



سید



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گزارش پروژه پایانی کارشناسی مهندسی برق

# مطالعه و پیاده سازی روش های مکان یابی منابع صوتی با استفاده از آرایه میکروفونی

علیرضا رنجکش ۹۱۲۳۰۰۳

اساتید راهنما:

دکتر احسان یزدیان      دکتر وحید غفاری نیا

شهریور ۹۵

## چکیده

امروزه مکان‌یابی با اهداف مختلف تجاری و غیرتجاری از قبیل سرویس‌های خدماتی و ارتباطات سیار و اهداف نظامی از جمله اهداف امنیتی و کاربردهای ناوبری و غیره به شدت مورد استفاده قرار گرفته است. حال در این بین مکان‌یابی منبع سیگنال صوتی با استفاده از آرایه‌های میکروفونی یکی از مسائل مهم در پردازش سیگنال و دریافت اطلاعات می باشد. در روش‌های رایج مکان‌یابی سیگنال‌های صوتی معمولاً از پارامترهای مختلفی نظیر توان سیگنال دریافت شده (RSS)، جهت سیگنال ورودی به آرایه میکروفونی (DOA) و اختلاف زمانی در دریافت سیگنال‌های ورودی به آرایه میکروفونی (TDOA) استفاده می کنند. الگوریتم استفاده شده در این پروژه، از جمله الگوریتم‌های دومرحله‌ای مبتنی بر به دست آوردن اختلاف زمانی رسیدن سیگنال صوتی به آرایه میکروفونی موجود یا (Time Differences Of TDOA Arrival) است. در این دسته الگوریتم‌ها در مرحله اول، اختلاف زمان رسیدن سیگنال‌های منبع صوتی به آرایه میکروفونی موجود محاسبه شده و سپس در مرحله دوم، با استفاده از اطلاعات مربوط به زمان تاخیر بین میکروفون‌ها، مکان منبع صوتی به دست می آید. در این پروژه ابتدا روش‌های مختلف مکان‌یابی بررسی و با استفاده از سه الگوریتم متفاوت مکان‌یابی منابع صوتی انجام شده و نتایج آن‌ها آرایه شده است.

**کلمات کلیدی:** مکان‌یابی منابع صوتی، پردازش آرایه‌ی میکروفونی، TDOA

## صفحه

## فهرست عناوین

۱	مقدمه ای بر مکانیابی منابع صوتی؛ ملزومات و کاربردها.....	۱
۱.۱	پردازش آرایه‌ای.....	۱
۲	روش‌های مختلف مکانیابی منابع صوتی.....	۴
2.1	توان سیگنال دریافت شده (RSS).....	۵
2.2	زاویه سیگنال ورود سیگنال (AOA).....	۵
2.3	اختلاف فرکانس ورود سیگنال (FDOA).....	۶
2.4	اختلاف زمان ورود سیگنال (TDOA).....	۶
2.5	مدل سیگنال دریافتی.....	۷
۶.۲	مکان‌یابی و شکل‌دهی پرتوها.....	۱۰
2.7	مکان‌یابی به روش الگوریتم MUSIC.....	۱۳
۱.۷.۲	توابع ریاضی الگوریتم MUSIC.....	۱۳
2.7.2	محاسبه ماتریس کوواریانس و تابع طیف توان الگوریتم MUSIC.....	۱۵
۸.۲	مکان‌یابی منبع صوتی به روش نقطه‌ای.....	۱۶
۳	شبیه‌سازی مکان‌یابی منابع صوتی.....	۱۹
۱.۳	تابع آماده‌سازی سیگنال‌ها.....	۲۰
۲.۳	تابع مکان‌یابی به روش نقطه‌ای.....	۲۱
3.3	تابع مکان‌یابی به روش الگوریتم MUSIC.....	۲۲
۴.۳	تابع مکان‌یابی به روش شکل‌دهی پرتوها.....	۲۲
۲۳	منابع و مراجع.....	۲۳

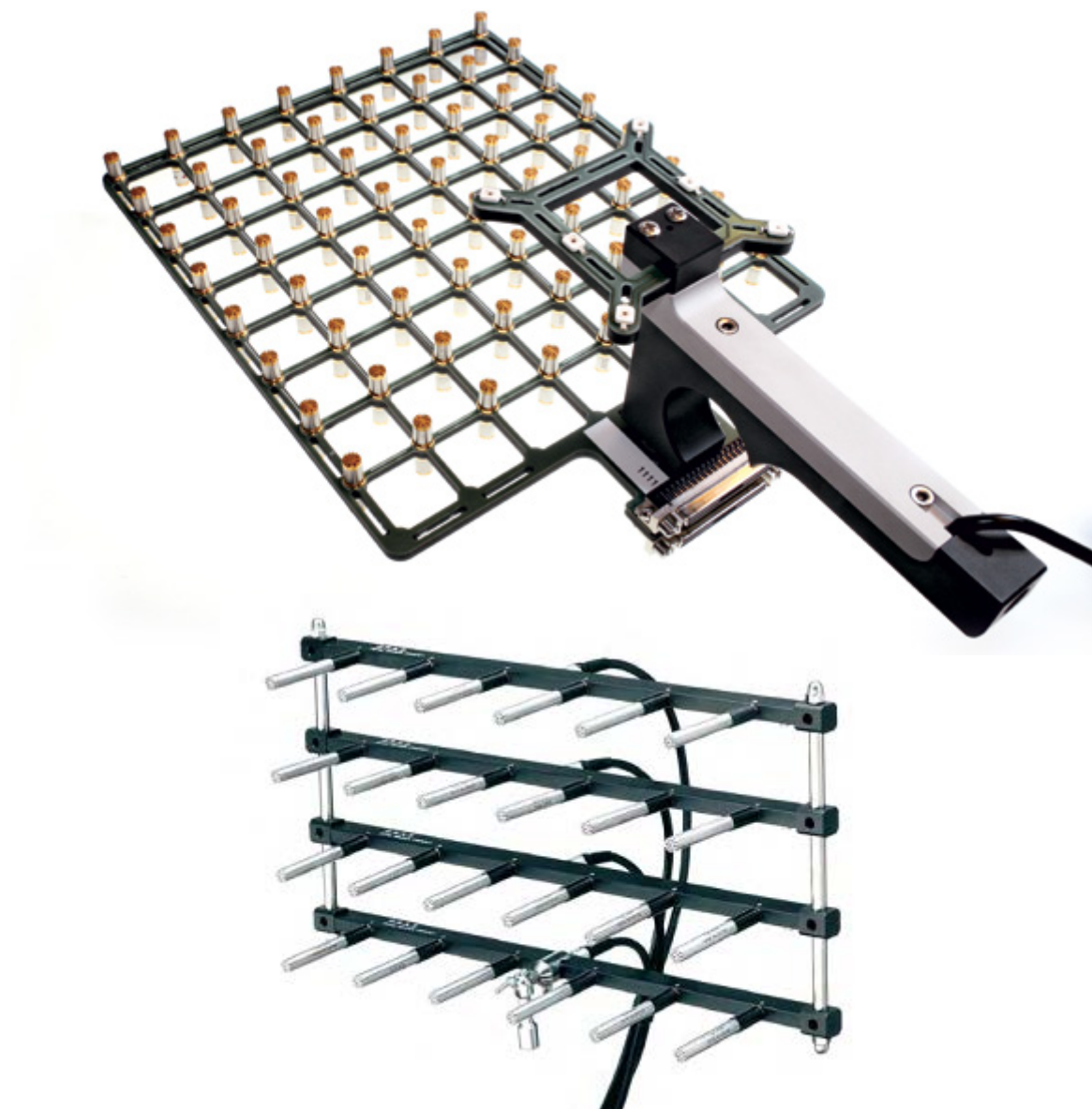
صفحه	فهرست اشکال
۲	شکل (۱) دو نمونه از آرایه‌های میکروفونی تجاری.....
۸	شکل (۲) سمت راست) مدل میدان دور سیگنال آرایه میکروفونی سمت چپ) مدل میدان نزدیک سیگنال آرایه میکروفونی.....
۱۱	شکل (۳) شکل دهی پرتو با وجود منابع اصلی و منابع مزاحم.....
۱۲	شکل (۴) بلوک دیاگرام از روش شکل دهی پرتو با الگوریتم DAS.....
۲۱	شکل (۵) خروجی روش مکان‌یابی به روش نقطه‌ای.....

