



دانشگاه بلوچستان
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی برق - مخابرات سیستم

عنوان:

پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای با استفاده از هایدروفن‌های برداری در حضور نویز غیرگوسی

استاد راهنما:

دکتر هنگامه کشاورز

تحقیق و نگارش:

اطهر صحتی ثابت صومعه‌سرایبی

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره‌مند شده است)

بهمن ۱۳۹۲

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای با استفاده از هایدروفن‌های برداری در حضور نویز غیرگوسی قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات سیستم توسط دانشجو اظهر صحتی ثابت صومعه‌سرایبی با راهنمایی استاد پایان نامه دکتر هنگامه کشاورز تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

اظهر صحتی ثابت صومعه‌سرایبی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ۹۲/۱۱/۲۱ توسط هیئت داوران بررسی و درجه به آن تعلق گرفت.

نام و نام خانوادگی	امضاء	تاریخ
استاد راهنما:	دکتر هنگامه کشاورز	
استاد راهنما:		
استاد مشاور:		
داور ۱:		
داور ۲:		
نماینده تحصیلات تکمیلی:		



تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب اطهر صحتی ثابت صومعه سرایی تعهد می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: اطهر صحتی ثابت صومعه سرایی

امضاء

تقدیم به:

خانواده عزیزم

به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند

و در سایه وجودشان توانستم در راه کسب علم و دانش گام بردارم

سپاسگزاری

به مصداق من لم یسکر المخلوق، لم یسکر الخالق

تحت خدای راسا کرم و پس از آن بسی شایسته است

از زحمات بی دریغ استاد اهنمای محترم، سرکار خانم دکتر سنگامه کشاورز، کمال تشکر و قدررانی را داشته

باشم که با صبوری و فروتنی بیچ کلمی را در این عرصه بر من دریغ نمودند و نیز از اساتید داور که تقدیر که

زحمت دآوری این پایان نامه را منتقل شدند مراتب سپاس را دارم و همچنین سایر دوستان و کسانی که به

هر نحوی در تکمیل و به نتیجه رساندن این مجموعه مرایاری کردند.

چکیده:

امروزه پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای به یک حوزه فعال تحقیقاتی و مهندسی تبدیل شده است و کاربردهای زیادی در رادار، سونار، جهت‌یابی سیگنال، ستاره‌شناسی رادیویی، زلزله‌شناسی و روش‌های تشخیص پزشکی و درمانی دارد. جهت‌یابی سیگنال‌های صوتی زیر آب توسط هایدروفن^۱ها نیز یکی از کاربردهای مهم پردازش سیگنال آرایه‌ای است. در این راستا، تعیین مدل آماری نویز محیطی نقش مهمی دارد. از آن جایی که کانال مخابراتی زیر آب یک کانال متغیر با زمان است، فرضیه نویز گوسی مدل مناسبی برای نویز زیر آب به نظر نمی‌رسد. بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهند که در محیط زیر آب مدل نویز، غیرگوسی است. تاکنون مدل‌های غیرگوسی فراوانی در مقالات معرفی شده است. یکی از این مدل‌های معروف، سری‌های زمانی است که کاربردهای زیادی برای مدل کردن پدیده‌های ناپایدار همچون پدیده‌های اقتصادی داشته است. مدل $GARCH^2$ یکی از انواع سری‌های زمانی است که به واسطه دنباله‌دار بودن تابع چگالی احتمال و متغیر با زمان بودن واریانس آن ویژگی‌های نویز محیطی زیر آب را به خوبی پوشش می‌دهد.

در این پایان‌نامه، عملکرد الگوریتم‌های جهت‌یابی به ازای نویز $GARCH$ و گوسی با هم مقایسه شده است. در این راستا، الگوریتم‌های جهت‌یابی مبتنی بر زیرفضا همچون $MUSIC^3$ و $ESPRIT^4$ برای آرایه‌ای خطی و یکنواخت از هایدروفن‌های اسکالر به کار گرفته شده است. سپس عملکرد الگوریتم $ESPRIT$ برای دو هایدروفن برداری هم‌محور، دور از سطوح منعکس‌کننده در حضور نویز غیر گوسی بررسی شده است. معیار جذر میانگین مربعات خطا در تشخیص زوایای ورود، برای سنجش عملکرد این الگوریتم‌ها در مقابل تغییر پارامترهای مختلف مدل $GARCH$ ترسیم شده است که در تمامی حالات عملکرد الگوریتم‌های تخمین جهت ورود به ازای نویز غیرگوسی $GARCH$ ، برای محدوده مشخصی از α و β عملکرد بهتر و خطای کمتری در مقایسه با مدل نویز گوسی داشتند.

