دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق – مخابرات

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق – مخابرات

عنوان:

مکان‌یابی منابع صوتی با استفاده از روش‌های مستقیم پارامتری در حوزه فرکانس

استاد راهنما:

دکتر مسعود گراوانچی‌زاده

استاد مشاور:

دکتر میرهادی سیدعربی

پژوهشگر:

امین شکارلو

تیر ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر:

شکر و سپاس پروردگار عالم را که موفقم گردانید تا در عرصه علم و دانش، پله‌های سعادت و تعالی را طی کنم و در این راه خطیر و پر نشیب و فراز بزرگوارانی خالصانه و دلسوزانه تاثیر گذار بودند که ابراز قدردانی از آنان را بر خود واجب می‌دانم.

وجود پر مهر پدری دلسوز و مادری مهربان که صبورانه مرا تحمل کرده و اصلی‌ترین مشوق‌های من در این راه بودند، از این بزرگواران بسیار تشکر و قدردانی می‌کنم.

بهترین تشکراتم را تقدیم استاد گرانقدر، پرتلاش و دلسوزم، جناب آقای دکتر مسعود گراوانچی‌زاده می‌نمایم که در طول این دوره تحصیلی با صبر و حوصله یاریم نموده و همواره پشتیبان و راه‌گشایم بودند.

از استاد عزیز و مشاور دلسوزم، جناب آقای دکتر میرهادی سیدعربی به خاطر راهنمایی‌های مفید و ارزنده‌شان که به‌طور مستمر یاریم نمودند، کمال تشکر را می‌نمایم.

در نهایت از کلیه دوستان، هم‌کلاسی‌ها و هم دانشکده‌ای‌های عزیزم که در این راه صمیمانه یاریم کردند، تشکر نموده، موفقیت خود را مدیون زحمات یکایکشان می‌دانم و از خداوند متعال برایشان آرزوی موفقیت و توفیق روز افزون و سلامتی را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: شکارلو **نام:** امین

عنوان پایان‌نامه: مکان‌یابی منابع صوتی با استفاده از روش‌های مستقیم پارامتری در حوزه فرکانس

استاد راهنما: دکتر مسعود گراوانچی‌زاده **استاد مشاور:** دکتر میرهادی سیدعربی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق **گرایش:** مخابرات– سیستم

دانشگاه: دانشگاه تبریز **دانشکده:** مهندسی برق و کامپیوتر

تاریخ فارغ التحصیلی:۱۳۹۰/۴/۲۲ **تعداد صفحات:** ۹۸

واژه نامه: آرایه‌میکروفونی، تخمین حداکثر احتمال، جهت دریافت، ردیابی، فیلتر ذرات

چکیده: مطالب موجود در این پایان‌نامه به دو بخش اصلی مکان‌یابی و ردیابی تقسیم می‌شوند. روش‌های چند مسیری برای مکان‌یابی منبع صوتی به صورت گسترده به دو دسته اصلی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم به طور کلی، مکان‌های منبع نامزد را جستجو و نامزد با احتمال زیاد را انتخاب می‌کنند که در نتیجه مکان‌یابی تنها در یک مرحله صورت می‌گیرد. روش بررسی شده برای مکان‌یابی در این پایان‌نامه، الگوریتم تخمین حداکثر احتمال از روش‌های مستقیم می‌باشد که در حوزه فرکانس پیاده‌سازی شده است و در آن در مورد پیچیدگی محاسبات، مدل پژواک و تخمین ماتریس‌های بهره برای آرایه میکروفونی جهتی بحث شده و راهکاری بهینه برای هرکدام ارائه شده است. در ابتدا، در این الگوریتم مکان‌یابی، برای تخمین نویز موجود در محیط از بخش‌های ساکت سیگنال صوتی استفاده شده است. سپس، برای بهبود کارکرد الگوریتم مکان‌یابی، تخمین نویز به روش مارتین بکار رفته است.