## ۱ فصل اول:

### مقدمه ای بر مکانیابی منابع صوتی؛ ملزومات و کاربردها

به هر تعدادی میکروفون تمام جهته یا در جهتی خاص اطلاعات را به صورت هماهنگ باهم از محیط اطراف دریافت کنند، آرایه میکروفونی می‌گوییم. یک آرایه میکروفونی شامل تعدادی میکروفون قرار گرفته به صورتی مشخص در فضا است که با کمک یک وسیله پردازشی مثلاً کامپیوتر، اطلاعات هر میکروفون را به صورت سنکرون دریافت و پردازش کند. پردازش سیگنال‌های صوتی موجود در محیط به وسیله آرایه‌ی میکروفونی توجه ویژه‌ای را به خود معطوف کرده است، هرچند استفاده از سیستم‌های سونار در مکان‌یابی زیردریای استفاده‌های بیشتری دارد. در حالی که استفاده از آرایه میکروفونی برای کاربردهای نظامی، مانند مکان‌یابی و یا شناسایی وسایل نقلیه، هلیکوپتر، تک تیرانداز و غیره به اثبات رسیده است، اما شاید موفقیت بیشتر این سیستم‌ها طبق آمار در کاربردهای صنعتی و تجاری به ویژه مواردی که مربوط به بهبود گفتار یا افزایش دقت مکان‌یابی است، باشد. به عنوان مثال، توانایی آرایه میکروفونی برای قراردادن یک منبع صوتی مانند یک سخنران، استخراج یک سیگنال صوتی در یک محیط پر سرو صدا و پرنعکاس و یا سنتز زمینه‌های مختلفی صدایی به استفاده از آنها در سیستم‌های ویدئو کنفرانس پیشرفته، سیستم‌های ارتباطی "هندزفری"<sup>۱</sup>، مراقبت از فعالیت‌های مجرمانه و

شبه سازی آکوستیک سالن های کنسرت برای اطلاع از درستی کارکرد منابع صوتی، منجر شده است.



شکل (۱) دو نمونه از آرایه های میکروفونی تجاری

## ۱.۱ پردازش آرایه ای

امروزه پردازش سیگنال های آرایه ای نقش مهمی در کاربردهای متنوع صنعتی، تجاری و نظامی دارند. اکثر سیستم های راداری و سوناری پیشرفته از آرایه هایی شامل آنتن ها یا میکروفون ها به عنوان یک



بخش اساسی سیستم بهره می برند. در سیستم های مخابراتی و بی سیم فراوانی از آرایه های افقی یا آنتن های چند پرتویی برای دستیابی به ظرفیت مطلوب سیستم استفاده می کنند. در لرزه نگاری، برای کشف منابع نفت، آشکارسازی آزمایش های هسته ای زیرزمینی و بعضی از روش های تشخیص پزشکی و درمانی از آرایه ها استفاده می گردد. با توجه به روند رو به رشد کاربردهای پردازش سیگنال های آرایه ای اهمیت این موضوع بیش از گذشته نمایان شده است.

در پردازش آرایه ای چهار فرض مهم و اساسی وجود دارد. فرض اول این است که در یک محیط همسانگرد و غیرپراکنده انتشار امواج به صورت یکنواخت و در تمامی جهات وجود دارد. فرض دوم این است که برای پردازش آرایه ای با فرض میدان دور، شعاع انتشار امواج بسیار بیشتر از اندازه المان آرایه است و انتشار موج به صورت تخت وجود دارد. فرض سوم این است که سیگنال اصلی و سیگنال نویز محیط دارای میانگین صفر هستند و بین آنها ناهمبستگی وجود دارد. در نهایت، آخرین فرض بر این است که بین سیگنال ها کوپلینگی وجود نداشته باشد و اصطلاحاً کالیبراسیون دقیق باشد.

هدف نهایی پردازش آرایه ای حسگرها آنتن ها یا میکروفون ها، تخمین مقادیر پارامترهایی با استفاده از اطلاعات موجود زمانی و مکانی، جمع آوری شده از طریق نمونه برداری از امواج با مجموعه ای از آنتن ها یا میکروفون هایی که یک ترکیب هندسی دقیقی داشته باشند، است. پردازش مجموعه ای از داده ها و اطلاعات تحت این فرض که امواج محیطی که توسط تعدادی متناهی از منابع سیگنال تولید و حاوی اطلاعاتی در مورد پارامترهای سیگنال مشخص و قابل ادراک برای سیستم آرایه ای موجود است، انجام می شود. پردازش سیگنال های آرایه ای دارای کاربردهای گسترده ای است که در ادامه به صورت تیتروار به بیان آن ها پرداخته شده است. برای منابع بیشتر به [1] مراجعه شود.

سیستم های راداری و سونار

سیستم های مخابراتی وایرلس

سیستم های پیشرفته مهندسی پزشکی

پردازش های صوتی برای تشخیص گفتار و مکان یابی منابع

پردازش های آرایه ای نجومی با آرایه ای از تلسکوپ ها و ...

## ۲ فصل دوم:

### روش‌های مختلف مکان‌یابی منابع صوتی

در مبحث مکان‌یابی منابع صوتی روش‌های مختلف و متفاوتی وجود دارد که در روش‌های رایج معمولاً از پارامترهای مختلفی نظیر، توان سیگنال صوتی دریافت شده (RSS)، زاویه سیگنال ورودی (AOA) به آنتن‌های صوتی یا همان میکروفون‌ها، اختلاف زمانی در دریافت سیگنال‌ها (TDOA)، زاویه ورود سیگنال (AOA)، اختلاف فرکانسی در دریافت سیگنال‌ها (FDOA) و موارد متعدد دیگری نیز وجود دارند. در این فصل، ابتدا به بیان این روش‌های مختلف مکان‌یابی پرداخته و آن‌ها را به صورت ضمنی با هم مقایسه کرده، سپس با معرفی مدل سیگنال دریافتی آرایه میکروفونی، سه روش تحلیلی مکان‌یابی، که هر سه آن‌ها براساس مکان‌یابی به روش اختلاف زمانی در دریافت سیگنال‌هاست (TDOA)، به اجمال بررسی شده‌اند.

## ۱.۲ توان سیگنال دریافت شده (RSS)

روش‌های مبتنی بر اختلاف زمانی دریافت سیگنال دارای معایب مختلفی نیز می‌باشند. عیب این گونه روش‌ها نیاز به نصب آنتن‌های آرایه‌ای در بوده که گاهی باعث ایجاد هزینه‌هایی خواهد بود. الگوریتم موقعیت‌یابی تشخیص الگو مبتنی بر توان دریافتی، از اطلاعات توان فرستنده، تلفات محیط و توان سیگنال دریافت شده برای اندازه‌گیری فاصله گیرنده از فرستنده استفاده می‌کند. این روش نسبت به سایر الگوریتم‌های مبتنی بر اختلاف زمانی با اینکه از محوشدگی (Fading) تاثیرپذیری بالایی دارد اما دقت مناسبی داشته و از سادگی پیاده‌سازی نیز بهره می‌برد. به همین جهت، می‌تواند الزامات موردنیاز به منظور پیاده‌سازی تعداد زیادی از سرویس‌های مبتنی بر موقعیت را فراهم نماید. اما برای پیاده‌سازی در ابعاد کوچکتر و با دقت بالاتر به هیچ عنوان نمی‌تواند بر الگوریتم‌های مبتنی بر اختلاف زمانی غلبه کند.

## ۲.۲ زاویه سیگنال ورود سیگنال (AOA)

این روش بوسیله یک میکروفون تنظیم شده در یک جهت<sup>۲</sup> و یا یک اندازه‌گیری کاهنده با بکاربری چندین تغذیه از میکروفون‌ها انجام می‌شود. برای موقعیت‌یابی یک فرستنده یا منبع صوتی به روش AOA می‌توان تنها از یک بیم<sup>۱</sup> استفاده کرد. بعد از تعیین دقیق زاویه، می‌توان موقعیت منبع صوتی را از تقاطع خط مرکزی بیم میکروفون با سطح مقطع منبع صوتی بدست آورد.

