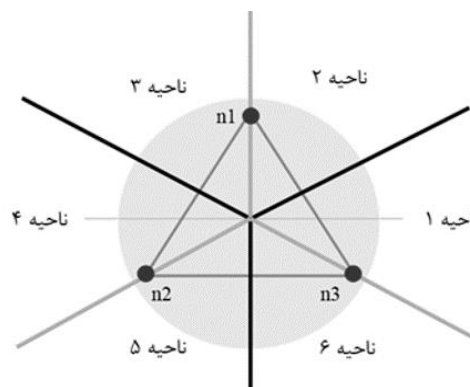
شکل ۶- گام‌های جهت یابی

در گام چهار زاویه φ محاسبه می‌شود. با محاسبه زاویه θ و جایگذاری آن در روابط (۱۸) یا (۱۹) می‌توان زاویه φ را نیز محاسبه نمود. به علت ساده‌سازی‌ها و حذف بعضی عبارت‌ها از روابط ممکن است در مواقع قرارگیری منبع در مکانی تقریباً هم‌ارتفاع با گره‌ها که در این شرایط زاویه φ نزدیک به 90° درجه است، نتیجه جهت‌یابی علاوه بر قسمت حقیقی، دارای قسمت موهومی هم باشد. به‌منظور رفع این موضوع، قسمت حقیقی پاسخ محاسبه زاویه φ برای جواب قابل قبول است. روابط محاسبه زاویه φ در نواحی مختلف در جدول (۳) ثبت شده است که برای هر ناحیه دو رابطه وجود دارد.

در مورد نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با توجه به مباحث مطرح شده می‌توان انتظار داشت که نسبت به طرح مکان‌یابی به روش مثلثاتی [۲] در محدوده تقریبی زیر $10 \times d$ از دقت کمتری برخوردار باشد ولی در زمان پردازش و امکان جهت‌یابی یک نیم‌کره بجای یک محدوده دو بعدی آن‌هم با سه گره از مزایای روش پیشنهادی نسبت به طرح مکان‌یابی به روش مثلثاتی است. در مورد خطای محاسبه زاویه‌های θ و φ نیز انتظار می‌رود که خطای محاسبه در زاویه φ به علت تجمع خطای محاسبه زاویه θ در محاسبه زاویه φ ، خطای محاسبه این پارامتر مخصوصاً در نواحی نزدیک بیشتر از زاویه θ باشد.

۴- شبیه‌سازی و استخراج نتایج

در شبیه‌سازی‌های این مقاله یک طراحی اولیه برای چشش، سرعت موج و تعیین نسبت تأخیر بزرگ به کوچک برای تعیین نیمسازهای شکل (۵) انجام شده است. در این طراحی چشش گره‌ها به نحوی است که فاصله گره‌ها از مرکز ثقل مثلث فرضی تشکیلی از سه گره یکسان و فاصله گره‌ها از یکدیگر (d) یک متر است. مرکز ثقل در مختصات



شکل ۵- ناحیه‌های قابل تشخیص با تأخیر زمان ورود

۳-۴ شیوه جهت‌یابی با استفاده از روش پیشنهادی

پس از تعیین مقادیر فاصله گره‌ها (d)، سرعت موج (v) و تعیین نسبت تأخیر زمان ورود بزرگ‌تر به تأخیر زمان ورود کوچک‌تر برای تشخیص نیمساز شکل (۵)، می‌توان مطابق با روش پیشنهادی و دیاگرام بلوکی شکل (۶) جهت‌یابی را انجام داد.

در گام یک باید مطابق شکل (۴) و بر اساس تأخیرهای زمان ورود موج آکوستیکی به گره‌ها و نسبت آن‌ها با یکدیگر البته با توجه به چشش گره‌ها ناحیه قرارگیری هدف تعیین شود.

در گام دو باید در نواحی یک، سه و پنج شکل (۴) گره‌های دور از منبع یا به ترتیب n_1 ، n_3 و n_2 در نواحی دو، چهار و شش شکل (۴) گره‌های نزدیک به منبع یا به ترتیب n_1 ، n_2 و n_3 به‌عنوان گره مشترک انتخاب گردند.

