

## موقعیت یابی منبع صوت در آرایه میکروفنی با استفاده از روش مثلثاتی جایگزین روش معادلات هیپربولیک

محمد رضا الهامی<sup>۱</sup>، علیرضا عالمی<sup>۲\*</sup>

۱- استادیار ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۲۱)

### چکیده

یکی از روش‌های یافتن اهداف متحرک و تهاجمی دشمن، استفاده از دستگاه‌های موقعیت‌یابی است. یافتن موقعیت این اهداف با استفاده از صوت منتشر شده از آنها، یکی از راهکارهای پدافند غیرعامل برای مقابله و پیشگیری از تهاجم دشمن است. این نوع شناسایی به صورت غیرفعال و بدون ارسال سیگنال صورت پذیرفته و روشی ساده برای بازدارندگی و پدافند غیرعامل است. از سیگنال‌های صوتی منتشر شده توسط یک منبع صوتی، می‌توان به وسیله اندازه‌گیری اختلاف زمان دریافت صوت در آرایه میکروفنی، جهت و موقعیت مکانی منبع را تخمین زد. به دلیل وجود فاصله بین میکروفن‌ها در آرایه، صوت با زمان‌های متفاوتی به میکروفن‌ها می‌رسد. روش‌های مختلفی برای تخمین اختلاف زمان دریافت صوت در میکروفن‌ها وجود دارد. مکان هندسی موقعیت منبع صوتی که چنین اختلاف زمانی را به وجود می‌آورد، به صورت یک هذلولی تعریف شده است. موقعیت منبع صوت به وسیله حل مجموعه معادلات غیرخطی حاصل از این هذلولی‌ها، به دست می‌آید. الگوریتم‌های موقعیت‌یابی صوتی عموماً به دنبال حل این معادلات با استفاده از خطی‌سازی و تقارن هندسی هستند. در این تحقیق برای به دست آوردن موقعیت منبع صوت، از روابط مثلثاتی حاصل از تقارن هندسی موجود در آرایه میکروفنی چهار جزئی به جای معادلات هذلولی غیر خطی استفاده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که روش مثلثاتی جایگزین، دارای دقت بیشتری نسبت به روش معادلات پیچیده هیپربولیک است. هم‌چنین بار محاسباتی الگوریتم را نیز به شدت کاهش داده است و نویزپذیری کمتری دارد. میانگین خطای حاصل از نویز در روش هیپربولیک ۱۳/۱ درصد و در روش مثلثاتی ۸/۹ درصد است.

**کلیدواژه‌ها:** موقعیت‌یابی صوتی، منبع صوت، آرایه میکروفنی، معادلات هیپربولیک، روش مثلثاتی.

## Sound Localization in Microphone Array Using Trigonometric Method versus Hyperbolic Equations

M. R. Elhami, A. Alemi\*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Imam Hossein University

(Received: 11/03/2011; Accepted: 07/11/2012)

### Abstract

Localization systems are usually used for detecting moving and offensive targets of enemy. The sound localization, however, is one of the main approaches in passive defense which has an impending role to aggression of enemy. This kind of localization method is carried out in a passive way, without emission of any signals and cannot be detected easily. The acoustic signals emitted by a sound source are used to detect its position. Sound source localization is estimated by measuring the time difference of sound from the microphone array. Due to the distance between the microphones in an array, sound reaches the microphone with shifting times. There are many various methods for estimating this time difference of the sound. The locus of sound source position creates a series of hyperbolic; and the source location is obtained by solving a set of nonlinear equations of these hyperbolic. Sound positioning algorithms generally solve these equations by linearization and geometric symmetry. In this study, instead of nonlinear hyperbolic equations, the trigonometric relations of geometric symmetry in a four microphone array are used to obtain the position of sound source. The results show that the trigonometric method is more accurate and less sensitive to noise as well as lower computation load, compared to the sophisticated hyperbolic equations. The mean error induced by noise is about 8.9% and 13.1% in the trigonometric and hyperbolic method respectively.