اگرچه این روش یک راه‌حل عملی برای مکان‌یابی منابع صوتی به‌شمار می‌رود، نقاط ضعفی نیز دارد. برای حدس دقیق AOA نیاز است سیگنال‌هایی که از منبع به آرایه‌های میکروفونی می‌رسند حتماً از جهت خط دید<sup>۳</sup> حرکت کنند؛ ولی در سیستم تلفن‌های همراه این اتفاق معمول نیست. چرا که این سیستم‌ها ممکن است در کانال‌های بسیار تاریکی حرکت کنند. به طور مثال سیگنال‌های در حال عبور از ناحیه شهری دچار چنین مشکلی خواهند شد. از دیگر معایب این روش الگوریتم نسبتاً پیچیده‌ای است که برای آن بکار می‌رود. دلیل

<sup>۱</sup> Directional

<sup>۲</sup> Line-Of-Sight (LOS)

پیچیدگی الگوریتم‌های روش AOA، نیاز به اندازه‌گیری، ذخیره‌سازی و استفاده از داده‌های آرایه‌ای کالیبراسیون و ماهیت محاسباتی فشرده آنها می‌باشد.

## ۳.۲ اختلاف فرکانس ورود سیگنال (FDOA)

اندازه‌گیریهای FDOA به حداقل دو بیم دریافتی نیاز دارد. همچنین نیاز است سرعت نسبی بین پرتوها به حد کافی زیاد باشد تا اختلاف شیفتهای دوپلر<sup>۴</sup> دو سیگنال دریافتی به طور قابل ملاحظه‌ای از خطای اندازه‌گیری فرکانس بیشتر باشد. به دلایل مطرح شده، این روش از جمله کم‌کاربردترین روش‌های مکان‌یابی منابع صوتی به شمار می‌رود.

## ۴.۲ اختلاف زمان ورود سیگنال (TDOA)

روش کلاسیک تخمین TDOA برای محاسبه همبستگی و اختلاف زمانی بین سیگنال‌هایی که از منابع صوتی به آرایه میکروفونی می‌رسند، استفاده می‌شود. تخمین این روش به عنوان تاخیر محاسبه می‌شود. این تاخیر تابع همبستگی را بیشینه می‌سازد. تابع همبستگی به منظور تعیین زمانی از آرایه میکروفونی که سیگنال صوتی به آن زودتر می‌رسد نیز استفاده می‌شود. از این اطلاعات یک منحنی مکانی هذلولوی بدست می‌آید. با حل دو محادله منحنی هذلولوی می‌توان موقعیت منبع صوتی را تعیین نمود.

یکی از ملزومات این روش سنکرون بودن اطلاعاتی دریافتی و سیگنال‌ها توسط میکروفون‌ها و نحوه ورود آنها به قسمت پردازش می‌باشد. بدین ترتیب تخمین‌های TDOA پایه زمانی مشترکی خواهند داشت. در این روش، برای تعیین موقعیت یک منبع صوتی در صفحه، حداقل به سه میکروفون آرایه‌ای نیاز داریم. از مزیت‌های زیاد این روش در برابر دیگر روش‌های رقیبش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

<sup>۴</sup> Doppler

✓ به دلیل استفاده از میکروفون‌های آرایه‌ای، دیگر نیازی به استفاده از میکروفون‌های یک‌جهته نبوده و می‌توان از میکروفون‌های تمام‌جهته ۵ استفاده کرد، که باعث مقرون به صرفه بودن نسبت به روش AOA می‌شود.

✓ با بکارگیری روش TDOA و در صورتی که منبع بازتاب‌های سیگنال اصلی (منابع صوتی تداخلی) به آرایه میکروفونی نزدیک باشد، مقداری از آسیب پذیری سیستم در برابر خطاهای زمانی کاسته می‌شود. و همچنین اگر منبع صوتی اصلی بر اجزاء سیگنال در حال حرکت به سمت آرایه تاثیر گذارد، در عمل جبری اختلاف‌گیری زمانی، خطای زمانی کاسته شده و یا کاملاً از بین می‌رود.

✓ به دلیل اینکه در این روش از اختلاف زمانی سیگنال‌ها استفاده می‌شود، دامنه سیگنال دریافتی تاثیر چندانی در پاسخ‌دهی سیستم نداشته یا به عبارت دیگر اگر دامنه سیگنال دریافتی از حداقل دامنه لازم برای آرایه میکروفونی بیشتر باشد، قابل تشخیص و مکان‌یابی است و اختلاف دامنه سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون‌ها تاثیری بر پاسخ نهایی نخواهد داشت؛ این مزیت اصلی این نوع مکان‌یابی بر مکان‌یابی به روش RSS است.

بنابراین روش TDOA در کاربردهایی که اجزا سیگنال در دید مستقیم وجود نداشته باشد یا دامنه سیگنال‌های ارسالی متفاوت یا بسیار نزدیک به هم باشد یا منابع صوتی دارای حرکت اندکی به سمت آرایه میکروفونی باشد، با دقت خوبی کار می‌کند و از بقیه روش‌ها قوی تر است. [2]

## ۵.۲ مدل سیگنال دریافتی

سیگنال  $s$  که توسط منبع در محیط منتشر می‌شود را یک فرایند اتفاقی ایستا و توأما گوسی با میانگین صفر و ماتریس کواریانس  $R_s$  در نظر می‌گیریم. درحقیقت سیگنال  $s$  مد نظر ما نمونه‌ی سیگنال ارسالی از منبع می‌باشد که توسط المان‌های آرایه‌ی دریافت شده است. در این صورت  $s$  یک بردار و  $R_s$  که در ادامه محاسبه شده به صورت یک ماتریس خواهد بود

با فرض باند باریک بودن سیگنال  $s$  نمایش باند پایه‌ی نمونه‌ی  $l$  ام سیگنال دریافت شده توسط المان‌های آرایه را به صورت زیر بیان می‌کنیم:

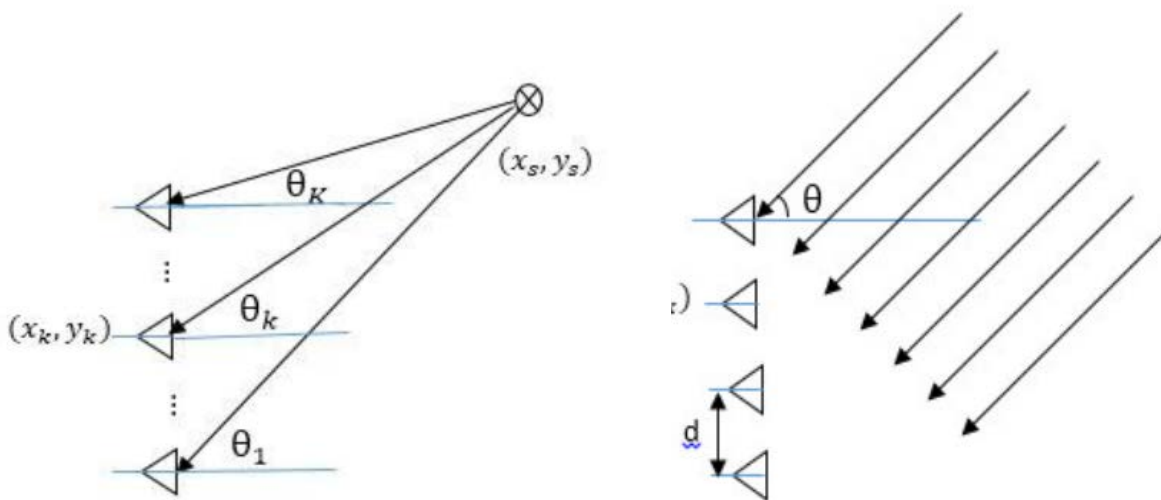
$$R_s = E\{ss^h\}$$

$$Z(l) = as(l) + n(l) \quad l=1, \dots, P$$

که در رابطه‌ی فوق  $s(l)$  نشانگر  $l$  امین نمونه‌ی از سیگنال باند باریک ارسالی توسط منبع است و بردار  $n(l)$  با ابعاد  $1 \times K$  نشانگر نمونه‌ی  $l$  ام نویز گوسی جمع‌شونده در المان‌های آرایه است، فرض می‌کنیم  $K$  تعداد المان‌های آرایه است. بردار  $\alpha$  بردار هدایت آرایه نامیده می‌شود. بردار  $\alpha$  برای سیگنال میدان دور و آنتن آرایه‌ای خطی یکنواخت (ULA) مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد.  $\theta$  زاویه‌ی ورودی به آنتن است و  $C$  نشانگر سرعت انتشار سیگنال در محیط می‌باشد.  $\omega_c$  فرکانس موج منتشر از منبع سیگنال شده است.

$$\alpha(\theta) = [1 \ e^{j\omega_c \tau} \dots e^{j\omega_c (T-1)\tau}]^T$$

$$\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c}$$



شکل ۲) سمت راست) مدل میدان دور سیگنال آرایه میکروفونی

سمت چپ) مدل میدان نزدیک سیگنال آرایه میکروفونی

$(x_l, y_l)$  نشانگر محل آنتن و  $(x, y)$  نشان‌دهنده‌ی محل منبع سیگنال است.  $C$  نیز نشان‌دهنده‌ی سرعت انتشار سیگنال در محیط است. ماتریس کواریانس سیگنال دریافت شده توسط آرایه را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم

$$R_z = E\{ZZ^H\} = a(x, y)R_s a^H(x, y) + R_n$$

که در این رابطه  $R_n = E\{NN^H\}$ .