کلمات کلیدی: پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای - جهت‌یابی سیگنال‌های صوتی - نویز غیرگوسی - سری‌های

زمانی - مدل $GARCH$ - هایدروفن‌های اسکالر - هایدروفن‌های برداری

¹ Hydrophone

² Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity

³ Multiple Signal Classification

⁴ Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- هایدروفن های برداری
۴	۱-۲-۱- سطوح منعکس کننده
۶	۲-۲-۱- بردار هدایت هایدروفن های برداری
۷	۳-۱- تخمین جهت ورود (جهت یابی)
۹	۴-۱- بیان مسئله و انگیزه تحقیق
۱۰	۵-۱- ساختار پایان نامه
۱۱	فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته
۱۲	۱-۱- تخمین جهت ورود (جهت یابی)
۱۲	۱-۱-۲- الگوریتم های تخمین جهت ورود (جهت یابی)
۱۳	۲-۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه جهت یابی سیگنال
۱۵	۲-۲- انواع مدل های نوین غیرگوسی
۱۵	۱-۲-۲- مدل های Middleton
۱۷	۲-۲-۲- خانواده α -stable
۱۹	۳-۲-۲- مدل Gaussian mixture
۲۰	۴-۲-۲- سری های زمانی
۲۴	فصل سوم: جهت یابی سیگنال توسط آرایه ای از هایدروفن های اسکالر
۲۵	۱-۳- سیستم پردازش آرایه ای
۲۶	۲-۳- مدل انتخابی نوین زیر آب
۲۸	۳-۳- الگوریتم جهت یابی MUSIC
۳۲	۴-۳- الگوریتم جهت یابی ESPRIT
۳۶	۵-۳- نتایج شبیه سازی
۳۶	۱-۵-۳- الگوریتم MUSIC
۳۹	۲-۵-۳- الگوریتم ESPRIT
۴۲	فصل چهارم: جهت یابی سیگنال توسط هایدروفن های برداری
۴۴	۱-۴- مدل سیگنال دریافتی در هایدروفن برداری
۴۵	۲-۴- الگوریتم پیشنهادی برای تخمین جهت دو بعدی
۴۹	۳-۴- نتایج شبیه سازی
۵۳	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵۴ ۱-۵- نتیجه‌گیری
۵۵ ۲-۵- پیشنهادات
۵۵ ۳-۵- مقاله مستخرج از پایان‌نامه
۵۶ مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۳	شکل ۱-۱. تصویری از یک هایدروفن برداری
۸	شکل ۱-۲. زوایای فراز و افقی
۸	شکل ۱-۳. جهت‌یابی منابع آکوستیکی به وسیله آرایه‌ای از هایدروفن‌ها
۱۳	شکل ۱-۲. انواع الگوریتم‌های جهت‌یابی
۱۶	شکل ۲-۲. تابع چگالی احتمال نویز Middleton class A برای مقادیر مختلف A
۱۸	شکل ۲-۳. تابع چگالی احتمال نویز SαS
۲۰	شکل ۲-۴. تابع چگالی احتمال مدل GMM
۲۲	شکل ۲-۵. مقایسه دنباله در توابع چگالی گوسی و GARCH
۲۶	شکل ۳-۱. شمای کلی یک سیستم پردازش آرایه‌ای
۲۷	شکل ۳-۲. توابع چگالی احتمال نویز اندازه‌گیری شده واقعی، $GARCH(1,1)$ و گوسی
۳۱	شکل ۳-۳. ساختار الگوریتم MUSIC
۳۲	شکل ۳-۴. تشکیل زیرآرایه برای آرایه‌ای متشکل از ۶ هایدروفن
۳۵	شکل ۳-۵. ساختار الگوریتم ESPRIT
۳۷	شکل ۳-۶. مقایسه عملکرد طیف فضایی الگوریتم MUSIC
۳۸	شکل ۳-۷. RMSE بر حسب α_0^2 در الگوریتم MUSIC برای مدل نویز گوسی و GARCH
۳۸	شکل ۳-۸. RMSE برای مدل GARCH به ازای تغییرات همزمان α و α_0^2
۳۹	شکل ۳-۹. RMSE برای مدل GARCH به ازای تغییرات همزمان β و α_0^2
۴۰	شکل ۳-۱۰. RMSE بر حسب β در الگوریتم ESPRIT برای مدل گوسی و GARCH