بخش دوم از این پایان‌نامه به ردیابی منبع صوتی اختصاص داده شده است. در این بخش یک الگوریتم ردیابی ارائه شده که شامل روش مکان‌یابی منبع معرفی شده در بخش اول می‌باشد. می‌دانیم که راندمان الگوریتم‌های مکان‌یابی در ردیابی منبع صوتی به خاطر حضور پژواک محیط کاهش می‌یابد. الگوریتم ردیابی استفاده شده در این پایان‌نامه روش فیلتر ذرات می‌باشد. با اعمال فیلتر ذرات و به خاطر وجود معادلات دینامیک منبع در این فیلترها، خطاهای موجود در روش‌های مکان‌یابی مرسوم تا حدود زیادی کاهش می‌یابند و عملکرد روش مکان‌یابی بهبود می‌یابد. برای بهبود عملکرد فیلتر ذرات، یک تابع شرط پیشنهاد شده است. این تابع سبب کاهش پراکندگی ذرات و بهینه‌تر شدن کیفیت ردیابی می‌شود. ردیابی منبع صوتی در ابتدا با استفاده از روش تخمین حداکثر احتمال در مرحله مکان‌یابی، و سپس با اعمال تابع شرط در مرحله ردیابی، صورت می‌پذیرد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از بهبود عملکرد مکان‌یابی با اعمال الگوریتم پیشنهادی فیلتر ذرات می‌باشد.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها.....X

فهرست جدول‌ها.....XI

فهرست اختصارات.....XII

فصل ۱ مقدمه.....۱

۱-۱- آرایه‌های سنسوری برای برنامه‌های کاربردی مربوط به گفتار ۲

۱-۲- مکان‌یابی منابع صوتی با استفاده از آرایه‌های میکروفونی ۳

۱-۳- مدل سیگنال ۳

۱-۳-۱- مدل پیوسته در زمان ۴

۱-۳-۲- نمایش گسسته در زمان ۵

۱-۳-۳- فرمول‌بندی در حوزه فرکانس..... ۶

۱-۴- طبقه‌بندی روش‌های مکان‌یابی ۷

۱-۵- جمع‌بندی..... ۸

فصل ۲ بررسی روش‌های مکان‌یابی و ردیابی منبع صوتی.....۹

۲-۱- مقدمه..... ۱۰

۲-۲- روش‌های مکان‌یابی غیرمستقیم ۱۰
۲-۲-۱- همبستگی متقابل عمومی (GCC)..... ۱۳
۲-۲-۲- تجزیه مقدار ویژه وفقی (AED)..... ۱۴
۲-۳- روش‌های مکان‌یابی مستقیم ۱۷
۲-۴- تخمین حداکثر احتمال (MLE) ۱۸
۲-۴-۱- حداکثر احتمال معین (DML)..... ۱۹
۲-۴-۲- حداکثر احتمال اتفاقی (SML)..... ۲۲
۲-۵- مکان‌یابی منابع صوتی با استفاده از حداکثر احتمال برای آرایه‌های میکروفونی جهتی..... ۲۳
۲-۵-۱- مکان‌یابی منبع صوتی..... ۲۳
۲-۵-۲- چهارچوب حداکثر احتمال ۲۴
۲-۵-۳- الگوریتم مکان‌یابی منبع صوت بهینه ۲۷
۲-۵-۴- پژواک ۲۸
۲-۵-۵- تخمین ضرایب بهره ($\alpha(\omega)$)..... ۳۱
۲-۵-۶- نتیجه‌گیری ۳۲
۲-۶- ردیابی منابع صوتی ۳۳
۲-۷- فیلتر کالمن بر اساس حل ریکاتی ۳۴
۲-۸- فیلترهای ذره برای ردیابی مستقیم غیرخطی/غیرگوسی بیزین ۳۹
۲-۸-۱- ردیابی غیر خطی بیزین ۴۰

۲-۹- فیلتر ذره‌ای ۴۲
۲-۹-۱- روش نمونه‌برداری با اهمیت ترتیبی (SIS) ۴۲
۲-۹-۲- مشکل انحطاط ۴۴
۲-۹-۳- نمونه‌برداری مجدد ۴۵
۲-۱۰- جمع بندی ۴۶