در روابط فوق عملگر  $E$  نشانگر عملیات میانگین‌گیری است و ماتریس  $N$  مجموعه‌ای از نمونه‌های نویز دریافت شده در در المانهای آرایه است.

$$N = [\underline{n}(1), \underline{n}(2), \dots, \underline{n}(P)]_{K \times P}$$

در نمایش فوق  $K$  نشانگر تعداد آنتن‌ها و  $P$  نشانگر تعداد نمونه‌های سیگنال است. از آنجایی که نویز را به صورت سفید و ناهمبسته در نظر گرفته‌ایم می‌توان معادله (۷) را به صورت زیر باز نویسی کنیم

$$R_z = E\{ZZ^H\} = a(x, y)R_s a^H(x, y) + \sigma_n^2 I$$

در رابطه‌ی فوق  $I$  ماتریس واحد با ابعاد  $K \times K$  است و  $\sigma_n^2$  واریانس نویز می‌باشد. درعمل معمولاً تخمین ماتریس کواریانس از اطلاعات دریافتی آرایه به صورت زیر بدست می‌آید

$$R_z = \frac{1}{P} ZZ^H$$

در روابط فوق ماتریس  $Z$  مجموعه‌ای از اطلاعات دریافت شده توسط آنتن‌ها را نشان می‌دهد. [3]

$$\begin{aligned} Z &= \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \dots & Z_{1,P} \\ Z_{2,1} & Z_{2,2} & \dots & Z_{2,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{K,1} & Z_{K,2} & \dots & Z_{K,P} \end{bmatrix}_{K \times P} \\ &= [z(1), \dots, z(P-1)]_{K \times P} \end{aligned}$$

## ۶.۲ مکان‌یابی و شکل‌دهی پرتوها<sup>۶</sup>

در نگاه اول به سیگنال گرفته شده از میکروفون‌های موجود، می‌توان گفت که میکروفون‌ها از جمله میکروفون‌های تمام جهته هستند، به این معنا که سیگنال‌های دریافتی از تمام جهتها را با یک بهره یکسان تقویت می‌کنند. سیگنال دریافتی از میکروفون‌ها مجموعی از نویز، سیگنال امواج منابع تداخلی و سیگنال اصلی اطلاعات می‌باشد که اغلب این سیگنال‌ها از جهتهای مختلف به میکروفون ورود می‌کنند. واضح است که با تمرکز اصلی جهت میکروفون‌ها در جهت منبع سیگنال و تغییر این بهره‌های یکسان در جهتهای مختلف می‌توان کیفیت سیگنال اطلاعات دریافتی را افزایش داد، یا بطور معادل باعث افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR)<sup>۷</sup> سیستم شد. تمرکز سیگنال دریافتی برای جهت دلخواه، با تغییر در بهره سیگنال در جهتهای مختلف موضوع اصلی مبحث شکل‌دهی پرتوهاست. برای دستیابی به قابلیت انتخاب مکانی منبع اصلی و منابع مزاحم (از جمله نویز و منابع تداخلی) و کاهش ضریب تقویت سیگنال از سالی از سمت منابع مزاحم، سیستم شکل‌دهی پرتو باید توانایی تشخیص اجزایی از سیگنال که از جهات مختلف وارد شده‌اند را داشته باشد. برای آنالیز سیگنال دریافتی و تشخیص این امر، در سیستم‌های شکل‌دهی پرتو باید حتماً از آرایه میکروفونی استفاده کرد.

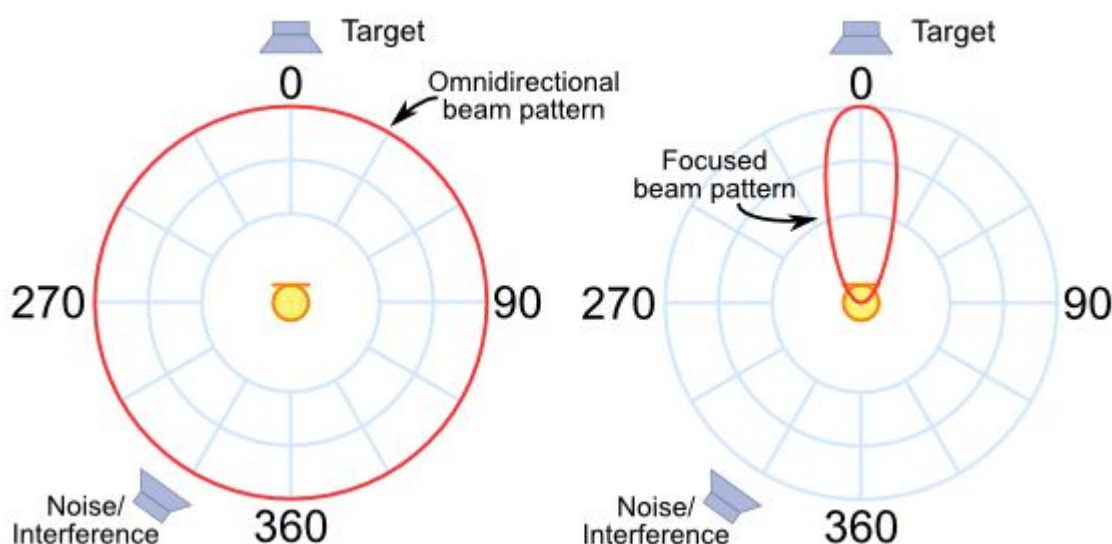
فرض کنید که سیستم از  $N$  عدد میکروفون تمام‌جهته با فاصله مکانی  $d$  تشکیل شده باشد. زمانی که سیستم آرایه میکروفونی سیگنالی را در جهت مشخص دریافت می‌کند، این سیگنال به دلیل اختلاف راه، با اختلاف زمانی‌های متفاوت و افزاینده به میکروفون‌ها می‌رسد. طبق فرمول آرایه شده در قسمت مدل سیگنال دریافتی، اگر این اختلاف زمانی‌ها را بصورت میدان دور در نظر بگیریم، داریم:

$$\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c}$$

<sup>۶</sup> Beamforming<sup>۷</sup> Signal Noise Ratio



حال اگر اختلاف زمانی و بالطبع زاویه ورود سیگنال به میکروفون‌ها مشخص باشد، وظیفه اصلی سیستم شکل‌دهی پرتو آغاز و سیگنال ارسالی در جهت مطلوب را با ضریب بهره بزرگ‌تر و سیگنال‌های مزاحم را با تقویت کمتر، به اصطلاح فیلتر می‌کند. روش‌های متعددی برای شکل‌دهی پرتوها وجود دارد که در