در گام سه زاویه θ محاسبه می‌شود. برای محاسبه زاویه θ نیاز به حل دو معادله (۱۸) و (۱۹) است. برای حل این دو معادله با توجه ضرب بودن دو مجهول در هم باید یکی از آن‌ها را با ساده‌سازی حذف نمود. با توجه به یکسان بودن عبارت $\sin \varphi$ در دو رابطه، بهتر است ابتدا این پارامتر حذف و زاویه θ محاسبه شود. همچنین برای ساده‌سازی محاسبه زاویه θ می‌توان به‌جای استفاده از d_{R12} و d_{R32} به‌طور مستقیم از تأخیر زمان ورودها استفاده نمود. با توجه به مباحث بیان‌شده با نوشتن نسبت تأخیرهای ورود مطابق معادله (۲۰) و ساده‌سازی می‌توان مطابق رابطه (۲۱) زاویه θ را محاسبه نمود. رابطه (۲۱) برای مواقعی است که منبع در ناحیه (۱) شکل (۴) قرار دارد. روابط کل ناحیه‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

$$\frac{T_{D32}}{T_{D12}} = \frac{\frac{d_{R12}}{v}}{\frac{d_{R32}}{v}} = \frac{d \times \cos \theta \times \sin \varphi}{d \times \cos(\frac{\pi}{3} - \theta) \times \sin \varphi} = \frac{\cos \theta}{\cos(\frac{\pi}{3} - \theta)} = \frac{\cos \theta}{\cos \frac{\pi}{3} \times \cos \theta + \sin \frac{\pi}{3} \sin \theta} \quad (20)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{T_{D12} - T_{D32} \times \cos \frac{\pi}{3}}{\sin \frac{\pi}{3} \times T_{D32}} \right) \quad (21)$$

خطای زاویه‌های θ و ϕ برحسب درجه است، حساب و در تصاویر مربوط به خطای زاویه‌های θ و ϕ ثبت شده است.

۴-۲ نتایج شبیه سازی

همان‌طور که بیان شد برای شبیه سازی منبع در یک مکعب به ابعاد ۲۰۰ در ۲۰۰ در ۱۰۰ متر با گام‌های یک متر حرکت داده شد و نتایج خطای حاصله در این ابعاد محاسبه گردید. در شکل (۷) خطای محاسباتی روش پیشنهادی برای محاسبه θ را در عمق‌های صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ متری از سطح محیط آب نمایش یافته است که گره‌ها نیز در عمق ۱۰۰ متری واقع‌اند. حداکثر خطا برای محاسبه زاویه θ در ناحیه زیر $10 \times d$ که زیر ۱۰ متر می‌شود برابر ۷،۰۸۴۶ درجه و برای ناحیه بالای ۱۰ متر برابر ۰،۷۵ درجه است که در عمق ۱۰۰ متری رخ می‌دهند.

در شکل (۸) خطای محاسبه زاویه ϕ در عمق‌های صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ متر نمایش یافته است. حداکثر خطای محاسبه زاویه ϕ برای ناحیه زیر $10 \times d$ (یا با شرایط شبیه سازی زیر ۱۰ متر) برابر ۲۴،۷۱ درجه و برای ناحیه بالای ۱۰ متر برابر ۹،۲۳ درجه است که در عمق ۱۰۰ متری رخ می‌دهند.

تصاویر شکل (۹) نشانگر نمودار خطای محاسبه زاویه‌های θ و ϕ در مختصات قطبی برای فاصله ۵۰ متری از گره‌هاست. شکل نمودار خطای ۳۶۰ درجه زاویه θ برای همه مقادیر ϕ مشابه است و فقط در مقدار متفاوت است ولی شکل نمودارهای خطای ۳۶۰ درجه زاویه ϕ در مقادیر مختلف ϕ ، هم در مقدار و هم در شکل متفاوت است. در تصاویر سمت چپ نمودارهای مربوط به خطای زاویه θ و در تصاویر سمت راست نمودارهای مربوط به خطای زاویه ϕ است. همچنین نمودار خطای قطبی برای زاویه‌های θ و ϕ در سه مقدار مختلف زاویه ϕ رسم شده است.