فصل ۳ ردیابی با استفاده از فیلتر ذرات و اعمال تابع شرط پیشنهادی ۴۷

۳-۱- مقدمه..... ۴۸
۳-۲- تخمین چگالی طیفی توان نویز بر اساس مسطح‌سازی بهینه و آمار حداقل ۴۸
۳-۲-۱- اصول تخمین نویز با آمار حداقل ۴۹
۳-۲-۱-۱- تحلیل طیفی..... ۴۹
۳-۲-۱-۲- تخمین نویز با استفاده از آمار حداقل ۵۰
۳-۲-۲- مسطح‌سازی متغیر با زمان بهینه..... ۵۰
۳-۲-۳- مشخصه‌های آماری از تخمین‌های حداقل توان ۵۱
۳-۲-۳-۱- میانگین کمترین تخمین‌های چگالی طیف توان همبسته..... ۵۲
۳-۲-۴- تخمین‌گر نویز بدون بایاس بر اساس آمار حداقل ۵۳
۳-۲-۵- پیاده سازی بهینه برای جستجوی کمترین مقدار..... ۵۵
۳-۳- الگوریتم مکان‌یابی حداکثر احتمال همراه با تخمین نویز ۵۶
۳-۴- الگوریتم فیلتر ذرات عمومی برای ردیابی منبع صوتی..... ۵۷

۳-۴-۱- مکان‌یابی منبع ۵۷
۳-۴-۱-۱- مدل سیگنال ۵۷
۳-۴-۱-۲- روش مکان‌یابی ۵۹
۳-۴-۲- چهارچوبی برای مکان‌یابی منبع با استفاده از فیلتر ذرات ۵۹
۳-۴-۲-۱- توسعه چهارچوب عمومی ۵۹
۳-۴-۲-۱- دینامیک منبع ۶۲
۳-۴-۲-۲- تابع مکان‌یابی ۶۴
۳-۴-۲-۳- تابع احتمال ۶۴
۳-۴-۲-۴- احتمال گوسی ۶۴
۳-۴-۲-۵- احتمال ساختگی ۶۵

۳-۵- الگوریتم پیشنهادی برای ردیابی با استفاده از فیلتر ذرات ۶۵
۳-۵-۱- مروری بر الگوریتم فیلتر ذرات و اعمال تابع مکان‌یابی حداکثر احتمال ۶۵
۳-۵-۲- تعریف تابع پیشنهادی جهت بهینه‌تر کردن فیلتر ذرات ۶۶
۳-۵-۳- محاسبه ε ۶۸
۳-۵-۴- اعمال تابع شرط به فیلتر ذرات ۶۹

۳-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۲

فصل ۴ شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری ۷۳

۴-۱- مقدمه ۷۴

۴-۲- دادگان ۷۴

۴-۳- معیارهای ارزیابی ۷۴
۴-۳-۱- ریشه میانگین مربع خطا (*RMSE*) ۷۶
۴-۳-۲- انحراف استاندارد میانگین (*MSTD*) ۷۶
۴-۴- نتایج شبیه‌سازی مکان‌یابی با الگوریتم حداکثر احتمال و تخمین نویز ۷۷
۴-۴-۱- نتایج شبیه‌سازی اول ۷۷
۴-۴-۲- نتایج شبیه‌سازی دوم ۸۲
۴-۵- نتایج مربوط به ردیابی ۸۵
۴-۵-۱- نتایج شبیه‌سازی فیلتر ذرات با تابع مکان‌یابی حداکثر احتمال ۸۵
۴-۵-۲- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم فیلتر ذرات پیشنهادی با اعمال تابع شرط ۸۸
۴-۵-۳- بررسی نتایج ۹۰
۴-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۲
۴-۷- پیشنهادات ۹۳
مراجع ۹۴

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱): مسیرهای سیگنال صوتی برای یک میکروفون خاص در صفحه x-y ۴

شکل (۲-۱): بلوک دیاگرام روش همبستگی متقابل عمومی برای تخمین TDOA ۱۳

شکل (۲-۲): بلوک دیاگرام روش AED در حوزه زمان پیوسته..... ۱۶

شکل (۴-۱): سیگنال صوتی گوینده (مرد)..... ۷۵

شکل (۴-۲): سیگنال نویز (car) موجود در محیط ۷۵

شکل (۴-۳): مقایسه *RMSE* الگوریتم حداکثر احتمال و الگوریتم تخمین حداکثر احتمال با تخمین نویز به روش مارتین ۷۹