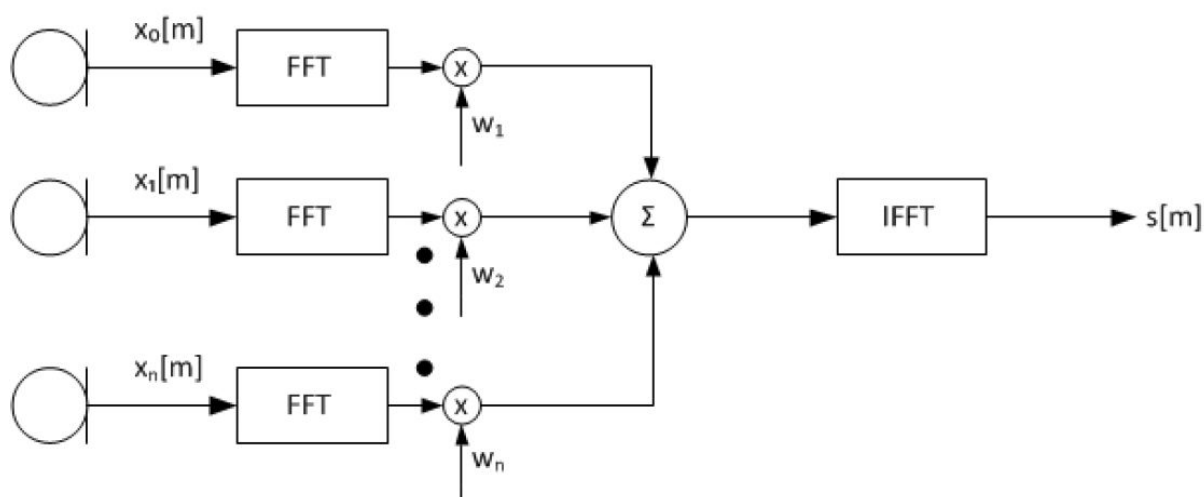


شکل ۳) شکل‌دهی پرتو با وجود منابع اصلی و منابع مزاحم

اینجا به ابتدایی‌ترین و مرسوم‌ترین آن‌ها یعنی سیستم شکل‌دهی پرتو به روش DAS<sup>۸</sup> می‌پردازیم.

این روش شکل‌دهی پرتو، با محاسبه اختلاف زمانی سیگنال‌های دریافتی از میکروفون‌ها، آن‌ها را به صورت برعکس به تمامی سیگنال‌های دریافتی از منبع صوتی به جز یکی از آن‌ها (به عنوان میکروفون مرجع) اعمال می‌کند؛ به عبارت دیگر تاخیر ناشی از دریافت سیگنال به تک‌تک میکروفون‌ها را محاسبه و تاخیر ناشی از سیگنال اول و دوم را به سیگنال میکروفون آخر و تاخیر ناشی از سیگنال اول و سوم را به میکروفون ماقبلا آخر و به همین روش تا انتها تاخیرها را سیگنال‌ها اعمال می‌کند. واضح است که تاخیری به سیگنال ورودی میکروفون اول اعمال نخواهد شد و سیگنال آن و خود میکروفون به عنوان سیگنال و میکروفون مرجع انتخاب می‌شوند. برای تغییر میکروفون مرجع می‌توان همین اعمال را با یکی دیگر از سیگنال میکروفون‌ها انجام داد. حال با اعمال این

تاخیرها، در صورت جمع کردن سیگنال‌ها، آن‌ها بصورت تداخلات سازنده با هم جمع شده، بدین معنا که سیگنال ارسالی از منبع هدف به صورت تقویت شده و سیگنال ارسالی از منابع مزاحم به صورت ضعیف شده قرار خواهند گرفت. حال به دلیل اینکه تاخیر بین سیگنال میکروفون‌ها معمولاً از اعداد ضرایب غیر صحیحی از نرخ نمونه‌برداری می‌باشد، تاخیر اعمالی به سیگنال‌ها به جای اعمال در حوزه زمان، بصورت شیفت فاز در حوزه فرکانس اعمال خواهد شد. در شکل زیر بلوک دیاگرامی از این روش برای  $N$  میکروفون بصورت نمادین ارائه شده است.



شکل ۴) بلوک دیاگرام از روش شکل دهی پرتو با الگوریتم DAS

با استنباط از شکل می‌توان گفت که سیگنال خروجی میکروفون‌ها که با  $x_n$  نمایش داده می‌شود، ابتدا با اعمال تبدیل فوریه به حوزه فرکانس برده شده و در حوزه فرکانس شیفت فاز لازم اعمال می‌شود. ضمناً برای جلوگیری از بزرگ شدن بیش از حد سیگنال حاصل جمع، قبلاً از جمع کردن، تمامی آن‌ها در یک ضریب تضعیف  $w_1 = w_2 = \dots = w_n = 1/N$  ضرب می‌شود. سپس سیگنال‌ها با یکدیگر به علاوه شده و در نهایت از سیگنال حاصله، عکس تبدیل فوریه گرفته می‌شود. سیگنال خروجی این الگوریتم دارای بیشترین مقدار در مکان مربوط به منبع صوتی هدف می‌باشد و از آن برای مکان‌یابی می‌توان استفاده کرد. [4]

## ۷.۲ مکان‌یابی به روش الگوریتم MUSIC<sup>۹</sup>

مکان‌یابی منابع صوتی به روش الگوریتم MUSIC یکی از پرکاربردترین روش‌های مکان‌یابی منابع صوتی به شمار می‌رود. اساس این الگوریتم بر تفکیک زیر فضای سیگنال از زیر فضای نویز است. در ادامه این قسمت ابتدا بحثی ریاضی پیرامون الگوریتم ارائه شده و در نهایت پس از آماده‌سازی توابع ریاضی و کوواریانس، الگوریتم موردنظر به تفسیر بیان خواهد شد.

### ۱.۷.۲ توابع ریاضی الگوریتم MUSIC

فرض کنیم که فضایی ۳ بعدی در عدم حضور اختلالات صوتی همگن و ایزوتروپیک وجود دارد و فرضیه‌های صوتی خطی برقرار باشد. به تعداد  $D$  منبع صوتی پایدار با متوسط صفر و مستقل از مکان به این محیط اعمال می‌شود. میدان امواج صوتی ایجاد شده، توسط آرایه‌ای از  $N$  میکروفون همه‌جهته نمونه برداری می‌شود. هر منبع  $d$  که  $d = 1, \dots, D$  است، توسط بردارهای محیط کروی  $r_d = (r_d, \theta_d, \phi_d)$  در محیط  $F = (O, x, y, z)$  نشان داده می‌شود. سرعت انتشار موج صوتی ثابت و برابر با  $c = 340 \text{ m.s}^{-1}$  فرض شده است.

سیگنال ترکیبی دریافتی در ناحیه  $F$  نیز مجموع  $x_d(t)$  ناشی از هر منبع می‌باشد. در مورد منابع باند باریک یاد شده، هر  $s_d(t) = S_d(k)e^{2j\pi ft} = S_d(k)e^{jkct}$  با  $f$  و  $k = \frac{2\pi f}{c}$ ، به عنوان فرکانس و زمان گذر مشترک منابع، خوانده می‌شود. بردار  $S(k) = (S_1(k), \dots, S_D(k))^T$  تعریف می‌شود. پوش ترکیبی  $X_n(k)$  برای سیگنال‌های  $x_n(t)$  که در یک آرایه دریافت می‌شود در بردار  $X(k) = (X_1(k), \dots, X_N(k))^T$  جمع شده، در نتیجه داریم:

$$\underline{V}(r_1, r_2, \dots, r_D, k) = (v(r_1, k) | \dots | v(r_D, k)) \quad \text{که} \quad X(k) = \underline{V}(r_1, r_2, \dots, r_D, k)S(k) + B(k)$$

ماتریس  $N \times D$  با بردارهای  $V$  ساخته می‌شود و  $B(k) = (B_1(k), \dots, B_N(k))^T$  نویز جمع‌شونده بر روی میکروفون‌ها است. این نویز پایدار، با متوسط صفر و با توان برابر روی هر میکروفون و منابع مستقل فرض می‌شود، بنابراین:

$$E[B(VS)^H] = 0 \text{ و } E[BB^H] = \sigma_N^2 I_N$$

$n$ امین ورودی هر بردار  $V$  با  $\mathbf{r} = (r, \theta, k)$ ، بردار ساخته شده در مختصات کروی، به فرم  $V_n(r, \theta, k)$

$$V_n(r, \theta, k) = re^{jkr} \frac{e^{-jk\sqrt{r^2 + z_n^2 - 2rz_n \cos \theta}}}{\sqrt{r^2 + z_n^2 - 2rz_n \cos \theta}}$$

تبدیل می‌شود که

اگر  $r = \|\mathbf{r}\|$  به سمت  $+\infty$  میل کند،  $V$  به صورت بردار میدان دور  $V^\infty(\theta, k)$  خواهد رفت و داریم:

$$V_n^\infty(\theta, k) = \lim_{r \rightarrow \infty} V_n(r, \theta, k) = e^{jkrz_n \cos \theta}$$

در واقع  $V$  می‌تواند با  $V^\infty$  تقریب زده شود در صورتی که  $r$  به فاصله رابلی  $R = 2L_0^2 / \lambda$  رسد که  $L_0$  طول آرایه میکروفونی و  $\lambda = c / f = 2\pi / k$  طول موج سیگنال ورودی می‌باشد.