- شکل ۳-۱۱. RMSE بر حسب β در الگوریتم ESPRIT برای مدل گوسی و GARCH برای هر کدام از منابع ۴۰
- شکل ۳-۱۲. RMSE بر حسب α در الگوریتم ESPRIT برای مدل گوسی و GARCH ۴۱
- شکل ۳-۱۳. RMSE بر حسب α در الگوریتم ESPRIT برای مدل گوسی و GARCH برای هر کدام از منابع ۴۱
- شکل ۴-۱. مدل قرارگیری دو هایدروفن برداری هم‌محور در یک دستگاه مختصات سه بعدی ۴۳
- شکل ۴-۲. RMSE بر حسب α در الگوریتم ESPRIT برای دو هایدروفن برداری هم‌محور ۵۰
- شکل ۴-۳. RMSE بر حسب α در الگوریتم ESPRIT برای دو هایدروفن برداری هم‌محور برای هر کدام از منابع ۵۱
- شکل ۴-۴. RMSE بر حسب β در الگوریتم ESPRIT برای دو هایدروفن برداری هم‌محور ۵۱
- شکل ۴-۵. RMSE بر حسب β در الگوریتم ESPRIT برای دو هایدروفن برداری هم‌محور برای هر کدام از منابع ۵۲

فهرست علائم

علامت	نشانه
ω	فرکانس زاویه‌ای
k_i	بردار عدد موج ورودی
k_r	بردار عدد موج منعکس شونده
\tilde{p}	دامنه مختلط موج ورودی
R	ضریب سطح منعکس کننده
ρ_0	چگالی سیال
d	فاصله سطح منعکس کننده از هایدروفن برداری
θ_k	زاویه فراز
φ_k	زاویه افقی
$a_k(\theta_k, \varphi_k)$	بردار هدایت
$c(m/s)$	سرعت صوت در زیر آب
R_s	فاصله هایدروفن تا منبع صوتی
λ	طول موج سیگنال دریافتی
w_k, v_k, u_k	کسینوس‌های جهت به ترتیب در راستای محورهای x, y و z
σ_m^2	واریانس نویز
Q	ماتریس کواریانس نویز
α_i^2	ضرایب ARCH
β_j^2	ضرایب GARCH
ψ	پارامتر چرخشی میان زیرفضای سیگنال‌های دو مجموعه

فصل اول

مقدمه

مخابرات صوتی زیر آب یک حوزه فعال تحقیقاتی است که امروزه کاربردهای فراوانی همچون شناسایی و رهگیری اهداف زیرسطحی، شناسایی جنس بستر دریا، تشخیص سونامی و تشخیص توده ماهی و سایر جانداران دریایی، کنترل ترافیک مسیرهای دریایی و ایمنی اسکله و بندرگاه‌ها دارد. مخابرات صوتی زیر آب همان‌طور که از نامش پیداست ارسال و دریافت اطلاعات سیگنال پیام صوتی در کانال ارتباطی زیر آب است که روش‌های مختلفی برای برقراری چنین ارتباطی وجود دارد اما رایج‌ترین آن‌ها استفاده از هایدروفن^۱ است.