(x=101, y=101, z=101) قرار دارد. مکان گره‌ها برحسب متر به شرح ذیل است:

$$n1 : x = 101, y = 101.577, z = 101$$

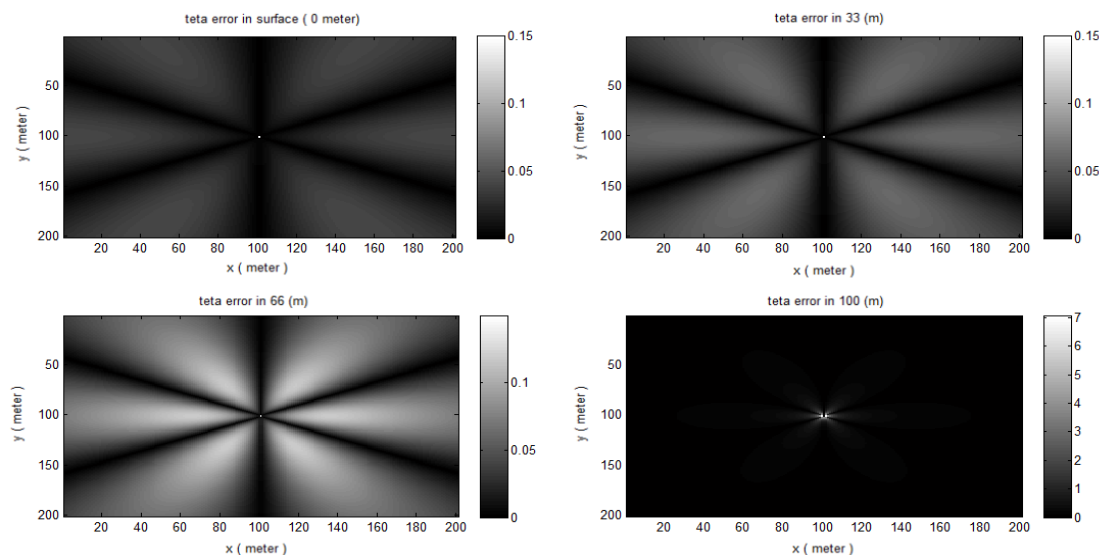
$$n2 : x = 100.5, y = 100.7114, z = 101$$