**Keywords:** Sound Localization, Sound Source, Microphone Array, Hyperbolic Equations, Trigonometric Method.

\*Corresponding author E-mail: Alemi.ar@gmail.com

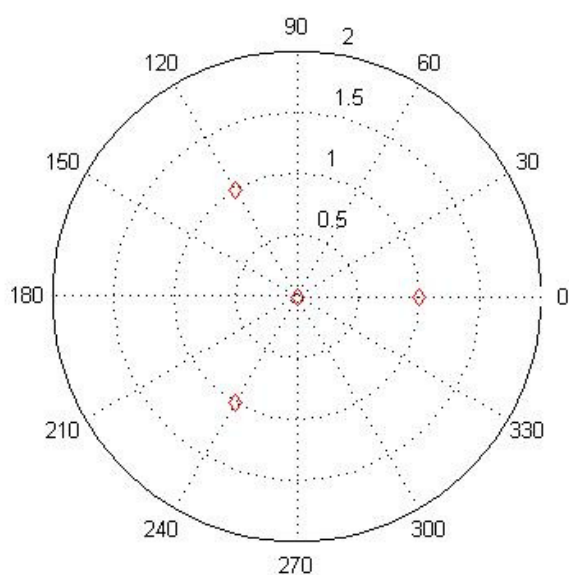
## ۱. مقدمه

داده‌اند. آنها برای موقعیت هذلولی، راه حلی را ارائه دادند که هم برای فاصله‌های نزدیک و هم برای فاصله‌های دور معتبر است. این معادلات غیرخطی و راه حل آن، بسته به هندسه و تعداد میکروفن‌های موجود در آرایه میکروفنی، متفاوت است و در نوشته‌های مختلفی مورد بحث قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. در این تحقیق به جای حل معادلات غیرخطی و مشخص کردن مختصات منبع صوت در مرحله دوم، از روابط مثلثاتی استفاده شده است.

برای به دست آوردن تأخیر زمانی در سیگنال‌های صوتی، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این کار از روش همبستگی متقابل استفاده شده است [۱۱].

## ۳. آرایه میکروفنی

آرایه تعریف شده در این کار متشکل از چهار میکروفن است. در این آرایه میکروفن اول در مرکز سیستم مختصاتی واقع شده است و سه میکروفن دیگر با زاویه  $120^\circ$  نسبت به یکدیگر و با فاصله یکسان (۱ متر) نسبت به میکروفن مرکزی قرار دارند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت قرار گرفتن چهار میکروفن در آرایه میکروفنی

با قرار گرفتن منبع صوت در هر نقطه‌ای پیرامون آرایه میکروفنی، با توجه به سیگنال صوتی دریافت شده و تأخیرهای زمانی دریافتی ناشی از آن و با استفاده از روابط مثلثاتی، موقعیت منبع صوت مشخص می‌شود.

بر اساس هندسه آرایه، محیط پیرامون آرایه به سه منطقه کلی تقسیم می‌شود. اگر مرز بین این محدوده‌ها هم به عنوان موقعیت‌های خاص در نظر گرفته شود، در نهایت با ۶ رابطه هندسی و مثلثاتی موقعیت منبع مشخص می‌شود (شکل ۲).

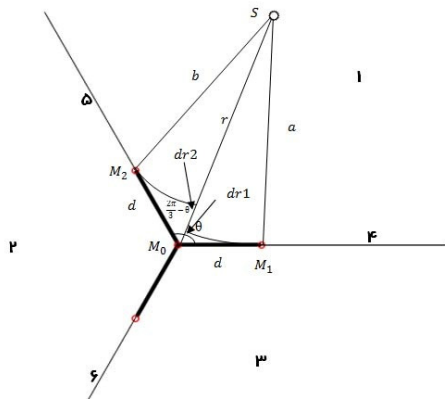
از سیستم‌های شناسایی صوتی در وسایل کوچک دستی شناسایی، موقعیت یابی وسایل نقلیه [۱]، سیستم‌های نظارت بر وسایل نقلیه [۲]، روبات‌ها [۳] و شبکه حسگرها [۴] و ... استفاده می‌شود. علاوه بر آن برای یافتن موقعیت توپخانه، محل کمین تک تیرانداز و موقعیت اهداف متحرک از زمان جنگ جهانی دوم استفاده می‌شود. اما آن‌چه این روش‌ها و سیستم‌های شناسایی را از وسایل مدرن الکترونیکی دفاعی مثل رادارها و سونارها متمایز می‌سازد، حالت غیر فعال و نامحسوس آنهاست. به این معنی که این‌گونه سیستم‌ها اغلب بدون ارسال سیگنالی و تنها به صورت غیر فعال فقط صوت را شنیده و سلاح در آن جهت فعال می‌شود. این سیستم‌ها به دلیل این‌که هیچ سیگنالی را منتشر نمی‌کند، به وسیله دستگاه‌های کشف الکترونیکی نیز قابل ردیابی نیستند. همین ویژگی مهم کافی است که این‌گونه سیستم‌های شناسایی در رده مهم‌ترین عوامل بازدارنده در پیشگیری از حمله ناگهانی دشمن قرار گرفته و یکی از راهکارهای کارا و مفید در پدافند غیرعامل قلمداد گردد.

برای تخمین موقعیت منبع صوت در فضای دو بعدی، حداقل باید از سه میکروفن برای به دست آوردن دو تأخیر زمان در دریافت صوت و حل دقیق معادلات، استفاده نمود [۵]. افزایش تعداد میکروفن‌ها و استفاده از داده‌های اضافه می‌تواند دقت تخمین را بهبود بخشد [۷] و [۶]. اما افزایش تعداد میکروفن‌ها برای رسیدن به یک تخمین مناسب، به افزایش تعداد و هزینه تجهیزات، مصرف انرژی بیشتر و حل معادلات پیچیده برای رفع ابهامات و حذف جواب‌های نادرست نیاز دارد. در این پروژه از آرایه میکروفنی چهار جزئی برای موقعیت‌یابی منبع صوت در محیط دو بعدی استفاده شده است.