هایدروفن از یک واژه یونانی گرفته شده است که hydro به معنی آب و phone هم به معنی صداست و یک میکروفن زیر آبی است که برای ضبط و گوش دادن به صدای زیر آب ساخته شده است و این وسیله امواج صوتی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. قبل از این، سیستم‌های مخابراتی زیر آب بر پایه هایدروفن‌های اسکالر استوار بودند و همان‌طور که از نامشان برمی‌آید تنها قادر به اندازه‌گیری فشار میدان آکوستیکی که مؤلفه‌ای اسکالر می‌باشد هستند و هیچ‌کدام از مؤلفه‌های سرعت ذره^۲ یا میدان آکوستیکی را اندازه‌گیری نمی‌کنند [۱]. به خاطر چالش‌های فراوان در کانال مخابراتی زیر آب همچون طنین^۳، انتشار چندمسیره^۴، سرعت خیلی پایین‌تر امواج صوتی در مقایسه با امواج الکترومغناطیسی (امواج الکترومغناطیسی به سرعت در محیط زیر آب تضعیف و میرا می‌شوند)، پهنای باند کم و نویزهای محیط^۵ فراوان مخابره یا ارسال و دریافت در مخابرات زیر آب بسیار مشکل‌تر از مخابرات زمینی است. به واسطه عدم توانایی هایدروفن‌های اسکالر در اندازه‌گیری مؤلفه‌های غیراسکالر میدان آکوستیکی و همچنین جهت بهبود دقت موقعیت‌یابی منابع، هایدروفن‌های برداری جایگزین هایدروفن‌های اسکالر شدند. این توانایی هایدروفن‌های برداری، کاربردهایی از قبیل ردیابی و انهدام اهداف دشمن در کاربردهای نظامی، اقیانوس‌شناسی، پیش‌بینی حوادث و بلاهای طبیعی مرتبط با دریا و ... را تحقق می‌بخشد و پاره‌ای از مشکلات ذکر شده در مخابرات زیر آب را برطرف می‌کند [۲]. در ادامه این فصل به معرفی برخی مفاهیم پرکاربرد در این پایان‌نامه همچون هایدروفن‌های برداری و تخمین جهت ورود پرداخته و بعد از بیان تعریف مسئله و انگیزه تحقیق، در نهایت ساختار پایان‌نامه معرفی می‌شود.

¹ Hydrophone

² Particle Velocity

³ Reverberation

⁴ Multipath

⁵ Ambient Noises

۲-۱- هایدروفن‌های برداری

یک هایدروفن برداری از دو یا سه هایدروفن سرعت که به صورت فشرده و عمود برهم در راستای محورهای مختصات کارترین قرار گرفته‌اند و یک هایدروفن فشار اختیاری تشکیل شده است. هر کدام از هایدروفن‌های سرعت، یکی از مؤلفه‌های کارترین سرعت ذره‌ی میدان موج آکوستیکی را اندازه‌گیری می‌کنند و هایدروفن فشار، فشار موج آکوستیکی را به یک مقدار اسکالر تبدیل می‌نماید. لازم به ذکر است که سرعت ذره با سرعت صوت یکسان نمی‌باشد، در واقع موج آکوستیکی نسبتاً سریع حرکت می‌کند در صورتیکه ذرات حول موقعیت اصلی خودشان با سرعتی به نسبت پایین‌تر نوسان می‌کنند [۱].

بسته به کاربرد، چیدمان‌ها و ساختارهای متفاوتی از هایدروفن‌های سرعت و فشار وجود دارند که عبارتند از:

ساختار (۱) متشکل از سه هایدروفن سرعت و یک هایدروفن فشار

ساختار (۲) متشکل از سه هایدروفن سرعت

ساختار (۳) متشکل از دو هایدروفن سرعت و یک هایدروفن فشار

ساختار (۴) متشکل از دو هایدروفن سرعت

در شکل ۱-۱ نمونه‌ای از یک هایدروفن برداری نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. تصویری از یک هایدروفن برداری [۳].

توسعه سنسورهای برداری به دهه ۳۰ میلادی برمی‌گردد. در سال‌های بعد از آن، نیرو دریایی در دهه ۶۰ از این سنسورها در سیستم‌های DIFAR^۱ و DICASS^۲ استفاده نمود. در چند دهه اخیر، حجم زیادی از تحقیقات بر روی تئوری، ارزیابی عملکرد و طراحی سنسورهای برداری علی‌الخصوص در سیستم‌های سونار^۳ صورت گرفت [۳۱].