$$n3 : x = 101.5, y = 100.7114, z = 101$$

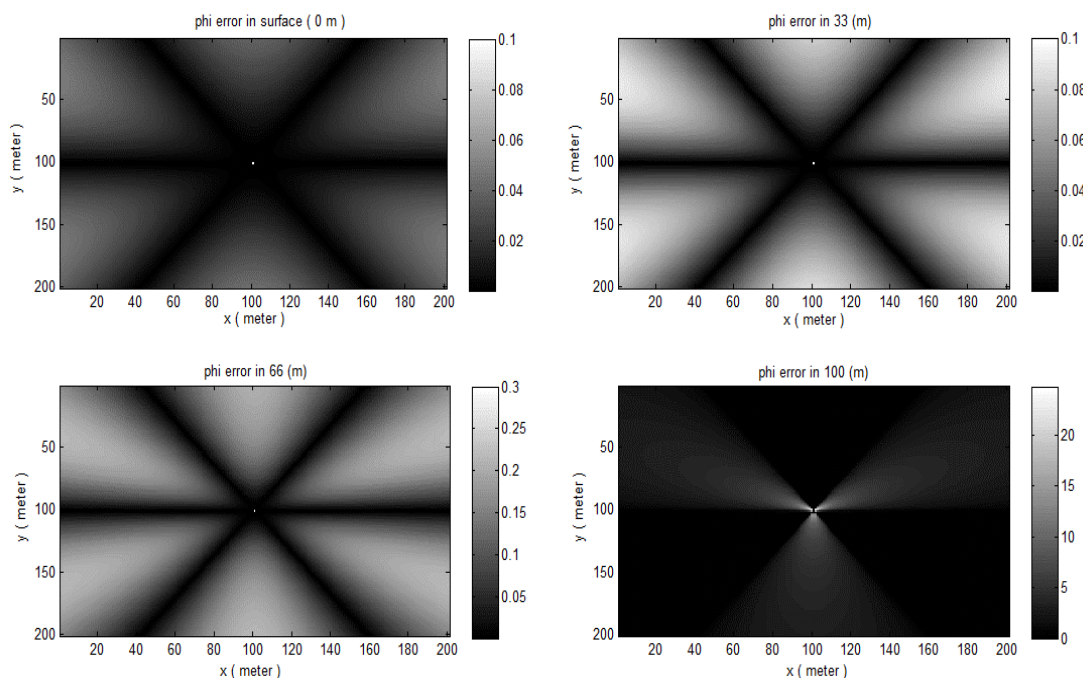
سرعت موج برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین فرض بر آن است که موج انتشاری منبع با هر فاصله‌ای از گره‌ها، در آن‌ها قابل دریافت است. میزان تأخیرهای ورود ایده آل و با محاسبه بر اساس سرعت موج و فاصله گره از هدف به دست می‌آیند و از تکنیک‌های تشخیص زمان ورود بر اساس سیگنال دریافتی استفاده نشده است زیرا هدف بررسی میزان کارایی روش پیشنهادی در جهت یابی است. برای تشخیص نیمسازهای شکل (۵) و ناحیه‌های شکل (۴) با توجه به هندسه و فاصله گره‌ها، نسبت تأخیر زمان ورود بزرگ به تأخیر زمان ورود کوچک در حالت‌هایی که منبع در چهار فاصله ۵، ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ متری از مبدأ قرار گرفته است، محاسبه شده و با میانگین نتایج در جدول (۴) ذکر گردیده است. همچنین نحوه تشخیص ناحیه‌های شکل (۴)، با توجه به مطالب بیان شده در جدول (۵) آمده است.

۴-۱ سناریوی شبیه سازی

در شبیه سازی هدف بررسی عملکرد روش پیشنهادی در فاصله و زاویه‌های θ و ϕ مختلف است. برای این منظور در نرم افزار matlab منبع در محدوده یک تا ۲۰۱ متر به لحاظ x ، یک تا ۲۰۱ متر به لحاظ y و یک (به عنوان سطح) تا ۱۰۱ متر (به عنوان کف)، به لحاظ z با گام‌های یک متر قرار داده شده است. در هر نقطه از محدوده بیان شده مقدار زاویه‌های θ و ϕ واقعی و مقدار زاویه‌های θ و ϕ محاسباتی از روی روابط روش پیشنهادی، محاسبه و قدر مطلق تفریق این مقادیر که نشانگر میزان



شکل ۷ - خطای محاسبه زاویه θ در عمق‌های صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ متر



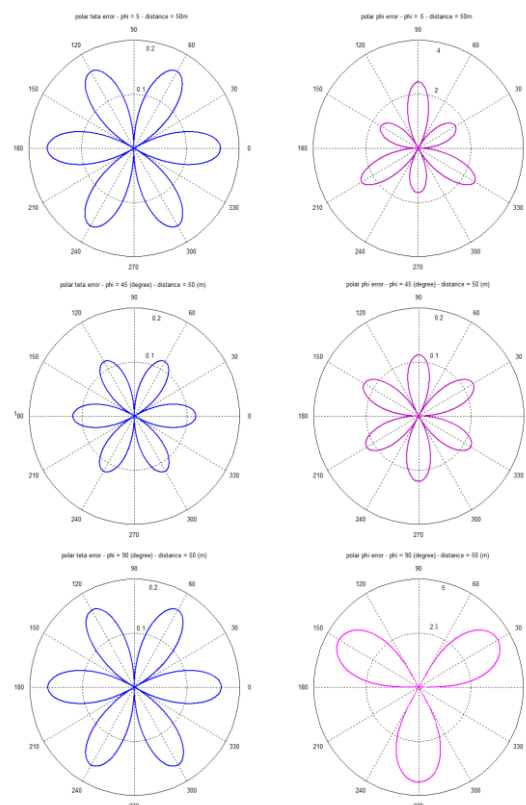
شکل ۸- خطای محاسبه زاویه ϕ در عمق‌های صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ متر

۵- مقایسه نتایج روش‌ها

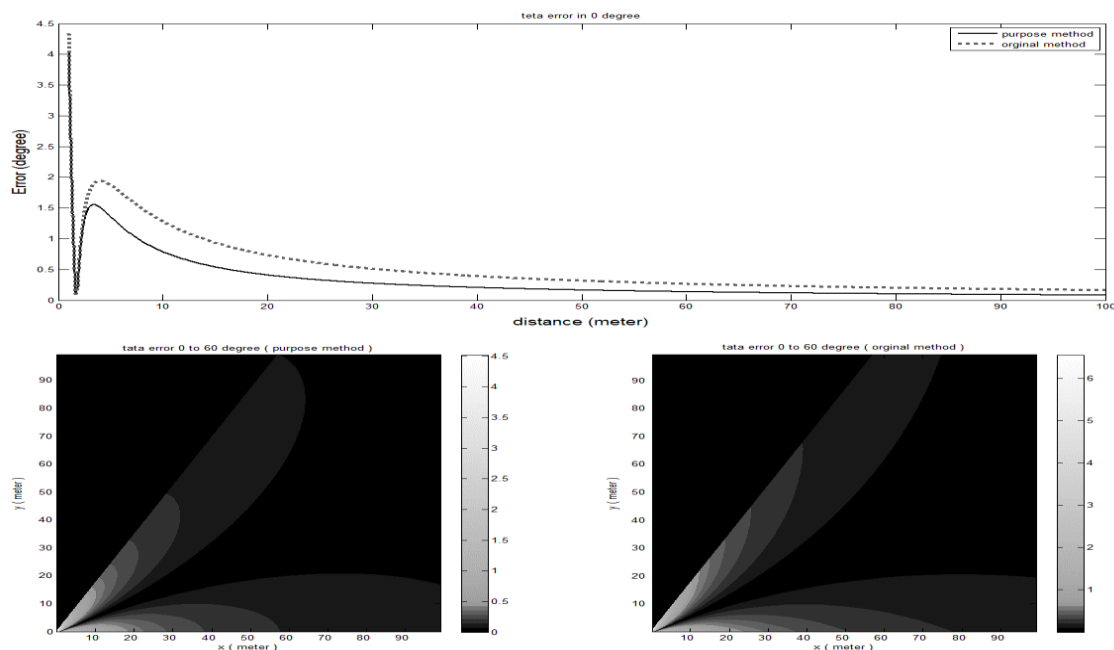
برای مقایسه روابط جهت یابی در طرح مکان یابی به روش مثلثاتی با روش پیشنهادی، چپش گرہ‌ها و دیگر پارامترها یکسان فرض گردیده است. همچنین از آنجا که امکان محاسبه زاویه ϕ در طرح مکان یابی به روش مثلثاتی با سه گرہ وجود ندارد، مقایسه در پارامترهای خطای محاسبه θ و مدت زمان پردازش قابل انجام است. در مورد زمان پردازش می توان انتظار عملکرد بهتر را از روش پیشنهادی داشت. در اجرای فرآیند جهت یابی دو روش با یک رایانه در نرم افزار matlab، نسبت زمان پردازش طرح مکان یابی به روش مثلثاتی (T1) به روش پیشنهادی (T2) به شرح ذیل حاصل شد:

$$T1/T2 < 1.7$$

در بررسی خطای محاسبه زاویه θ روش پیشنهادی با طرح مکان یابی به روش مثلثاتی، در شرایط یکسان محیطی و چپش گرہ‌ها، منبع از زاویه صفر تا ۶۰ درجه و از فاصله یک تا ۱۰۰ متر قرار داده شد و خطای محاسبه دو روش محاسبه گردید. با توجه به نتایج مشخص گردید که خطای روش پیشنهادی در فواصل نزدیک تقریباً مشابه و در فواصل دور کمتر از طرح مکان یابی به روش مثلثاتی است. در شکل (۱۰) خطای محاسبه زاویه θ در دو روش نمایش یافته است. همان طور که مشخص است نتایج روش پیشنهادی بهتر از طرح مکان یابی به روش مثلثاتی است.