الگوریتم MUSIC شامل راه‌حلی کارآمد برای مسئله محاسبه تعداد منابع  $D$  و شعاع و زاویه محوری  $(r_d, \theta_d)$  می‌باشد. MUSIC بر اساس تجزیه کوواریانس ماتریس  $C_x = E[XX^H]$  کار می‌کند که داریم:

$$\underline{C}_x = \underline{V}(r_1, r_2, \dots, r_D) \underline{C}_s \underline{V}^H(r_1, r_2, \dots, r_D) + \sigma_N^2 I_N$$

که در رابطه فوق،  $C_s = E[SS^H]$ ، ماتریس  $D \times D$  کوواریانس منابع  $C_B = E[BB^H]$  ماتریس کوواریانس نویز

است. حال ماتریس  $N \times N$  روبرو یعنی  $\underline{C}_y = \underline{V}(r_1, r_2, \dots, r_D) \underline{C}_s \underline{V}^H(r_1, r_2, \dots, r_D)$

تقارن هرمیتی داشته و نیمه معین مثبت بوده لذا  $N$  مقدار ویژه حقیقی و غیر منفی  $\lambda_n$  مربوط به بردارهای ویژه متعامد  $U_n$  وجود دارد. از آن‌جا که منابع مستقل از یکدیگر فرض می‌شوند و  $V(r_1, \dots, r_D)$  با هر مقداری از  $r$ ، دارای رتبه کامل ۱۰ می‌باشد،  $C_y$  درجه  $D$  را دارد لذا مقادیر ویژه آن می‌تواند مانند  $U_1, \dots, U_D$  تمام گستره‌ی  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_D \geq \lambda_{D+1} = \dots = \lambda_N = 0$  ترتیب‌بندی شوند. توجه شود که بردارهای  $U_1, \dots, U_D$  تمام گستره‌ی

$V(r_1, \dots, r_D)$  را در برمی‌گیرد، به این معنی که فضای  $D$  بعدی  $s$  از  $C^N$  توسط بردار هادی تولید شده، در موقعیت منابع بررسی شده و از آن پس "زیرفضای سیگنال" نامیده می‌شود. حال می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\underline{\mathbf{C}}_X = (\underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{D}} \mid \underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}}) \begin{pmatrix} \lambda_1 + \sigma_{\mathcal{N}}^2 & \underline{\mathbf{0}} & | & \\ & \ddots & | & \underline{\mathbf{0}} \\ & & \lambda_D + \sigma_{\mathcal{N}}^2 & | & \underline{\mathbf{0}} \\ - & \underline{\mathbf{0}} & - & | & \sigma_{\mathcal{N}}^2 \underline{\mathbf{I}}_{N-D} \end{pmatrix} (\underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{D}} \mid \underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}})^H$$

که در رابطه فوق،

✓ ماتریس  $\underline{\mathbf{U}}_{\phi} = (U_1 \mid \dots \mid U_D) \in \Re^{N \times D}$  ماتریس بردار ویژه یادشده با مقادیر ویژه  $\lambda_n + \sigma_{\mathcal{N}}^2$  بوده و زیرفضای سیگنال را تولید می‌کند.

✓ ماتریس  $\underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}} = (U_{D+1} \mid \dots \mid U_N) \in \Re^{N \times (N-D)}$  ماتریس بردار ویژه باقی‌مانده با مقادیر ویژه  $\sigma_{\mathcal{N}}^2$  می‌باشد که گستره‌ی آن زیرفضای نویز نام دارد. به یاد داشته باشید که  $(\underline{\mathbf{U}}_{\phi} \mid \underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}})^H (\underline{\mathbf{U}}_{\phi} \mid \underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}}) = \mathbf{I}_N$ .

در نتیجه تحت فرضیه‌های آماری ذکر شده، زمانی که کواریانس ماتریس  $\underline{\mathbf{C}}_X$  به طور دقیق محاسبه شود، رابطه ماتریسی داده شده در فوق می‌تواند بازسازی تعدادی از منابع - که  $N$  حداقل تعداد تکرار  $\sigma_{\mathcal{N}}^2$  می‌باشد - و موقعیت منابع را برای بردارهای هدایت مربوطه آن‌ها که با  $\underline{\mathbf{U}}_{\mathcal{N}}$  متعامد هستند، فراهم سازد.

## ۲.۷.۲ محاسبه ماتریس کواریانس و تابع طیف توان الگوریتم MUSIC

در عمل، به دلیل اینکه تنها یک رکورد زمان  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_N(t))^T$  در دسترس است، توانایی تعیین دقیق  $\underline{\mathbf{C}}_X$  وجود ندارد. علاوه بر آن، بردار پوش ترکیبی  $X(k)$  نمی‌تواند به طور دقیق محاسبه شود. لذا این مقادیر نیاز به تقریب دارند. روش معمول آن شامل محاسبات این تقریب‌ها در لحظه است. از یک سو،  $x(t)$  با برقراری شرایط تئوری شانون (نرخ برابر با  $L/T_0$ ) نمونه برداری می‌شود لذا در هر زمان  $t$ ،  $X(k)$  با  $\hat{X}_t(k)$  که خروجی تبدیل فوریه گسسته (DFT) نقطه‌ای به زمان‌های  $\{t(1 - \frac{L-1}{L}), \dots, t(1 - \frac{1}{L}), t\}$  تقریب زده می‌شود. از سوی دیگر  $\underline{\mathbf{C}}_X$ ، در زمان از رابطه زیر تقریب زده می‌شود. با وجود این که این عملیات تقریب در نگاه اول

بدیهی به نظر می‌رسد اما می‌تواند شروطی را روی عملکرد این روش قرار دهد، که در اینجا از این شرط‌ها صرف‌نظر شده است.

$$\hat{\underline{C}}_X = \frac{1}{W} \sum_{l=\frac{T_0}{T_0-(W-1)}}^{T_0} \hat{X}_{lT_0}(k) \hat{X}_{lT_0}^H(k)$$

حال همه چیز برای محاسبه تابع طیف توان الگوریتم آماده است. همان‌طور که گفته شد، بردار هادی  $V(r) = V(r, \theta, k)$  اگر و تنها اگر در موقعیت یک منبع بررسی شود با زیرفضای نویز متعامد می‌شود. بنابراین:

$$\forall (r, \theta) \in \{(r_1, \theta_1), (r_2, \theta_2), \dots, (r_D, \theta_D)\}, \quad \sum_{i=D+1}^N |V^H(r, \theta) U_i|^2 = V^H(r, \theta) \prod_N V(r, \theta) = 0$$

لذا موقعیت منابع صوتی با بیشینه شدن مقدار تابع طیف توان سیگنال زیر بدست خواهد آمد:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{V^H(r, \theta) \prod_N V(r, \theta)}$$

حال اگر بر اساس مدل سیگنال دریافتی و بردار هدایت ارائه در قسمت‌های قبل، تابع طیف توان سیگنال را براساس رابطه فوق بدست آوریم خواهیم داشت:

$$P_{MUSIC}(x, y) = \frac{1}{\alpha^H(r, \theta) E_n E_n^H \alpha(x, y)}$$

که همان‌طور که بیان شد،  $\alpha$  بردار هدایت و  $E_n$  بیانگر زیرفضای نویز دریافت شده است، که با بصورت عملی با محاسبه کوواریانس ماتریس زیرفضای نویز بدست می‌آید. [5]

## ۸.۲ مکان‌یابی منبع صوتی به روش نقطه‌ای

همانگونه که در تعریف TDOA یا همان اختلاف زمانی در دریافت سیگنال‌ها بیان شد، این روش برای مکان‌یابی منابع صوتی بسیار قدرتمند و دقیق کارایی دارد. در این قسمت روشی بر مبنای محاسبات ریاضی برای مکان‌یابی منابع صوتی به صورت نقطه‌ای (بدین معنا که خروجی  $x$  و  $y$  منبع سیگنال است) که در فاصله میدان نزدیک کارایی دارد، ارائه شده است. اساس این روش بر مبنای [6] است. ابتدا فرض می‌کنیم منبع