## ۲. موقعیت‌یابی منبع صوت

الگوریتم‌های موقعیت‌یابی منبع صوت به طور معمول به این صورت هستند:

- ۱- گروه‌بندی میکروفن‌ها به زوج‌های میکروفنی،
  - ۲- تخمین تأخیر زمان دریافت صوت بین میکروفن‌ها برای هر زوج، به وسیله استفاده از روش‌های تخمین تأخیر زمانی،
  - ۳- پیدا کردن یک الگوریتم برای حل غیرمبهم مجموعه‌ای از معادلات هیپربولیک غیرخطی، ناشی از تأخیرهای زمانی تخمین زده شده. (پیدا کردن نقطه‌ای که تمام هذلولی‌های حاصل از تأخیرهای زمانی، بیشترین نزدیکی را دارند.)
- راه‌حل تولید شده به وسیله این الگوریتم منجر به تخمین موقعیت منبع صوت می‌شود [۸]. بر اساس این دیدگاه، تخمین‌های مختلفی در مقالات دیده می‌شود [۹ و ۵]. به‌طور کامل در رابطه با سیستم‌های موقعیت‌یابی هذلولی بحث کرده‌اند. آنها روش‌های مؤثری را برای موقعیت‌یابی منبع صوت مبتنی بر تقاطع منحنی هذلولی‌های تعریف شده، به وسیله تأخیر زمان دریافتی در میکروفن‌ها، پیشنهاد



شکل ۳. نمایش موقعیت منبع صوت و روابط هندسی بین منبع صوت و میکروفن‌ها

با نوشتن رابطه مثلثاتی کسینوس‌ها برای دو مثلث به دست آمده بین منبع صوت و زوج‌های میکروفنی، دو رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

در روابط بالا،  $a$  و  $b$  فاصله بین منبع صوت تا میکروفن‌های  $M_1$  و  $M_2$  و  $r$  فاصله بین منبع صوت تا میکروفن مرکزی  $M_0$  است.  $D$  عبارت است از فاصله بین میکروفن‌ها با مقداری معلوم.

با استفاده از روش همبستگی متقابل، تأخیرهای زمانی بین میکروفن‌ها  $TD_{10}$  و  $TD_{20}$ ، به دست می‌آید. ضرب مقدار سرعت صوت در مقادیر تأخیرهای زمانی، فاصله طی شده توسط صوت بعد از برخورد به میکروفن‌های  $a$  و  $b$  تا میکروفن مرکزی را مشخص می‌نماید:

$$dr1 = TD_{10} * V \quad (4)$$

$$dr2 = TD_{20} * V \quad (5)$$

فاصله طی شده توسط صوت بعد از رسیدن به میکروفن اول ( $M_1$ )، تا رسیدن به میکروفن مرکزی ( $M_0$ )، عبارت است از  $dr1$  و فاصله طی شده توسط صوت بعد از رسیدن به میکروفن دوم ( $M_2$ )، تا رسیدن به میکروفن مرکزی ( $M_1$ )، عبارت است از  $dr2$ . از این رو داریم:

$$r = a + dr1 \Rightarrow a = r - dr1 \quad (6)$$

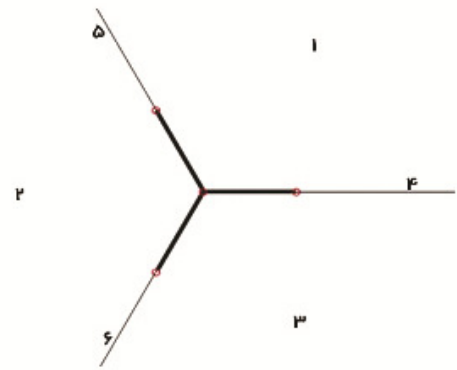
$$r = b + dr2 \Rightarrow b = r - dr2 \quad (7)$$

با قرار دادن مقدار  $a$  از رابطه (۶) در رابطه (۲) و همچنین با قرار دادن مقدار  $b$  از رابطه (۷) در رابطه (۳) و پس از ساده سازی و مرتب کردن عبارات، روابط زیر حاصل می‌شود:

$$(d^2) - (dr1^2) + (2 \times r \times dr1) - (2 \times r \times d \times \cos(\theta)) = 0 \quad (8)$$

$$(d^2) - (dr2^2) + (2 \times r \times dr2) - \left( 2 \times r \times d \times \cos\left(\frac{2 \times \pi}{3} - \theta\right) \right) = 0 \quad (9)$$

در معادلات (۸) و (۹)،  $r$ ،  $\theta$  مجهول و مقادیر  $d$  و  $dr1$  و  $dr2$  معلوم هستند. با حل هم‌زمان این دو رابطه نسبت به مجهولات  $r$  و  $\theta$ ، مقادیر  $r$  و  $\theta$  حاصل می‌شود.