شکل (۴-۴): نمای بالا از اتاق فرضی مورد آزمایش ۸۳

شکل (۴-۵): نتایج بدست آمده از الگوریتم مکان‌یابی با روش حداکثر احتمال ۸۷

شکل (۴-۶): نتایج بدست آمده از فیلتر ذرات..... ۸۷

شکل (۴-۷): رسم مکان‌یابی با تخمین حداکثر احتمال و ردیابی با فیلتر ذرات به صورت همزمان ۸۸

شکل (۴-۸): نتایج بدست آمده از فیلتر ذرات با اعمال تابع شرط ۸۹

شکل (۴-۹): رسم مکان‌یابی با تخمین حداکثر احتمال و ردیابی با فیلتر ذرات با اعمال تابع شرط به صورت همزمان (مقایسه شکل (۴-۵) و (۴-۸))..... ۹۰

شکل (۴-۱۰): رسم ردیابی با فیلتر ذرات با و بدون اعمال تابع شرط (محور افقی شماره فریم با گام 5 و محور عمودی DOA بدست آمده برای فریم می‌باشد) ۹۲

فهرست جدول‌ها

جدول (۲-۱): توابع وزن برای همبستگی متقابل عمومی..... ۱۵

جدول (۲-۲): محاسبات فیلتر کالمن بر اساس حل ریکاتی ۳۸

جدول (۳-۱): الگوریتم فیلتر ذرات عمومی برای مکان‌یابی منبع ۶۳

جدول (۴-۱): مقادیر آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی اول مکان‌یابی ۷۹

جدول (۴-۲): مقادیر بدست آمده برای زاویه‌ای که گوینده با مرکز آرایه دارد ۸۰

جدول (۴-۳): مقادیر بدست آمده برای زاویه‌ای که گوینده با مرکز آرایه دارد (الگوریتم ترکیبی) ۸۱

جدول (۴-۴): مقادیر آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی دوم مکان‌یابی ۸۳

جدول (۴-۵): مقایسه تخمین حداکثر احتمال با تخمین نویز به روش مارتین و سایر الگوریتم‌ها ۸۴

جدول (۴-۶): مقادیر آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی فیلتر ذرات ۸۶

جدول (۴-۷): مقایسه نتایج ردیابی توسط فیلتر ذرات..... ۹۱

فهرست اختصارات

Fourier Transform of Discrete Signals……..……FTDS
Maximum-Likelihood Estimation…….……...MLE
Kalman Filter…….……..KF
Particle Filter…… ……..……PF
Time Delay of Arrival……..……..… TDOA
Generalized Cross-Correlation…….. ...……..…GCC
Adaptive Eigenvalue Decomposition…….……..……AED
Minimum Mean-Square-Error……...…….…….……MMSE
Deterministic Maximum Likelihood…….…….……...…….…….……DML
Stochastic Maximum Likelihood…….…… . …...…….……SML
Likelihood Function…….……..…….……LF
Power Spectral Density…….…….…….……PSD
Extended Kalman Filters……..…EKF
Sequential Importance Sampling…….…….. ……SIS
Voice Activity Detection ……..…….……VAD
Fast Fourier Transform……. ….…….…...FFT

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- آرایه‌های سنسوری برای برنامه‌های کاربردی مربوط به گفتار

یک آرایه قابل هدایت[1] از میکروفون‌ها، می‌تواند به عنوان سیستم مبدل ورودی برای اکتساب اطلاعات صحبت در بسیاری از کاربردها استفاده شود. آرایه‌ای از میکروفون‌ها دارای مزیت‌هایی نسبت به سیستم تک‌میکروفون می‌باشد. آرایه میکروفونی ممکن است به صورت الکترونیکی جهت به دست‌آوردن یک سیگنال با کیفیت بالا از مکان منبع مورد نظر، که به صورت همزمان با تداخل[2] گوینده و نویز محیط، تضعیف شده، استفاده شود. در این زمینه، یک آرایه بالقوه‌تر از تک‌میکروفون می‌باشد که در مکان و جهت خوبی جاگذاری شده است.