منابع نویز موجود، از جمله کشتی‌های ماهی‌گیری، قایق‌های تفریحی و منابع نویز ثابت و دائمی ناشی از منابع پیرامونی یا حتی خودی و غیره، سیگنال‌های مطلوب ناشی از منابع صوتی تحت نظر را مخفی کرده و وظیفه حسگرهای زیرآبی را در تحقق اهداف تجسس و مراقبتی مختل نمایند. حسگرهای زیرآبی اولیه‌ای که توسط نیروی دریایی استفاده شد هایدروفن‌هایی همه‌سویه^۴ ای بودند که در کاربردهای متنوعی نظیر آرایه‌های یک‌شونده^۵، آرایه‌های نصب شده بر روی بدنه کشتی‌ها، آرایه‌های ثابت یا نصب‌شده در کف دریا^۶ و سونوبوی^۷ها استفاده می‌شدند. هایدروفن‌های همه‌سویه، هایدروفن‌های فشاری هستند که فشار آکوستیکی همه جهات را به طور مساوی حس می‌کنند. همین خصوصیت باعث می‌شود که توانایی این حسگرها در تشخیص سیگنال‌های مطلوبی که تنها در جهات خاصی وارد می‌شوند از میان تداخل و نویز کاهش یابد [۲].

هایدروفن‌های برداری از این جهت که می‌توانند مؤلفه‌های اسکالر و برداری میدان آکوستیکی را در یک نقطه از فضا اندازه‌گیری کنند به گیرنده‌های چندکاناله فشرده نیز معروفند. این نوع از گیرنده‌ها با گیرنده‌های چندکاناله موجود متشکل از آرایه‌ای طویل از هایدروفن‌های فشار تفاوت دارند [۳۱].

۱-۲-۱ سطوح منعکس‌کننده^۸

هنگامی که یک موج صفحه‌ای درون سیالی در حال عبور به مرز یا سطح منعکس‌کننده‌ای برخورد می‌کند بخشی از آن منعکس می‌شود و به درون سیال برمی‌گردد و بخش دیگر آن مسیر خود را ادامه می‌دهد و از سطح واسط عبور می‌کند. اگر موج صفحه‌ای ورودی تک‌فرکانس باشد موج صفحه‌ای برگشتی نیز تک‌فرکانس با تغییراتی ظاهر شده در فاز و دامنه می‌باشد. در زمان t و موقعیت مکانی \mathbf{r} ، میدان فشار درون سیال بسته به امواج وارد شونده و منعکس شونده به وسیله معادله (۱-۱) تعریف می‌شود. در این رابطه \tilde{p} دامنه مختلط موج

¹ Directional Frequency Analysis and Recording

² Directional Command Activated Sonobuoy System

³ SONAR(SOUND NAVIGATION AND RANGING)

⁴ Omni-Directional

⁵ Towed Array

⁶ Seabed

⁷ Sonobuoy

⁸ Reflecting Boundaries

ورودی، \mathbf{k}_i و \mathbf{k}_r بردارهای عدد موج ورودی و منعکس شونده، ω فرکانس زاویه‌ای و R ضریب انعکاس هستند. معادله (۲-۱) طبق رابطه اویلر، ارتباط میان سرعت ذره، $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ و فشار، $p(\mathbf{r}, t)$ را برای امواج صفحه‌ای ورودی و منعکس شونده نمایش می‌دهد. در این رابطه ρ_0 چگالی سیال می‌باشد [۴]:

$$p_i(\mathbf{r}, t) = \tilde{p} e^{j(\omega t - \mathbf{k}_i^T \mathbf{r})}$$

$$p_r(\mathbf{r}, t) = \tilde{p} R e^{j(\omega t - \mathbf{k}_r^T \mathbf{r})} \quad (1-1)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \frac{p(\mathbf{r}, t)}{\omega \rho_0} \mathbf{k} \quad (2-1)$$

تداخل موج ورودی و موج منعکس شده با استفاده از خاصیت برهم‌نهی^۱، الگوی موجی ایستا یا ساکن در درون سیال به وجود می‌آورد. سطح منعکس کننده می‌تواند جامد یا سیال باشد، همگن یا لایه‌لایه باشد و یا حتی دارای خواصی باشد که به طور متناوب در حال تغییر باشند. با کنار گذاشتن وابستگی زمانی، میدان‌های کلی سرعت، $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ و فشار، $p(\mathbf{r})$ ، درون سیال در $\mathbf{r} = [x, y, 0]^T$ توسط معادلات زیر بیان می‌شود [۴]:

$$p(\mathbf{r}) = \tilde{p} e^{-j(k_x x + k_y y)} (1 + R e^{j 2 k_z d}) \quad (3-1)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \tilde{p} \frac{e^{-j(k_x x + k_y y)}}{\omega \rho_0} \begin{bmatrix} k_x (1 + R e^{j 2 k_z d}) \\ k_y (1 + R e^{j 2 k_z d}) \\ k_z (1 - R e^{j 2 k_z d}) \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