شکل ۴. تقسیم محیط پیرامون آرایه میکروفنی به ۶ وضعیت مختلف برای تعیین موقعیت منبع صوت

موقعیت منبع صوت در هر یک از این محدوده‌های شش‌گانه، دارای روابط هندسی مشخصی است.

مختصات تعریف شده برای این آرایه میکروفنی، مختصات قطبی است. موقعیت میکروفن‌ها به این شکل مشخص شده است:

$$M_2(d,0), M_1(d,0), M_0(0,0).$$

موقعیت منبع صوت به صورت  $S(r,\theta)$  که جهت زاویه به صورت پادساعت‌گرد است، تعریف می‌شود.

با استفاده از این چهار میکروفن، سه زوج میکروفنی تشکیل داده می‌شود. با به دست آوردن تابع همبستگی متقابل برای زوج‌های میکروفنی  $M_{10}$ ،  $M_{20}$ ،  $M_{30}$ ، اختلاف زمان دریافتی برای هر زوج میکروفنی به ترتیب به صورت  $TD_{10}$ ،  $TD_{20}$ ،  $TD_{30}$ ، حاصل می‌شود:

$$TD_{ij} = T_i - T_j \quad (1)$$

با قرار گرفتن منبع صوت در هر نقطه‌ای پیرامون آرایه میکروفنی، تأخیرهای زمانی دریافتی ناشی از سیگنال صوتی تخمین زده می‌شود و با استفاده از روابط مثلثاتی، موقعیت منبع صوت تخمین زده می‌شود.

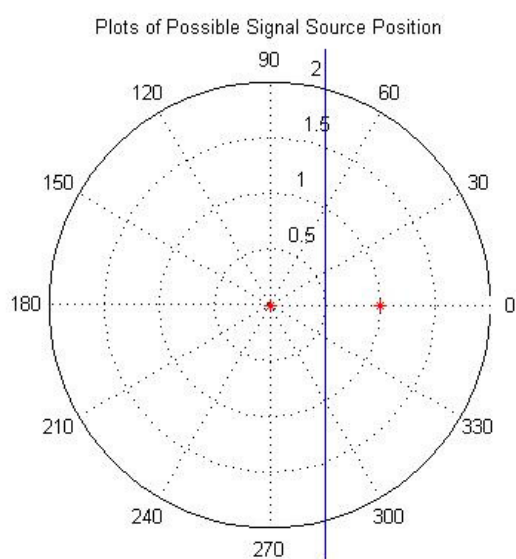
هندس آرایه و به‌ویژه تقارن موقعیت میکروفن‌ها در نوع معادلات و حجم پردازش لازم برای حل آن، بسیار مؤثر است. به دلیل وجود تقارن در سه جهت مختلف در این آرایه، بسیاری از محدودیت‌های موجود در آرایه‌های خطی و  $L$  شکل برطرف شده است.

#### ۴. تعیین موقعیت منبع صوت

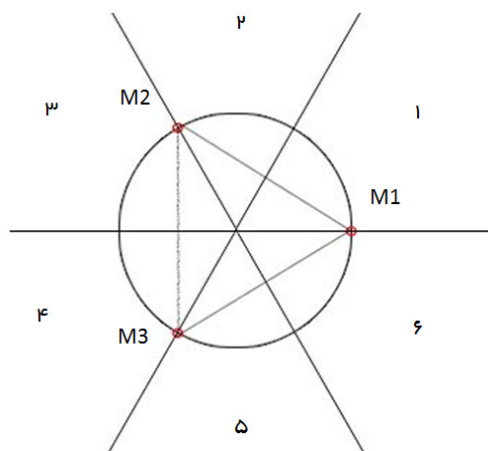
به دلیل تشابه و تقارن موجود در آرایه، دو وضعیت کلی برای موقعیت قرارگیری منبع صوت در نظر گرفته می‌شود. حالت اول قرارگیری منبع صوت در محدوده ۱-۳ است و حالت دوم قرارگیری منبع صوت در مرز بین این محدوده است.

اگر منبع صوت در محدوده ۱ قرار داشته باشد، موقعیت منبع صوت به این صورت به دست می‌آید (شکل ۳):

- ۲- در صورتی که  $TD_{21} < 0$  و  $TD_{31} > 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(\pi/3, 2\pi/3)$ ،
- ۳- در صورتی که  $TD_{23} < 0$  و  $TD_{31} < 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(2\pi/3, \pi)$ ،
- ۴- در صورتی که  $TD_{21} < 0$  و  $TD_{23} > 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(\pi, 4\pi/3)$ ،
- ۵- در صورتی که  $TD_{21} > 0$  و  $TD_{31} < 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(4\pi/3, 5\pi/3)$ ،
- ۶- در صورتی که  $TD_{23} > 0$  و  $TD_{31} > 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(5\pi/3, 2\pi)$ ،
- با استفاده از این روابط می‌توان از مقادیر  $r$  و  $\theta$  رفع ابهام کرد و موقعیت دقیق منبع صوت را مشخص کرد.



شکل ۴. مکان هندسی موقعیت منبع صوت با اختلاف زمانی صفر (محور خنثی)



شکل ۵. تقاطع محورهای خنثی در آرایه میکروفونی و تقسیم محیط پیرامون آرایه میکروفونی به ۶ وضعیت مختلف برای تعیین موقعیت منبع صوت

با توجه به هندسه مسئله، برای بررسی صحت جواب شرط زیر بررسی می‌شود:

$$0 < \theta < 2\pi/3 \quad (10)$$

موقعیت منبع صوت در دیگر محدوده‌های تعریف شده در شکل (۲) نیز با همین روش مشخص می‌شود. برای رفع ابهام از مقادیر  $r$  و  $\theta$  علاوه بر رابطه (۱۰)، از روابط بین مقادیر اختلاف زمان دریافتی استفاده می‌شود.

### ۵. رفع ابهام از موقعیت منبع صوت

در هر زوج میکروفن، یکی از میکروفن‌ها به‌عنوان مرجع انتخاب شده و اختلاف زمان دریافت صوت، نسبت به آن مشخص می‌شود. در هر زوج میکروفن، مقدار اختلاف زمانی می‌تواند یکی از سه حالت مثبت، منفی یا صفر باشد. اگر زمان دریافت صوت در دو میکروفن یکسان باشد، اختلاف زمان دریافت صوت برابر صفر است. به این معنا که صوت منتشر شده از منبع صوت، فاصله یکسانی را برای رسیدن به دو میکروفن طی می‌کند؛ از این رو منبع صوت بر روی خط عمود بر محور میکروفن‌ها قرار خواهد داشت (شکل ۴). این محور را که مرز بین اختلاف زمانی مثبت و منفی است؛ محور خنثی می‌نامیم. از این رو برای هر زوج میکروفنی، یک محور خنثی قابل تعریف است.

اگر میکروفن ۱ به‌عنوان مرجع اندازه‌گیری اختلاف زمان دریافت صوت در زوج میکروفن  $M_{12}$  در نظر گرفته شود؛ در صورتی که اختلاف زمان دریافت صوت  $TD_{21}$  (اختلاف زمان دریافت صوت در میکروفن ۲ نسبت به میکروفن ۱) مثبت باشد ( $TD_{21} > 0$ )، منبع صوت در سمت چپ محور خنثی (نزدیک به میکروفن ۱) قرار خواهد داشت؛ یعنی صوت، فاصله بیشتری را برای رسیدن به میکروفن ۲ نسبت به میکروفن ۱ طی خواهد کرد؛ و اگر اختلاف زمان دریافت صوت، منفی باشد ( $TD_{21} < 0$ )، منبع صوت در صفحه سمت راست محور خنثی قرار خواهد داشت. به این معنا که صوت ابتدا به میکروفن ۲ و سپس به میکروفن ۱ می‌رسد.

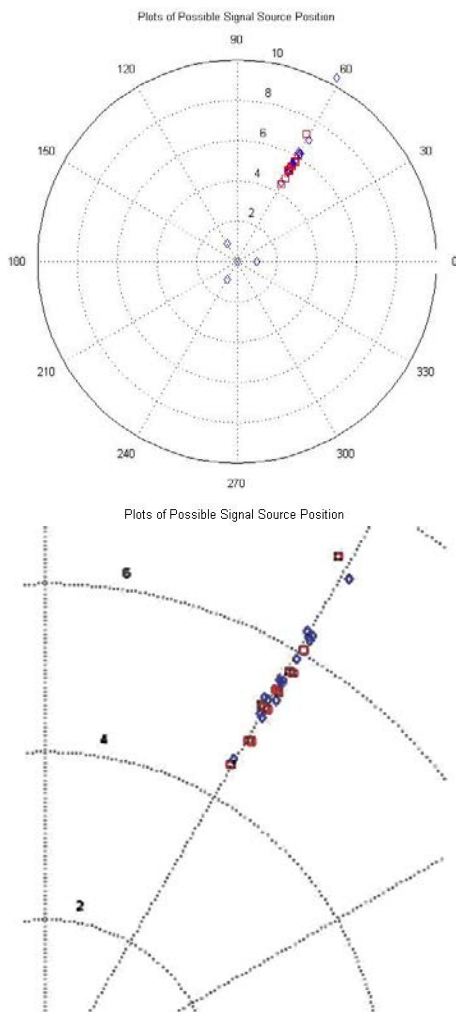
با توجه به تعریف  $TD_{ij}$  می‌توان نتیجه گرفت که:

$$TD_{ij} = -TD_{ji} \quad (11)$$

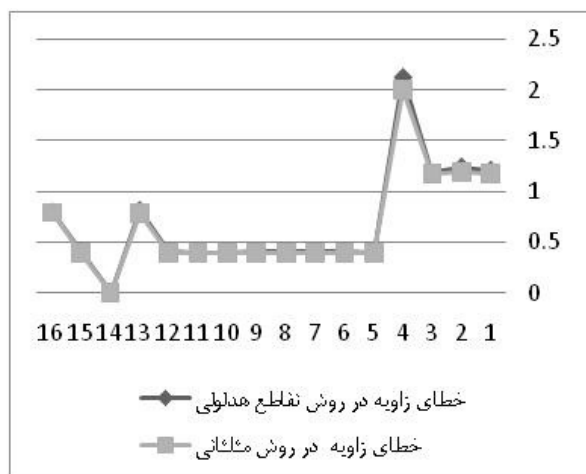
این کار را می‌توان برای تمام زوج‌های میکروفنی موجود در آرایه، انجام داد و با استفاده از تقاطع محورهای خنثی، محیط پیرامون آرایه را بر اساس علامت (نه بزرگی) اختلاف زمان دریافت صوت، تقسیم نمود. با توجه به تغییرات علامت تأخیرهای زمان دریافتی، ۶ محدوده برای موقعیت منبع صوت به‌دست می‌آید که هر کدام از این قسمت‌ها یک بازه زاویه ۶۰ درجه‌ای برای موقعیت منبع صوت است (شکل ۵). موقعیت منبع صوت بر اساس علامت تأخیرهای زمانی دریافت صوت به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

- ۱- در صورتی که  $TD_{23} < 0$  و  $TD_{21} > 0$  باشد، محدوده موقعیت منبع صوت عبارت است از  $(0, \pi/3)$ ،

برد به دست آمده برای منبع (r) نشان می‌دهد که خطای به وجود آمده در روش مثلثاتی، کمتر از خطای روش تقاطع هذلولی است. از این رو این الگوریتم حساسیت کمتری به نویز از خود نشان می‌دهد.



شکل ۶. نتیجه‌های حاصل از تکرار روش‌های هیپربولیک و مثلثاتی با وارد کردن نویز به سیستم



شکل ۷. مقایسه عملکرد روش‌های تقاطع هذلولی و مثلثاتی در پیدا کردن راستای منبع صوت با وجود خطای ناشی از نویز یکسان با SNR برابر ۱۰ محور افقی: تعداد آزمایش‌ها؛ محور عمودی: درصد خطای زاویه‌ای

## ۶. شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد روش‌های مثلثاتی و تقاطع هذلولی (هیپربولیک)

با استفاده از نرم‌افزار Matlab الگوریتم‌های به دست آمده از هر دو روش مثلثاتی و هیپربولیک شبیه‌سازی شده است. برای یک مقایسه صحیح و دقیق این دو روش، داده‌های استفاده شده در این تحقیق از یک پروژه در دانشگاه Rice گرفته شده است. داده‌های تولید شده توسط منبع صوت به وسیله یک آرایه چهار میکروفنی دریافت شده و سپس الگوریتم‌های هذلولی و مثلثاتی برای تعیین اختلاف زمانی اعمال شده است. در این آرایه Y شکل، فاصله میکروفن‌ها ۱ متر است.

در این الگوریتم‌ها، چهار فایل صوتی به دست آمده از آرایه چهار میکروفنی، به عنوان ورودی دریافت می‌شود. با استفاده از روش همبستگی متقابل، اختلاف زمان دریافت بین این ورودی‌ها مشخص شده است. پس از این مرحله، موقعیت منبع صوت از دو روش تقاطع هذلولی (هیپربولیک) و مثلثاتی به دست می‌آیند. در روش هیپربولیک از مختصات کارتیزین و در روش مثلثاتی از مختصات قطبی استفاده شده است و در آخر نتیجه‌های هر دو روش به مختصات قطبی به صورت  $r$  و  $\theta$  در آمده و با هم مقایسه می‌شوند.

برای مقایسه عملکرد این دو روش در شرایط واقعی، نویز نرمال یکسانی با نسبت سیگنال به نویز (SNR) برابر ۱۰ به صورت تصادفی، به ورودی هر دو الگوریتم اضافه شده است. برای بررسی تکرار پذیری نتیجه‌ها، با توجه به اینکه تابع نویز به صورت تصادفی به دست آمده و به بردارهای صوتی اضافه می‌شوند، الگوریتم‌ها را ۲۰ مرتبه تکرار کرده و میانگین نتیجه‌ها با هم مقایسه شده است (شکل ۶).