یک سیستم آرایه‌ای لزومی ندارد که در محل مشخصی قرار داده شود و نیازی به حرکت فیزیکی جهت تغییر دادن زاویه دریافت نیست. این ویژگی سبب می‌شود که استفاده از آرایه در کاربردهایی که شامل چند منبع هستند یا منبع در حال حرکت می‌باشد، با مزیت‌تر باشد. در نهایت، یک آرایه از میکروفون دارای قابلیت‌های بالقوه‌ای است که تک‌میکروفون دارا نمی‌باشد، مثل تشخیص خودکار مکان و ردیابی از گوینده فعال در منطقه قابل قبول [۱].

سیستم‌های آرایه‌ای موجود، در برخی از کاربردها استفاده شده‌اند. این کاربردها عبارتند از تله‌کنفرانس‌ها[3]، تشخیص گفتار[4]، تشخیص گوینده[5]، اکتساب گفتار در محیط خودرو[6]، ضبط صدا در محیط پر انعکاس، نظارت صوتی و غیره. همچنین این سیستم‌ها قابلیت مفید بودن در چندین محیط دیگر را دارند، به عنوان مثال در هنرهای نمایشی و جوامع ورزشی.

[1] Steerable Array
[2] Interference
[3] Teleconferencing
[4] Speech Recognition
[5] Speaker Identication
[6] Automobile Environment

یک کاربرد یا نیاز ضروری از این آرایه سنسوری، توانایی آن جهت مکان‌یابی و ردیابی منبع صوتی می‌باشد.

۱-۲- مکان‌یابی منابع صوتی با استفاده از آرایه‌های میکروفونی

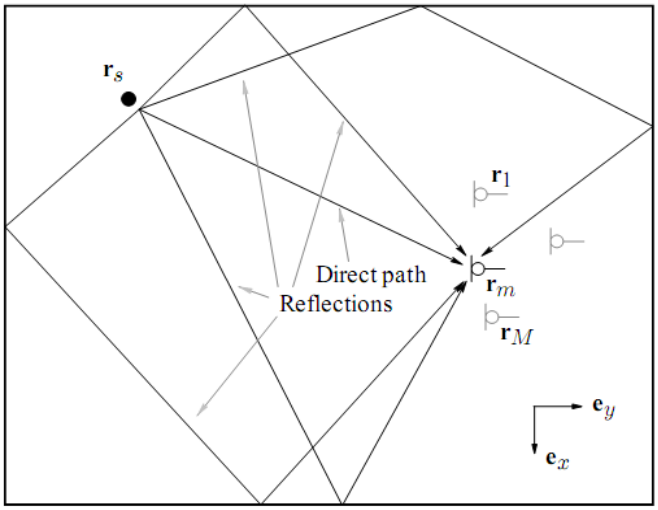
مکان‌یابی منبع صوتی با استفاده از آرایه‌های میکروفونی [۲]، یکی از مهمترین استفاده‌های پردازش صحبت در کاربردهایی مثل ویدئو کنفرانس‌ها[1]، استفاده از صحبت هندزفری در ماشین‌ها و پردازش‌هایی به منظور اهداف شنوایی می‌باشد. به علاوه، مکان‌یابی منبع صوتی، در کاربردهایی غیر از صحبت نیز استفاده می‌شود. به عنوان مثال، کنترل از راه دور، تجزیه تحلیل خطای ماشین‌آلات، اکوستیک خودرو، روبات خودکار و غیره. جای تعجب ندارد که این عنوان، برای مدت زمان طولانی موضوع پژوهش فعالی بوده و هنوز هم مساله قابل توجهی در جامعه پردازش سیگنال به حساب می‌آید.

نشان داده خواهد شد که رایج‌ترین الگوریتم‌ها تنها به آمارگان مرتبه دوم[2] از سیگنال‌های میکروفون و متناسب با یک چهار چوب متحدی که تنها نشان دهنده همبستگی متقابل مابین سیگنال‌ها از جفت میکروفون‌های مختلف است، بستگی دارد. ما کار را با توصیفی از مدل سیگنالی و مفاهیم مربوط به مکان‌یابی صوتی، جهت مروری بر روش‌های مکان‌یابی، شروع خواهیم کرد.