در این روابط d فاصله سطح منعکس کننده از هایدروفن برداری و k_x, k_y, k_z مؤلفه‌های بردار عدد موج را مشخص می‌کنند. همان طور که گفته شد R نشان‌دهنده ضریب انعکاس می‌باشد. این ضریب، تغییرات فاز و میزان تضعیف موج صفحه‌ای منعکس شده را بیان می‌کند که در حالت کلی به فرکانس و زاویه موج ورودی وابسته می‌باشد. $R = 1$ مشخص کننده سطح منعکس کننده‌ای می‌باشد که در مقابل امواج آکوستیکی انحنای پذیر یا انعطاف پذیر نباشد یا به عبارتی جابجایی یا ارتعاش نداشته باشد، به چنین سطوح منعکس کننده‌ای

¹ Superposition

مرز سخت^۱ گفته می‌شود. مثالی که برای این مشخصه می‌توان آورد بدنه کشتی‌ها در فرکانس‌های بالا می‌باشد. در نقطه مقابل، $R = -1$ مشخص‌کننده سطح منعکس‌کننده‌ای می‌باشد که در مقابل امواج آکوستیکی انحنای پذیر یا انعطاف‌پذیر باشد، به چنین سطوح منعکس‌کننده‌ای مرز عاری از فشار^۲ گفته می‌شود. مثالی که برای این مشخصه می‌توان آورد بدنه کشتی‌ها در فرکانس‌های پایین می‌باشد.

۱-۲-۲- بردار هدایت^۳ هایدروفن برداری

بردار هدایت هایدروفن‌های برداری پاسخ آن‌ها به سیگنال‌های وارده از جهت‌های مختلف می‌باشد. با تخمین بردار هدایت مربوط به تمامی سیگنال‌های وارد شونده از طریق داده دریافت شده، جهت ورود سیگنال‌های مطلوب را می‌توان تخمین زد. ابعاد و مؤلفه‌های این بردار برای ساختارهای مختلف هایدروفن برداری، قرارگیری هایدروفن در نزدیکی یا دور از سطوح منعکس‌کننده و حتی سخت یا عاری از فشار بودن این سطوح و همچنین قرار گرفتن در میدان دور یا نزدیک منابع آکوستیکی زیر آب متفاوت می‌باشد. میدان دور و نزدیک منابع آکوستیکی با دانستن فاصله هایدروفن‌ها از منابع مذکور و طول موج تولیدشده، تعیین می‌شود. با این توضیح که اگر بیشینه طول موج، خیلی کوچکتر از فاصله هایدروفن تا منبع مولد سیگنال باشد میدان دور محقق خواهد شد. بدیهی است که شرایط میدان نزدیک نقطه مقابل مواردی است که برای میدان دور برقرار است. با این توضیح که اگر کمینه طول موج، خیلی بزرگتر از فاصله هایدروفن تا منبع مولد سیگنال باشد میدان نزدیک محقق خواهد شد. بردار هدایت یک هایدروفن برداری در حالت کلی، برای شرایط میدان دور و میدان نزدیک به صورت روابط زیر است [۵]:

$$\mathbf{a}_{k, \text{far-field}}^{(x+y+z+p)}(\theta_k, \varphi_k) = \begin{bmatrix} \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \cos(\theta_k) \cos(\varphi_k) \\ \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \cos(\theta_k) \sin(\varphi_k) \\ \{1 - R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \sin(\theta_k) \\ \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \end{bmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} u_k \\ \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} v_k \\ \{1 - R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} w_k \\ \{1 + R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

¹ Rigid Boundary

² Pressure Release Boundary

³ Steering Vector

$$\mathbf{a}_{k, \text{near-field}}^{(x+y+z+p)}(\theta_k, \varphi_k) = \begin{bmatrix} \{1+R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \cos(\theta_k) \cos(\varphi_k) \\ \{1+R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \cos(\theta_k) \sin(\varphi_k) \\ \{1-R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \sin(\theta_k) \\ \{1+R(\theta_k)e^{-j\alpha_k}\} \frac{-\rho_0 c}{\sqrt{1+(\lambda/2\pi R_s)^2}} \exp(j \arctan \frac{\lambda}{2\pi R_s}) \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