در شکل (۶) نقاط دایره‌ای شکل، نشان دهنده نتیجه‌های حاصل از روش هیپربولیک و نقاط مربع شکل نشان دهنده نتیجه‌های حاصل از روش مثلثاتی است.

نتیجه‌های حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با اضافه شدن نویز به بردارهای صوتی در ۲۰ مرتبه تکرار حلقه، الگوریتم در ۴ مرتبه توانایی پیدا کردن اختلاف زمان دریافتی و در نتیجه پیدا کردن مختصات را بر اساس نویز اعمال شده ندارد و در ۱۶ مرتبه اختلاف زمانی را برای بردار صوتی تخمین می‌زند. نتیجه‌های حاصل از موقعیت‌یابی بر اساس این اختلاف‌های زمانی در روش‌های تقاطع هذلولی و مثلثاتی در جدول (۱) نشان داده شده است.

میزان میانگین خطای حاصل از وجود نویز یکسان در روش تقاطع هذلولی (۱۳/۴۲۰۵ درصد) بیش از میزان خطای روش مثلثاتی (۸/۹۱۱۶ درصد) است.

مقایسه نتیجه‌های این دو روش نشان می‌دهد که اضافه شدن نویز به سیستم، در مقدار  $r$  (برد)، چندین برابر  $\theta$  (جهت) خطا به وجود می‌آورد. از طرفی، میزان خطای به وجود آمده در تخمین راستای (زاویه) منبع صوت، نزدیک به صفر است و نتیجه‌های به دست آمده در هر دو روش بر هم منطبق هستند (شکل‌های ۸-۷).

میزان خطای به وجود آمده در نتیجه‌های این دو الگوریتم در میزان

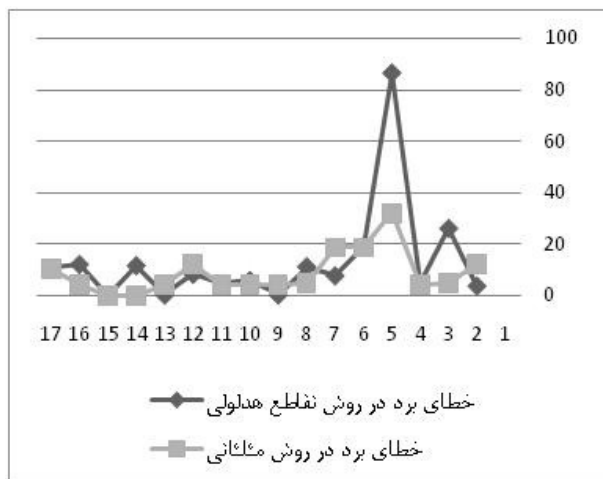


خطای حاصل از آن، مشخص شد که روش مثلثاتی حساسیت کمتری به وجود نویز نسبت به روش هیپرپولیک از خود نشان می‌دهد. برای بررسی تکرارپذیری نتیجه‌ها، نویز ورودی به صورت تصادفی و البته با نسبت سیگنال به نویز یکسان تولید شده و در ۲۰ مرتبه به الگوریتم وارد شده است. میانگین خطای حاصل از این نویز در روش هیپرپولیک (۱۳/۴۲۰۵ درصد) به مراتب بیشتر از میزان خطای روش مثلثاتی (۸/۹۱۱۶ درصد) است. هم‌چنین اضافه شدن نویز به سیستم، در مقدار ۲ (برد)، خطای بیشتری نسبت به  $\theta$  (راستا) به وجود می‌آورد. از طرفی میزان خطای به وجود آمده در تخمین راستای منبع صوت، نزدیک به صفر است (۰/۶ درصد) و هر دو روش مقاومت مناسبی به حفظ راستا از خود نشان می‌دهند.

میزان خطای راستا، در هر دو روش تقریباً با هم برابر است (۰/۶۸۵۱ درصد در روش هیپرپولیک و ۰/۶۶۳۷ درصد در روش مثلثاتی). در نهایت می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش مثلثاتی با وجود نویز نسبت به روش هیپرپولیک خطای کمتری از خود نشان می‌دهد و برای استفاده در شرایط واقعی مناسب‌تر است.