۱-۳- مدل سیگنال

همان‌طور که در مکان‌یابی منبع رویکردهای چند مسیری اهمیت پیدا می‌کنند، ما بایستی با توزیع آرایه‌های میکروفونی یا سنسوری برای گرفتن صدا اقدام کنیم. شکل (۱-۱) وضعیت کلی در فضای دو بعدی را نشان می‌دهد که با بردارهای واحد $\mathbf{e}_x$ و $\mathbf{e}_y$ پوشش داده شده است.

[1] Video Conferencing
[2] Second-Order Statistics



شکل (۱- ۱): مسیرهای سیگنال صوتی برای یک میکروفون خاص در صفحه x-y . $\mathbf{r}_s$ و $\mathbf{r}_m$ به ترتیب نشان دهنده محل منبع و میکروفون m-ام می‌باشد. هر مسیر از منبع تا میکروفون m-ام می‌تواند با یک میرایی و تاخیر از سیگنال منبع نمایش داده شود. مسیر مستقیم دارای کمترین تاخیر می‌باشد. با در نظر گرفتن مجموع همه مسیرها، می‌توان پاسخ ضربه اتاق برای منبع مشخص و مکان میکروفون را اندازه گرفت.

یک آرایه از M میکروفون در موقعیت‌های $\mathbf{r}_m$ را در نظر بگیرید که سیگنال منتشر شده از منبع در موقعیت $\mathbf{r}_s$ را دریافت می‌کند. این سیگنال‌های ضبط شده توسط میکروفون‌ها، با توجه به در نظر گرفتن مسیرهای مختلفی که از منبع به هر کدام از میکروفون‌های آرایه می‌تواند وجود داشته باشد، در حوزه گسسته در زمان یا در حوزه پیوسته در زمان بیان می‌شوند.

۱-۳-۱- مدل پیوسته در زمان

سیگنال $\tilde{y}_m(t)$ مربوط به منبع واقع شده در مختصات $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$، دریافت شده در میکروفون m-ام از آرایه، واقع شده در مختصات $\mathbf{r}_m = (x_m, y_m, z_m)^T$، می‌تواند تحت معادله پیوسته در زمان زیر بیان شود:

$$\tilde{y}_m(t) = \tilde{a}_m(t) * \tilde{s}_0(t) + \tilde{v}_m(t), \quad (۱-۱)$$

که در آن $\tilde{s}_0(t)$ نشان‌دهنده سیگنال منبع و $\tilde{a}_m(t)$ پاسخ ضربه اتاق از مکان منبع تا میکروفون m-ام و * نشان دهنده عملگر کانولوشون می‌باشد. $\tilde{v}_m(t)$ نویز دریافتی در میکروفون می‌باشد. می‌توان این معادله را به حالت عمومی برای Q منبع تعمیم داد:

$$\tilde{y}_m(t) = \sum_{q=1}^{Q} \tilde{a}_{mq}(t) * \tilde{s}_{0q}(t) + \tilde{v}_m(t), \quad (۱-۲)$$

که در آن $\tilde{a}_{mq}(t)$ نشان دهنده پاسخ ضربه اتاق از منبع q-ام تا میکروفون m-ام می‌باشد.

۱-۳-۲- نمایش گسسته در زمان

از آنجائیکه ما بیشتر با نمایش دیجیتالی از میکروفون و سیگنال‌های منبع سرو کار داریم، مفهوم پیوسته در زمان تنها به روشن شدن برخی از ایده‌های اساسی کمک می‌کند. بنابراین روابط (۱-۱) و (۱-۲) را برای حالت گسسته در زمان تعمیم می‌دهیم. به منظور ساده‌تر کردن بحث، پاسخ ضربه را با یک فیلتر با پاسخ ضربه محدود و از مرتبه L-1 تقریب می‌زنیم. برای حالت تک منبعی، بردار پاسخ ضربه بدین شکل محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{a}_m = \left(a_m(0), a_m(1), \ldots, a_m(L-1)\right)^T. \quad (۱-۳)$$

سیگنال در میکروفون m-ام به قرار زیر است:

$$y_m(k) = \mathbf{a}_m{}^T \mathbf{s}_0(k) + v_m(k), \quad (۱-۴)$$

که در آن k، شاخص گسسته در زمان و $\mathbf{s}_0(k)=\left(s_0(k), s_0(k-1), \ldots, s_0(k-L+1)\right)^T$ و $v_m(k)$ سیگنال نویز نمونه برداری شده است. برای حالت چندمنبعی ما بردار پاسخ ضربه از منبع q تا میکروفون m را با رابطه زیر تعریف می‌کنیم:

$$\mathbf{a}_{mq}=\left(a_{mq}(0), a_{mq}(1), \ldots, a_{mq}(L-1)\right)^T, \qquad (۵-۱)$$

و برای سیگنال در میکروفون m-ام بدست می‌آوریم:

$$\begin{pmatrix} y_1(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_m(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^T{}_{11} & \ldots & \mathbf{a}^T{}_{1Q} \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \mathbf{a}^T{}_{M1} & \ldots & \mathbf{a}^T{}_{MQ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{s}_{01}(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{s}_{0Q}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_m(k) \end{pmatrix}, \qquad (۶-۱)$$

که در آن $\mathbf{v}(k)=\left(v_1(k), v_2(k), \ldots, v_m(k)\right)^T$ بردار سیگنال‌های نویز می‌باشد.

۱-۳-۳- فرمول‌بندی در حوزه فرکانس

معادله‌های (۱-۴) و (۱-۶) با استفاده از تبدیل فوریه سیگنال‌های گسسته[1] (FTDS) می‌تواند در حوزه گسسته در زمان بیان شود [۳] ، [۴]. با فرض اینکه تبدیل فوریه تمام سیگنال‌های مورد نظر وجود داشته باشند، معادل حوزه فرکانس معادله (۱-۶) بدین ترتیب بدست می‌آید:

$$Y_m(\Omega)=A_m(\Omega)S_0(\Omega)+V(\Omega), \qquad (۷-۱)$$

که $\Omega=2\pi f/f_S$ فرکانس نرمالیزه شده و f_S نرخ نمونه‌برداری می‌باشد.

[1] Fourier Transform of Discrete Signals

برای حالت چند منبعی داریم:

$$\mathbf{Y}(\Omega)=\begin{pmatrix} A_{11}(\Omega) & \dots & A_{1Q}(\Omega) \\ . & & . \\ . & & . \\ . & & . \\ A_{M1}(\Omega) & \dots & A_{MQ}(\Omega) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} S_{01}(\Omega) \\ . \\ . \\ . \\ S_{0Q}(\Omega) \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} V_1(\Omega) \\ . \\ . \\ . \\ V_M(\Omega) \end{pmatrix} \quad (۸-۱)$$

$$= \mathbf{A}(\Omega)\mathbf{S}_0(\Omega)+\mathbf{V}(\Omega),$$

که در آن

$$\mathbf{Y}(\Omega)=\left(Y_1(\Omega),Y_2(\Omega),\dots,Y_M(\Omega)\right)^T, \quad (۹-۱)$$
$$\mathbf{V}(\Omega)=\left(V_1(\Omega),V_2(\Omega),\dots,V_M(\Omega)\right)^T.$$

۱-۴- طبقه‌بندی روش‌های مکان‌یابی

روش‌های چند مسیری برای مکان‌یابی منبع صوتی به صورت گسترده می‌تواند به دو دسته اصلی مستقیم[1] و غیرمستقیم[2] تقسیم شوند.

روش‌های غیرمستقیم برای مکان‌یابی منبع معمولا روش‌های دو مرحله‌ای هستند، که ابتدا تاخیر زمانی نسبی $\Delta\tau_{mq}$ برای جفت میکروفون‌های مختلف محاسبه می‌شود، و سپس مکان منبع تحت تقاطع و اشتراک نیمه هیپربولیدهای[3] متناظر متمرکز شده اطراف جفت میکروفون‌های مربوطه، محاسبه می‌شود.

[1] Direct
[2] Indirect
[3] Half-Hyperboloids