در روابط بالا، $R=0$ دور از هرگونه سطح منعکس کننده، $R=1$ در نزدیکی سطوح منعکس کننده سخت و $R=-1$ در نزدیکی سطوح منعکس کننده عاری از فشار است. سه مؤلفه اول مربوط به هایدروفن‌های سرعت می‌باشند که به ترتیب در راستای محورهای x ، y و z مختصات کارتزین قرار گرفته‌اند و مؤلفه‌ی چهارم، مربوط به هایدروفن فشار قرار گرفته در مبدأ مختصات می‌باشد. در ادامه، $0 \leq \theta_k \leq \pi$ تعیین کننده زاویه فراز^۱ مربوط به سیگنال وارده از k -امین منبع می‌باشد. این زاویه نسبت به محور z اندازه‌گیری می‌شود. $0 \leq \varphi_k \leq 2\pi$ تعیین کننده زاویه افقی^۲ مربوط به سیگنال وارده از k امین منبع می‌باشد. این زاویه نسبت به جهت مثبت محور x اندازه‌گیری شده و افق را به طور کامل جاروب می‌کند که در شکل ۱-۲ تصویری از زوایای فراز و افقی نشان داده شده است. c سرعت انتشار صوت در زیر آب، R_s فاصله هایدروفن از منبع صوتی و λ مبین طول موج آکوستیکی می‌باشد [۵].

u_k ، v_k و w_k کسینوس‌های جهت^۳ به ترتیب در راستای محورهای x ، y و z در مختصات کارتزین می‌باشند. لازم به یادآوری است که کسینوس‌های جهت یک بردار، کسینوس‌های زوایای میان آن بردار و هر کدام از محورهای مختصات هستند.

۱-۳- تخمین جهت ورود (جهت یابی)^۴

همان طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، همواره تعداد نامشخصی سیگنال، در زوایای مختلف، به آرایه‌ای از هایدروفن‌ها وارد می‌شوند. الگوریتم‌های تخمین جهت ورود، با استفاده از رابطه‌ی میان بردار هدایت