سیگنال صوتی در مختصات نامعلوم  $(x, y, z)$  قرار دارد. مکان آرایه‌ی میکروفونی نیز که شامل  $N$  میکروفون می‌باشد بصورت  $\{(x_m, y_m, z_m)\}_{m=1}^N$  اختیار می‌شود. اگر  $t_m$  را به عنوان مدت زمان رسیدن سیگنال از منبع صوتی به میکروفون  $m$  و  $c$  سرعت صوت در نظر گرفته شود،  $R_m = V_c t_m$  به عنوان فاصله منبع صوتی تا میکروفون  $m$  حاصل خواهد شد. حال اگر  $\tau_m = t_m - t_1$  را به عنوان اختلاف مدت زمان رسیدن سیگنال منبع به میکروفون  $m$  و میکروفون اول (میکروفون مرجع) در نظر گرفته شود داریم:

$$\tau_m = t_m - t_1 \rightarrow V_c \tau_m = V_c t_m - V_c t_1 = R_m - R_1$$

بنابراین با به توان رساندن و بردن تمامی عبارات در یک طرف مساوی داریم:

$$R_m^2 = (V_c \tau_m + R_1)^2 = V_c^2 \tau_m^2 + 2V_c \tau_m R_1 + R_1^2 \rightarrow V_c \tau_m + 2R_1 + \frac{R_1^2 - R_m^2}{V_c \tau_m} = 0$$

برای  $m = 2, 3, \dots, M$ . حال اگر همین رابطه را به ازای  $m = 2$  بدست آورده و از رابطه فوق کم کنیم به معادله اصلی محاسبه مکان منابع می‌رسیم:

$$\text{if } m = 2 \rightarrow V_c \tau_2 + 2R_1 + \frac{R_1^2 - R_2^2}{V_c \tau_2} = 0 \Rightarrow V_c \tau_m - V_c \tau_2 + \frac{R_1^2 - R_m^2}{V_c \tau_m} - \frac{R_1^2 - R_2^2}{V_c \tau_2} = 0$$

برای  $m = 3, 4, \dots, M$ . حال با جایگذاری  $R_m = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2}$  در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$R_m^2 = x_m^2 - 2x_m x + x^2 + y_m^2 - 2y_m y + y^2 + z_m^2 - 2z_m z + z^2$$

$$R_1^2 - R_m^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 - 2x_1 x - 2y_1 y - 2z_1 z + 2x_m x + 2y_m y + 2z_m z$$

برای  $m = 2, 3, \dots, M$ . حال با جایگذاری معادله بدست آمده برای تفاضل مجزورات  $R$ ها در معادله اصلی محاسبه مکان منابع قرار دهیم به معادله نهایی زیر می‌رسیم که از حل آن مکان منابع صوتی بدست خواهد آمد:

$$V_c \tau_m - V_c \tau_2 + \frac{1}{V_c \tau_m} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 - 2x_1 x - 2y_1 y - 2z_1 z + 2x_m x + 2y_m y + 2z_m z)$$

$$- \frac{1}{V_c \tau_2} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 - 2x_1 x - 2y_1 y - 2z_1 z + 2x_2 x + 2y_2 y + 2z_2 z) = 0$$

برای  $m = 2, 3, \dots, M$  حال با دوباره نویسی این معادله می‌توان به فرم زیر رسید:

$$\begin{aligned}
 A_m x + B_m y + C_m z + D_m &= 0 \\
 A_m &= \frac{1}{V_C \tau_m} (-2x_1 + 2x_m) - \frac{1}{V_C \tau_2} (2x_2 - 2x_1) \\
 B_m &= \frac{1}{V_C \tau_m} (-2y_1 + 2y_m) - \frac{1}{V_C \tau_2} (2y_2 - 2y_1) \\
 C_m &= \frac{1}{V_C \tau_m} (-2z_1 + 2z_m) - \frac{1}{V_C \tau_2} (2z_2 - 2z_1) \\
 V_C \tau_m - V_C \tau_2 + \frac{1}{V_C \tau_m} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2) - \frac{1}{V_C \tau_2} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2)
 \end{aligned}$$

برای  $m = 2, 3, \dots, M$  حال برای حل راحت‌تر این معادله آن را در قالب ماتریس زیر قرار داده و معادله ماتریسی زیر را تشکیل می‌دهیم.

$$\begin{pmatrix} A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_M & B_M & C_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_3 \\ -D_4 \\ \vdots \\ -D_M \end{pmatrix}$$

اما در رابطه ماتریسی فوق به دلیل مربعی نبودن ماتریس ضرایب، توجه به نکات زیر حائز اهمیت است:

- ✓ برای امکان حل معادله ماتریسی فوق، داشتن حداقل ۵ میکروفون در آرایه میکروفونی موجود لازم است و در این حالت جواب معادله فقط محل یک منبع صوتی را ارائه خواهد داد.
- ✓ برای حل این معادله دو روش اصلی وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. روش اول اینکه می‌توان با دستور `pinv` از مجموعه دستورات نرم‌افزار MATLAB شبه‌معکوس ۱۱ ماتریس ضرایب را محاسبه و معادله را تحلیل نمود که در این حالت فقط مکان منبع صوتی غالب در محیط جاروب آرایه ارائه خواهد شد. روش دوم اینکه به ازای هر سه سطر انتخابی پشت سر هم از ماتریس ضرایب، معادله ماتریسی  $3 \times 3$  را تحلیل کرد، که در این حالت تقریباً مکان تمامی منابع صوتی ارائه خواهد شد، اما مکان منابع تداخلی و منابع مزاحم نیز به عنوان منبع صوتی ارائه خواهد شد.



### ۳ فصل سوم:

## شبیه‌سازی مکان‌یابی منابع صوتی

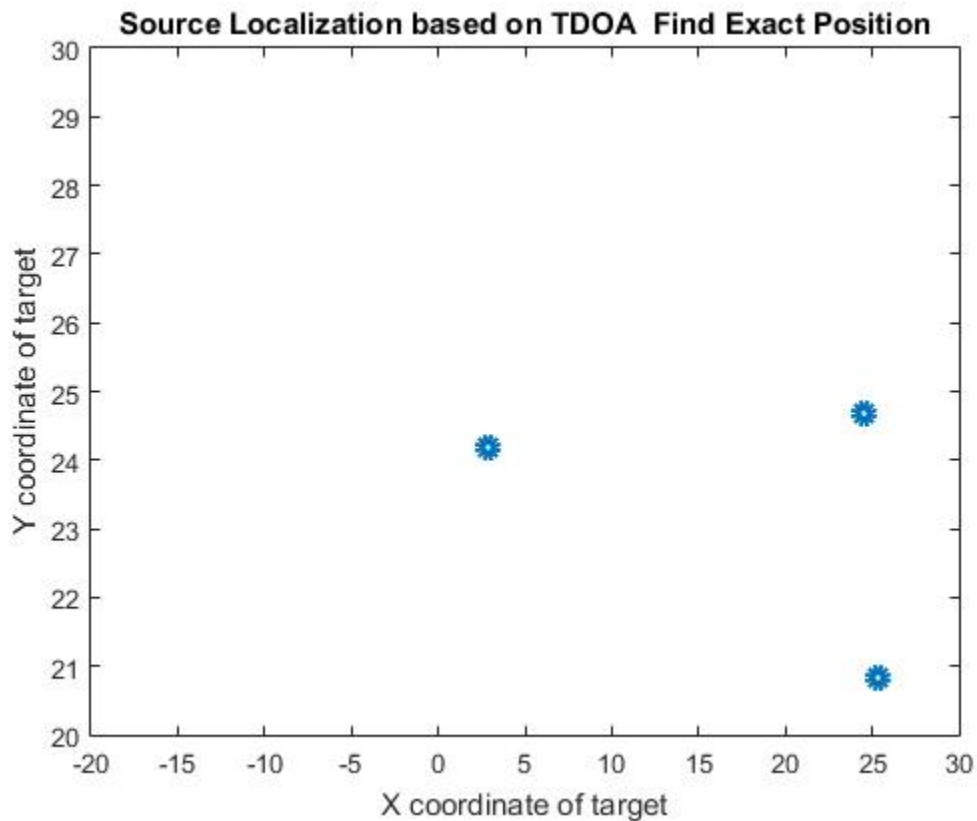
پردازش اصلی پروژه مکان‌یابی منابع صوتی با نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. برای شبیه‌سازی مکان‌یابی، مشاهده و مقایسه نتایج سه روش بحث شده در فصل قبل، تعدادی تابع در این برنامه نوشته شده و الگوریتم‌ها در غالب توابع بیان شده‌اند. ابتدا تابعی برای آماده‌سازی سیگنال‌های ورودی الگوریتم‌ها یا عبارت دیگر تولید و آماده‌سازی سیگنال میکروفون‌ها نوشته شده است. سپس برای هر کدام از الگوریتم‌های کار شده، توابع مربوطه نوشته شده و در نهایت نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

### ۱.۳ تابع آماده‌سازی سیگنال‌ها

در این تابع ابتدا سیگنالی صوتی به عنوان سیگنال میکروفون مرجع در نظر گرفته می‌شود (در این پروژه میکروفون یک به عنوان میکروفون مرجع در نظر گرفته شده است). همچنین با چیدمان آرایه میکروفونی نیز مشخص می‌شود. چیدمان آرایه میکروفونی موجود در این شبیه‌سازی به صورت قرارگیری بر روی یک خط راست با فاصله هر میکروفون حدود ۲ سانتی‌متر انتخاب شده است. سپس به صورت تصادفی، مکانی برای منبع سیگنال صوتی در محیط اطراف آرایه میکروفونی فرض شده و فاصله هر میکروفون آرایه تا مکان منبع تصادفی اختیار شده محاسبه می‌شود. از روی این فاصله‌های بدست آمده، تاخیر زمانی که سیگنال هر میکروفون پیدا می‌کند؛ اگر منبع تصادفی، واقعا منبع صوتی باشد؛ بدست می‌آید. حال این تاخیرهای زمانی به سیگنال صوتی فرض شده به عنوان منبع اعمال و سیگنال خروجی هر میکروفون را می‌سازد. بنابراین تا اینجا یک آرایه میکروفونی و یک منبع صوتی در محیط وجود داشته و سیگنال میکروفون‌ها هم به اندازه‌ای که باید نسبت به محل قرارگیری خودشان و منبع صوتی تاخیر زمانی پیدا کرده‌اند. همچنین برای پردازش‌های بعدی و راحتی در کار، با اضافه کردن تعدادی صفر در صورت لزوم به انتها و ابتدای سیگنال تمامی میکروفون‌ها، اندازه سیگنال‌های دریافتی برابر شده است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی و تطبیق بیشتر آن با عمل، چند منبع تصادفی با دامنه بسیار کوچکتر از منبع اصلی به عنوان منابع بازگشتی منبع اصلی و همچنین منابع مزاحم و نویز به محیط اطراف آرایه اضافه شده است. در اینجا با محاسبه توان سیگنال اصلی و محاسبه مجموع توان سیگنال‌های مزاحم و نویز موجود در محیط، می‌توان نسبت سیگنال به نویز اعمالی به الگوریتم‌ها را مشخص کرد و تاثیر افزایش SNR بر پاسخ را بدست آورد. در آخر سیگنال تمامی میکروفون‌ها در کنار یکدیگر قرار گرفته و به عنوان خروجی این تابع قرار داده شده است.

### ۲.۳ تابع مکان‌یابی به روش نقطه‌ای

تابع نوشته شده در این قسمت، دقیقاً بر مبنای روابط ریاضی ارائه شده در فصل قبل است. ورودی این تابع سیگنال میکروفون‌هاست. ابتدا سیگنال میکروفون‌ها را گرفته و تاخیر زمانی مابین سیگنال میکروفون اول و دوم  $\tau_2$  و سیگنال میکروفون اول و بقیه میکروفون‌ها  $\tau_m$  را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه تاخیر بین دو سیگنال،



شکل ۵) خروجی روش مکان‌یابی به روش نقطه‌ای

هم‌بستگی<sup>۱۲</sup> بین دو سیگنال محاسبه شده و از روی بیشترین عقب‌ماندگی<sup>۱۳</sup> سیگنال‌ها، تاخیر محاسبه می‌شود. سپس ماتریس ضرایب  $M$  که شامل تمامی  $A_m$ ‌ها،  $B_m$ ‌ها و  $C_m$ ‌هاست را بدست می‌آوریم. ماتریس  $D_m$  نیز براساس

<sup>۱۲</sup> Correlation

<sup>۱۳</sup> Maximum Lag

روابط ارائه شده در فصل قبل بدست می‌آید. سپس به هر دو روش گفته شده در قسمت نمایش جواب، مکان منابع صوتی مشخص و ارائه شده است. در ادامه یک نمونه نتیجه شبیه‌سازی با این روش آمده است.

### ۳.۳ تابع مکان‌یابی به روش الگوریتم MUSIC

در این تابع، ابتدا سیگنال میکروفون‌ها گرفته شده و براساس مدل سیگنال ارائه شده در قسمت مدل سیگنال دریافتی و براساس فرضیه میدان نزدیک، کل صفحه اطراف آرایه جاروب شده و ابتدا  $\tau_l$  ها محاسبه و از روی آن بردار هدایت سیگنال یا همان  $\alpha(x, y)$  محاسبه می‌شود. حال با داشتن بردار هدایت می‌توان هرمیتی این بردار را نیز بدست آورد. برای این کار مزدوج مختلط درایه‌های ماتریس حساب شده و ماتریس حاصل ترانهاد می‌شود. سپس بر طبق رابطه نهایی و با در نظرگیری اثر نویز بر روی مکان‌یابی، طیف توان سیگنال  $P_{MUSIC}$  محاسبه شده و در نهایت ناحیه موردنظر ترسیم می‌شود. در شکل حاصل مکان‌هایی که وجود منبع صوتی در آن تایید شده است با رنگ شدیدتر و به تدریج از شدت رنگ اطراف آن کاسته می‌شود.

### ۴.۳ تابع مکان‌یابی به روش شکل‌دهی پرتوها

در این تابع نیز طبق الگوریتم DAS و به روش ارائه شده در فصل قبل، ابتدا سیگنال میکروفون‌ها دریافت می‌شود. حال با استفاده از دستور alignsignals تاخیر موجود بین سیگنال‌های میکروفون‌ها با سیگنال میکروفون اول (به عنوان میکروفون مرجع) محاسبه می‌شود و ضمناً با اجرای این دستورات تمامی سیگنال‌ها به اندازه تاخیر اندازه‌گیری شده شیفت پیدا کرده و همه آن‌ها شبیه سیگنال میکروفون یک خواهند شد. اما این سیگنال‌ها با طول متفاوت هستند که به اندازه تاخیر سیگنال هشتم به انتهای سیگنال اول، به اندازه تاخیر سیگنال هفتم به انتهای سیگنال دوم و به همین روند تا آخر اضافه می‌شود. واضح است که به انتهای بزرگترین سیگنال یعنی سیگنال میکروفون هشتم چیزی اضافه نخواهد شد. حال طبق روند بیان شده، از تک‌تک این سیگنال‌ها تبدیل فوریه گسته گرفته شده و خروجی آن‌ها با هم جمع می‌شود. حاصل جمع این توابع تبدیل فوریه معکوس گرفته و در آخر برای نمایش با استفاده از تابع imagesc ارائه خواهد شد. نکته دیگری که می‌تواند در بهبود الگوریتم کارایی داشته این است که قبل از جمع کردن سیگنال‌ها، آن‌ها از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده می‌شود تا نویزهای فرکانس بالای احتمالی از بین رود.

## منابع و مراجع

- [1] Murat Torlak, Signal and Image Processing Seminar, "Signal Array Processing", 2009
- [2] Unal Aktas, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, "TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) ESTIMATION USING WAVELET BASED DENOISING", 2000
- [3] هادی بیجاری، مهرزاد بیغش، بیستو سومین کنفرانس مهندسی برق ایران، "مقایسه‌ی روش‌های مکان‌یابی به کمک پردازش‌های آرایه‌ای"، ۱۳۹۴
- [4] Mark Aarts, Delft University of Technology, "Two Sensor Array Beamforming Algorithm" 2012
- [5] Sylvain Argentieri and Patrick Dan`es, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, "Broadband Variations of the MUSIC High-Resolution Method for Sound Source Localization in Robotics", 2007
- [6] Steven Li, "TDOA Acoustic Localization", 2011