## ۸. مراجع

- [1] Staras, H.; Honickman, S. N. "The Accuracy of Vehicle Location by Trilateration in a Dense Urban Environment."; IEEE Transaction on Vehicular Technology 1972, 21, 38-44.
- [2] Turin, J. W. S.; Johnston, G. L. "Simulation of Urban Vehicle Monitoring Systems."; IEEE Transaction on Vehicular Technology 1972, 21, 9-16.
- [3] Hebert, M.; Drulhe, S. "Source Localization for Distributed Robotic Teams."; Robotics Institute of Carnegie Mellon University, 2002.
- [4] Dalton, B. C. "Audio-based Localization for Ubiquitous Sensor Networks."; Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [5] Chan, Y. T. "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location."; IEEE Trans. on Signal Processing, 1994, 42, 1905-1915.
- [6] Silverman, W. R. P. H. F.; Flanagan, J. L. "The Huge Microphone Array (hma)-part i."; IEEE Transactions on Concurrency 1998, 6, 36-46.
- [7] Silverman, W. R. P. H. F.; Flanagan, J. L. "The Huge Microphone Array (hma)-part ii."; IEEE Transactions on Concurrency 1999, 7, 32-47.
- [8] Minero, P. "State of the Art on Localization and Beam Forming of an Acoustic Source."; Summary of Localization Techniques, 2004.
- [9] Chan, Y. T.; Ho, K. C. "An Efficient Closed-form Localization Solution from Time Difference of Arrival Measurements."; IEEE, 1994, 2, 393-396.
- [10] Rabinkin, B. M. H. "A Dsp Implementation of Source Location Using Microphone Arrays."; Journal of Acoustical Society of America 1996, 2503-2529, 99.
- [11] Knapp, G. C.; Carter, C. H. "The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay."; IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing 1976, 24, 320-327.
- [12] Omologo, M.; Svaizer, P. "Acoustic Event Localization Using a Crosspower-Spectrum Phase Based Technique."; Proceeding of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'94) 1994, 2, 273-276.



شکل ۸. مقایسه عملکرد روش‌های تقاطع هذلولی و مثلثاتی در پیدا کردن برد منبع صوت با وجود خطای ناشی از نویز یکسان با  $SNR$  برابر ۱۰ محور افقی: تعداد آزمایش‌ها؛ محور عمودی: درصد خطای برد

جدول ۱. مقایسه نتیجه‌های حاصل از ۱۶ مرتبه موقعیت‌یابی در روش‌های تقاطع هذلولی و مثلثاتی

خطای زاویه $\theta$ در روش مثلثاتی (درصد)	خطای زاویه $\theta$ در روش تقاطع هذلولی (درصد)	خطای برد ۲ در روش مثلثاتی (درصد)	خطای برد ۲ در روش تقاطع هذلولی (درصد)	شماره آزمایش‌ها (داده‌ها)
۱/۱۶۸۰	۱/۲۰۸۱	۱۲/۳۴۷۶	۳/۹۱۱۷	۱
۱/۱۸۲۹	۱/۲۳۹۶	۵/۰۵۲۴	۲۶/۲۵۷۲	۲
۱/۱۷۵۲	۱/۱۸۱۶	۴/۴۹۴۵	۴/۶۳۲۹	۳
۱/۹۹۹۶	۲/۱۲۱۱	۳۲/۱۸۲۶	۸۶/۶۰۶۵	۴
۰/۳۸۷۱	۰/۳۸۹۳	۱۸/۹۴۰۵	۱۹/۲۹۹۱	۵
۰/۳۸۷۱	۰/۴۰۶۱	۱۸/۹۴۰۵	۷/۸۶۱۷	۶
۰/۳۹۴۳	۰/۴۰۲۱	۵/۰۱۷۴	۱۱/۳۵۶۰	۷
۰/۳۹۱۷	۰/۳۹۹۵	۴/۵۲۱۴	۰/۴۰۷۴	۸
۰/۳۹۱۷	۰/۴۰۵۱	۴/۵۲۱۴	۵/۹۹۳۱	۹
۰/۳۹۱۷	۰/۳۹۳۹	۴/۵۲۱۴	۴/۶۲۵۶	۱۰
۰/۳۸۹۳	۰/۳۹۷۱	۱۲/۳۶۸۷	۸/۴۶۸۸	۱۱
۰/۳۹۱۷	۰/۳۹۹۵	۴/۵۲۱۴	۰/۴۰۷۴	۱۲
۰/۷۸۶۰	۰/۸۱۲۷	۰/۰۱۵۳	۱۱/۸۰۶۵	۱۳
.	.	.	.	۱۴
۰/۳۹۱۷	۰/۴۱۰۷	۴/۵۲۱۴	۱۲/۲۲۹۱	۱۵
۰/۷۹۱۲	۰/۷۹۵۵	۱۰/۶۱۸۷	۱۰/۸۶۵۲	۱۶
۰/۶۶۳۷	۰/۶۸۵۱	۸/۹۱۱۶	۱۳/۴۲۰۵	میانگین خطا (درصد)

## ۷. نتیجه‌گیری

الگوریتم‌های موقعیت‌یابی صوتی به دنبال حل معادلات حاصل از شرایط هندسی و اختلاف زمانی ناشی از آن، با استفاده از خطی‌سازی، افزایش تعداد میکروفن‌ها و متقارن‌سازی هستند. برای استفاده از این روش‌ها در شرایط واقعی، باید حساسیت آن‌ها را نسبت به وجود نویز و اختلال بررسی نمود. با اضافه نمودن نویز به سیگنال ورودی در دو روش هیپرپولیک و مثلثاتی و بررسی میزان