شکل ۹- نمودار قطبی خطای زاویه‌های θ و ϕ در فاصله ۵۰ متری از گرہ‌ها با مقادیر مختلف ϕ . تصاویر سمت چپ، خطای زاویه ϕ . تصاویر سمت راست، خطای زاویه θ دو تصویر بالا، خطا در $\phi=5$ درجه، دو تصویر وسط، خطا در $\phi=45$ و دو تصویر پایین، خطا در $\phi=90$



شکل ۱۰- تصویر بالا، خطای محاسبه زاویه θ در صفر درجه از فاصله یک تا ۱۰۰ متری مرکز ثقل مثلث تشکیلی سه گره. تصویر پایین چپ، خطای محاسبه زاویه θ با روش پیشنهادی از صفر تا ۶۰ درجه. تصویر پایین راست، خطای محاسبه زاویه θ با طرح مکان یابی به روش مثلثاتی از صفر تا ۶۰ درجه

۶- نتیجه گیری

در جهت یابی برای نظارت و مراقبت محیطی باید روش هایی انتخاب شوند که در قابلیت ها و هزینه ها دارای توازن باشند و همچنین در انجام اهداف مورد نظر کارآمدی قابل قبول داشته باشند. برای مکان یابی و جهت یابی علاوه بر دقت، پارامترهای دیگری نظیر کارایی، هزینه، مصرف انرژی و ... نیز دارای اهمیت بسیاری هستند. هرچه یک روش نیازمند به تجهیزات کمتر و مصرف انرژی بهینه تر و دارای دقت مناسب تری باشد، کاربردی تر است. البته باید بین قابلیت های و هزینه ها توازنی وجود داشته باشد.

در این مقاله روشی بر مبنای یک طرح مکان یابی با روش مثلثاتی ارائه شده است که در روش پیشنهادی با ساده سازی روابط و با پذیرفتن خطا در محدوده نزدیک به گره های سنسوری و جایگزینی توانایی جهت یابی به جای مکان یابی، فرآیند جهت یابی با نتایج بهتری انجام شده است. مزایای روش پیشنهادی عبارتند از زمان پردازش کمتر، بُعد محیطی نیم کره ای به جای دو بعدی، تعداد گره کمتر و خطای کمتر در شرایط چیش یکسان گره های سنسوری. علت کم تر شدن زمان پردازش، ساده سازی و حذف بعضی عبارت های کم اثر است که منجر به حل یک معادله یک مجهولی به جای دو معادله دو مجهولی برای رسیدن به پاسخ می شود و همین موضوع یعنی حصول پاسخ با یک معادله باعث امکان جهت یابی یک نیم کره با دو معادله می شود. علت کمتر شدن گره مورد نیاز هم به علت حذف گره موجود در مبدأ و به کارگیری گره سنسوری بدون استفاده دور از هدف در روش پیشنهادی است. علت خطای کمتر محاسباتی این موضوع است که حذف گره سنسوری مبدأ

خود مقداری خطا به همراه دارد و در روش پیشنهادی با حذف بعضی عبارت های کم اثر که در حالت نبود گره سنسوری در مبدأ منجر به افزایش خطا می شوند، خطا کاهش می یابد و در نتیجه خطای روش پیشنهادی از طرح مکان یابی به روش مثلثاتی با شرایط یکسان کمتر می شود. در مجموع روش پیشنهادی این مقاله روشی مناسب برای جهت یابی به لحاظ سرعت، سادگی و خطای قابل قبول برای اهداف با فاصله متوسط تا دور از گره های سنسوری است.

در این پژوهش صرفاً موضوع عملکرد روابط روش پیشنهادی با چیش خاص گره های سنسوری مورد ارزیابی قرار گرفته است و شرایط محیطی و پردازش موج دریافتی برای محاسبه تأخیر زمان ورود ایده آل در نظر گرفته شده است و با این شرایط حداکثر خطای این روش در فاصله مورد اعتبار که بیش از ۱۰ برابری فاصله گره های سنسوری باهم است برای محاسبه زاویه سمتی برای همه نقاط کمتر از دو درجه و در ارتفاع هم سطح آرایه است و این خطا در ارتفاع های بالای آرایه کمتر از یک درجه است که در نقاط محدودی رخ می دهد. همچنین حداکثر خطا محاسبه زاویه فرازی نیز در ارتفاع هم سطح سنسورها رخ می دهد و کمتر از ۱۰ درجه است و این خطا نیز با افزایش ارتفاع به شدت کاهش می یابد. از محدودیت های روش پیشنهادی می توان عدم برخورداری از دقت مناسب برای فواصل نزدیک نام برد. همچنین در مواردی که در تعداد و جایگذاری سنسورها محدودیتی وجود ندارد و دقت بسیار بالا مهم است، استفاده از روش پیشنهادی توصیه نمی شود. در کل بر اساس نتایج این روش برای حالت دو بعدی مناسب نیست و در حالت نیم کره با افزایش ارتفاع نتایج بسیار بهتری حاصل می شود.

مراجع

[12] A. Pourmohammad and S. M. Ahadi, "N-dimensional N-microphone sound source localization", EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing 2013, 2013.

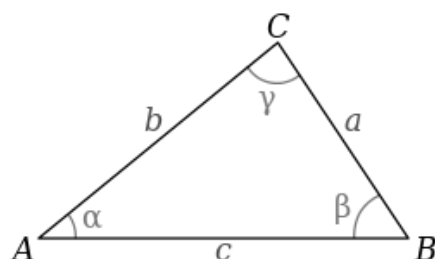
[13] Y. Kan, P. Wang, F. Zha, M. Li, W. Gao and B. Song, "Passive Acoustic Source Localization at a Low Sampling Rate Based on a Five-Element Cross Microphone Array", Sensors 2015, 15(6), pages 13326-13347, 2015.

[14] M. Hazewinkel, "Euclidean geometry, ed. (2001), Encyclopedia of Mathematics." 978-1, 2001.

[15] available online :
https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_cosines

پیوست

قضیه ۱: بر اساس قانون کسینوس ها می توان روابط (۲۲) تا (۲۴) را برای مثلث شکل (۱۱) نوشت [۱۴ و ۱۵]:



شکل ۱۱ - یک مثلث مثالی با نام گذاری اضلاع، رئوس و زاویه های آن [۱۵]

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma \quad (22)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta \quad (23)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \quad (24)$$

[۱] احمد خدایاری رستم آباد، محمدحسن قاسمیان، "جهت یابی غیر فعال منابع صوتی با آرایه میکروفونی"، نهمین کنفرانس سالانه انجمن کامپیوتر ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۲.

[۲] علیرضا عالمی، محمد رضا الهامی، "موقعیت یابی منبع صوت در آرایه میکروفونی با استفاده از روش مثلثاتی جایگزین روش معادلات هیپربولیک"، مجله علمی-پژوهشی. ۱۳۹۱؛ ۳(۲): ۱۳۹-۱۴۴.

[3] S. T. Birchfield and D. K. Gillmor, "Acoustic source direction by hemisphere sampling", Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference on (Volume:5), pages 3053 – 3056, 2001.

[4] U.C. Guard, "Specification of the transmitted Loran-C signal". US Dept. of Transportation, 1981.

[5] A. Bensky, "Wireless positioning technologies and applications". Artech House, 2016.

[6] J. H. DiBiase, H. F. Silverman and M. S. Brandstein, "Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

[7] A. Karbasi and A. Sugiyama, "A New DOA Estimation Method Using a Circular Microphone Array", European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pages 778-782, 2007.

[8] R. Muhamed, "Direction of arrival estimation using antenna arrays", MSc thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

[9] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT – estimation of signal parameters via rotational invariance techniques", IEEE Trans. ASSP, vol. 37, no. 7, pages 984-995, 1989.

[10] N. Odachi, H. Shoki and Y. Suzuki, "High-speed DOA Estimation using BeamSpace MUSIC", Vehicular Technology Conference Proceedings-Spring Tokyo 2000 IEEE 51st ,pages: 1050 – 1054, 2000.

[11] G. C. Knapp and C. H. Carter, "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay", IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 24, pages 320–327, 1976.