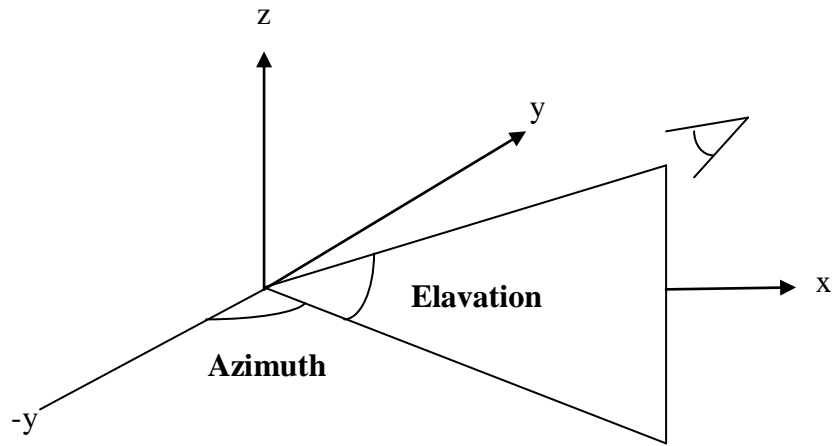
¹ Elevation Angle

² Azimuth Angle

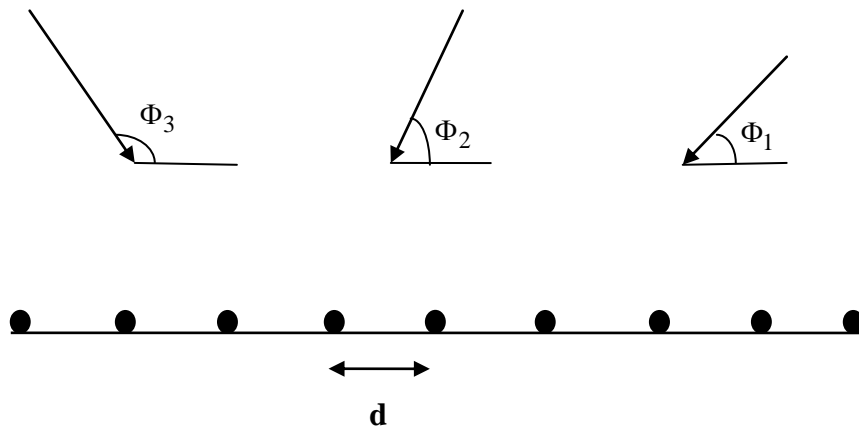
³ Direction Cosines

⁴ Direction of Arrival Estimation

آرایه و جهت سیگنال‌ها، جهت‌یابی منابع مولد سیگنال‌های آکوستیکی را محقق می‌کنند که اهدافی همچون شکل‌دهی پرتو^۱ هایدرופן‌های برداری، موقعیت‌یابی منابع و کاهش تداخل را بر عهده دارد.



شکل ۱-۲. زوایای فراز و افقی.



شکل ۱-۳. جهت‌یابی منابع آکوستیکی به وسیله آرایه‌ای از هایدرופן‌ها.

^۱ beamforming

۱-۴- تعریف مسئله و انگیزه تحقیق

یکی از چالش‌های مهم که کانال مخابراتی زیر آب با آن روبرو است متغیر با زمان بودن آن، خصوصاً در آب‌های ساحلی و کم‌عمق است. این کانال به واسطه تغییرات فصلی، ناحیه جغرافیایی و شرایط سطح دریا مدام در حال تغییر است. با توجه به این شرایط، تعیین مدل آماری نویز محیطی جمع شونده^۱ نقش مهمی در بهبود دقت جهت‌یابی سیگنال‌های صوتی زیر آب دارد که در اکثر مسائل و روش‌ها، عموماً به صورت توزیع احتمال گوسی در نظر گرفته می‌شود. البته این توزیع، یک مدل ساده و پرکاربرد در اکثر سیستم‌ها است و مسائل زیادی بر مبنای این مدل تحلیل می‌شوند و برای نویز گرمایی^۲ هم پاسخ‌گویی خوبی دارد ولی برای نویز زیر آب، از آن جایی که با استفاده از مدل نویز گوسی خطای فراوانی در جهت‌یابی سیگنال وجود داشت سعی بر آن شد که مدل مناسبی برای نویز صوتی زیر آب، در نظر گرفته شود. به دلیل وجود منابع طبیعی و ساخته دست بشر همچون طنین و نویز صنعتی^۳ در محیط زیر آب، اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که نویز زیر آب یک فرآیند غیرگوسی است. حال به واسطه این ویژگی متغیر با زمان بودن سیستم و نیز رفتار غیرگوسی منبع نویز، کارایی الگوریتم‌های جهت‌یابی که بر مبنای مدل گوسی بهینه‌شده بودند در آزمایش‌های واقعی کاهش می‌یابد [۶].

دو ویژگی اساسی فرآیند نویز محیطی زیر آب، دنباله‌دار بودن^۴ توزیع احتمال آن و نیز تغییر ویژگی‌های آماری آن مانند واریانس با زمان می‌باشد. با توجه به این ویژگی‌ها، اگر یک فرآیند تصادفی دارای قابلیت تغییر واریانس با زمان باشد، می‌تواند گزینه مناسب‌تری برای مدل‌سازی نویز زیر آب باشد. از طرفی اگر قابلیت سری‌های زمانی^۵ مدنظر قرار گیرد، سری‌های زمانی ناپایدار و متغیر با زمان گزینه مناسبی برای مدل کردن نویز زیر آب می‌باشند که در گذشته در کاربردهایی با ویژگی‌های غیرگوسی و ناپایدار همچون پدیده‌های اقتصادی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده‌اند. یکی از انواع این سری‌ها، سری‌های زمانی GARCH^۶ است که دارای خصوصیت دنباله‌دار بودن و ناپایداری از طریق روابط بازگشتی بر روی واریانس شرطی می‌باشد. این سری زمانی با توجه به ویژگی‌های آن مدل مناسبی برای نویز جمع شونده محیطی زیر آب به نظر می‌رسد که این مدل نویز در [۱۰-۶] و [۳۳] برای پردازش سیگنال آرایه‌ای و همچنین جهت‌یابی منابع صوتی زیر آب

¹ Additive Ambient Noise

² Thermal Noise

³ Industrial Noise

⁴ Heavy Tail

⁵ Time Series

⁶ Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity