بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق– مخابرات

بررسی و شبیه سازی روش‌های وفقی شکل‌دهی پرتو در آرایه‌های سونار

اکبر ترقی خواه

استادراهنما:

دکتر ناصر ندا

زمستان ۱۳۹۳

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان‌نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

تقدیم به

آنکه مهر ورزیدن را از او آموختم

تقدیم به مادرم

و تقدیم به

کسی که معرفت را در من نهادینه کرد

تقدیم به روح بزرگ پدرم

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گذاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

با درود فراوان به روح پر فتوح پدر بزرگوارم...

سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر دلسوز و مهربانم که سجده ی ایثارش گل محبت را در وجودم پروراند و دامان گهربارش لحظه های مهربانی را به من آموخت.

چکیده

سونار در واقع راداری است که کارایی آن در آب بوده و در آن به جای امواج رادیویی از امواج صوتی جهت پویش محیط استفاده می‌گردد. امواج رادیویی در فضای سطحی به خوبی و با سرعت بالایی منتشر می‌گردد لیکن امواج صوتی به سرعت انرژی خود را از دست داده و تا برد کمی منتشر می‌گردد. اما در آب چنین نیست. ویژگی‌های ذاتی موج صوتی باعث می‌شود صوت بتواند تا کیلومترها منتشر گردد این در حالی‌ست که محیط زیر آب برای اکثر طیف‌های الکترومغناطیسی محیطی مات و غیرقابل کاوش محسوب می‌شود.

یکی از چالش‌های مهم در سونار، چندگانگی مسیر و تأخیر زمانی امواج دریافتی است. لذا بررسی روش‌های شکل دهی وفقی پرتو امری ضروری است. شکل دهی وفقی پرتو روشی است که در آن پرتو ارسالی با ضرایبی وزن‌دهی می‌شود تا سیگنال مطلوب از سایر سیگنال‌های ناخواسته تفکیک داده شود.

شکل دهی پرتو فرآیندی است که با پردازش سیگنال آرایه سر و کار دارد. در این فرآیند خروجی حسگرهای آرایه به نحوی با یکدیگر ترکیب می‌گردند و بدین ترتیب انتخاب فضایی هر نقطه از محیط امکان پذیر خواهد شد. در الگوریتم‌های معمولی، سیگنال‌های نمونه برداری شده از حسگرهای آرایه به صورت خطی تأخیر داده شده و با یکدیگر جمع می‌شوند. این روش‌ها دارای یک محدودیت اساسی هستند و آن اینکه کیفیت عملکرد این روش‌ها مستقیما به اندازه فیزیکی آرایه وابسته است. روش‌های وفقی شکل‌دهی پرتو که دارای کیفیت بالایی نیز هستند، برای مقابله با این محدودیت طراحی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آرایه سونار، کانال صوتی زیر آب، شکل‌دهنده‌های پرتو وفقی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... د

فصل ۱- سونار ۱

۱-۱- مفهوم سونار ۱

۱-۲- تاریخچه ۱

۱-۳- انواع سونار ۲

۱-۳-۱- سونار فعال ۲

۱-۳-۲- سونار غیرفعال ۳

فصل ۲- کانال صوتی زیر آب ۵

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- انتشار امواج ۵

۲-۳- توزیع سرعت صوت ۵

۲-۴- وابستگی سرعت صوت به دما، شوری و عمق ۷

۲-۵- چندگانگی مسیر و اثر داپلر ۹

۲-۶- نویز ۱۰

۲-۷- جذب صوت در آب ۱۱

۲-۷-۱- مدل شالکین و مارش ۱۱

۲-۷-۲- مدل تورپ ۱۱

۲-۷-۳- مدل ملن ۱۱

۲-۷-۴- مدل گریسون-ارلی-وین ۱۲

۲-۷-۵- مدل سیمونز و فیشر ۱۲

۲-۷-۶- مدل فرانکو و گریسون ۱۳

۲-۸- تلفات گستردگی ۱۷

۲-۹- انکسار ۱۷

فصل ۳- مقدمهای بر روشهای پردازش آرایه ۱۸
۳-۱- مقدمه ۱۸
۳-۲- ساختار آرایه ۱۸
۳-۳- خواص زمانی –مکانی سیگنال و تداخل ۱۹
۳-۳-۱- سیگنال قطعی ۲۰
۳-۳-۲- سیگنال اتفاقی ۲۱
۳-۴- روشهای شکلدهی وفقی پرتو ۲۱
فصل ۴- شکل دهی وفقی پرتو ۲۵
۴-۱- مدل مشاهده ۲۷
۴-۱-۱- مدل حوزه زمان ۲۷
۴-۱-۲- مدل حوزه فرکانس ۲۷
۴-۲- شکلدهندهی پرتو بهینه ۲۷
۴-۲-۱- شکلدهندهی پرتوی MVDR یا Capon ۲۸
۴-۲-۲- شکلدهندهی پرتو MPDR ۳۰
۴-۲-۳- سیگنالهای ورودی چندگانه ۳۰
۴-۲-۴- شبیهسازی کامپیوتری ۳۲
۴-۳- شکلدهندهی پرتو وفقی ۳۵
۴-۳-۱- شکلدهندهی پرتو وفقی SMI ۳۵
۴-۳-۲- الگوریتم LMS ۴۰
۴-۳-۳- الگوریتم RLS ۴۴
فصل ۵- نتیجهگیری و پیشنهادات ۵۱
۵-۱- نتیجهگیری ۵۱
۵-۲- پیشنهادات ۵۱
ضمیمه أ- برنامه شکلدهندهی پرتوی بهینهی MVDR ۵۲
ضمیمه ج- برنامه شکلدهندهی وفقی پرتو SMI ۵۴
ضمیمه ه- برنامه شکلدهندهی وفقی پرتو LMS ۵۶

ضمیمه و- برنامه شکلدهندهی وفقی پرتو RLS.....۵۸
فهرست مراجع ۶۰
واژه نامه فارسی به انگلیسی.....۶۳
واژه نامه انگلیسی به فارسی.....۶۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: سونار فعال ۲
شکل ۱-۲: سونار غیرفعال ۴
شکل ۲-۱: توزیع سرعت صوت در لایه‌های مختلف زیر آب [۲]..... ۶
شکل ۲-۲: مقایسه دما و عمق [۵]..... ۷
شکل ۲-۳: مقایسه سرعت صوت و عمق [۵] ۸
شکل ۲-۴: مقایسه سرعت صوت و شوری آب [۵]..... ۸
شکل ۲-۵: اثرات چندگانگی مسیر و داپلر در کانال صوتی زیر آب [۱۱]..... ۹
شکل ۲-۶: مدلهای تجربی (a)تورپ ، (b)شالکین و مارش ، (c)فرانکو و گریسون برای حوزه‌های فرکانسی مختلف [۵] ۱۴
شکل ۲-۷: نمودار کلی سه فرآیند واهلشی اسیدبوریک، سولفات منیزیم و آب خالص [۵] ۱۵
شکل ۲-۸: نمودار تلفات جذب برای تغییرات شوری آب و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد [۵]..... ۱۶
شکل ۲-۹: نمودار تلفات جذب برای تغییرات شوری آب و دمای ۳۰ درجه سانتیگراد [۵]..... ۱۶
شکل ۳-۱: برخی از ساختارهای آرایه [۱۸]..... ۱۹
شکل ۳-۲: یک سیگنال موج-صفحه‌ای با راستای $\boldsymbol{\theta}$ [۱۸] ۲۰
شکل ۳-۳: طیف فرکانس-عدد موج [۱۸] ۲۰
شکل ۳-۴: ساختارهای مختلف آرایه در شکل‌دهی پرتو [۱۸] ۲۲
شکل ۳-۵: ساختار پردازشگر MVDR [۱۸] ۲۳
شکل ۴-۱: سیگنال‌های موج-صفحه‌ای چندگانه [۱۸]..... ۲۵
شکل ۴-۲: محیط چندمسیری [۱۸]..... ۲۶
شکل ۴-۳: مدل تداخل گسسته [۱۸]..... ۲۶
شکل ۴-۴: پردازشگر ماتریسی ۲۸
شکل ۴-۵: شکل‌دهنده‌ی پرتوی بهینه MVDR..... ۳۳
شکل ۴-۶: شکل‌دهنده‌ی پرتوی بهینه MPDR..... ۳۳
شکل ۴-۷: طیف زاویه‌ای شکل‌دهنده‌ی پرتوی بهینه MVDR، با بکارگیری ماتریس کوواریانس $\boldsymbol{Rn}$.. ۳۴

شکل ۴-۸: طیف زاویه‌ای شکل‌دهنده‌ی پرتوی بهینه MPDR، با بکارگیری ماتریس کوواریانس $\boldsymbol{Rx}$... ۳۴
شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام شکل‌دهنده‌ی SMI [۱۸] ۳۶
شکل ۴-۱۰: شکل‌دهنده‌ی پرتو SMI-MVDR؛ پترن وفقی با 2N و 6N نمونه ۳۸
شکل ۴-۱۱: شکل‌دهنده‌ی پرتو SMI-MPDR؛ پترن وفقی با 2N و 6N نمونه ۳۹
شکل ۴-۱۲: شکل‌دهنده‌ی پرتو SMI-MVDR؛ پترن وفقی برای دو تداخل با $\boldsymbol{K = 6}$ و بارگذاری قطری $\boldsymbol{\sigma L2 = -20\ dB}$ ۳۹
شکل ۴-۱۳: یک سیستم وفقی حلقه-بسته ۴۰
شکل ۴-۱۴: پترن شکل‌دهنده‌ی پرتو وفقی LMS ۴۳
شکل ۴-۱۵: میانگین مربعات خطای LMS ۴۳
شکل ۴-۱۶: شکل‌دهنده‌ی پرتو وفقی RLS ۴۹
شکل ۴-۱۷: میانگین مربعات خطای RLS ۵۰

فصل ۱– سونار

۱–۱– مفهوم سونار

مفهوم سونار[۱] از جنگ جهانی دوم سرچشمه گرفته است که برگرفته از مخفف Sound Navigation and Ranging[۲] است، که فرآیند تشخیص و مکان یک شئ با دریافت صدای ساطع شده از شئ (فرآیند سونار غیرفعال[۳]) یا با دریافت پژواک منعکس شده از یک شئ، از طریق یک فرآیند تشخیص فاصله صوت (فرآیند سونار فعال[۴]) می باشد. با این حال تشخیص اشیا توسط صوت مربوط به قرن نوزدهم و با از بین رفتن کشتی مسافری تایتانیک[۵] و فعالیت زیردریایی‌ها در طول جنگ جهانی اول است که تحولاتی در فناوری سونار و کاربرد آن صورت گرفت.

۱–۲– تاریخچه

در سال ۱۹۰۶، اولین سونار غیرفعال جهت شناسایی توده‌های یخ توسط لوییس نیکسون اختراع گردید. در جنگ جهانی اول به علت نیاز به شناسایی اهداف دریایی تمایل به استفاده از سونار افزایش یافت. پاول لانگوین[۶] فرانسوی به همراه کنستانتین چلوسکی[۷] روس موفق به اختراع اولین سونار فعال در سال ۱۹۱۵ شدند. اگرچه مبدل‌های پیزوالکتریک[۸] نسبت به این سونار ترجیح داده شدند، اما در جای خود این نوع سونارها آینده روشنی را در علم رادار شناسی باز کردند.

در سال ۱۹۱۶ زیر نظر بخش تحقیقاتی و اختراعات ناوگان دریایی بریتانیا، رابرت ویلیام بویل[۹] (فیزیکدان کانادایی)، پروژه‌ای را بر عهده گرفت و با تشکیل کمیته تحقیقاتی تشخیص ضد زیر دریایی، موفق به ساخت نمونه آزمایشی شدند که با نام مخفف ASDIC شناخته شد. در سال ۱۹۱۸ انگلیس و ایالات متحده متفقا موفق به ساخت سیستم‌های مجهز به سونار فعال گشتند و در سال ۱۹۲۳ تولید این نوع سونارها به طور رسمی آغاز گشت.

---

[1] SONAR

[۲] ناوبری و تشخیص فاصله توسط صوت

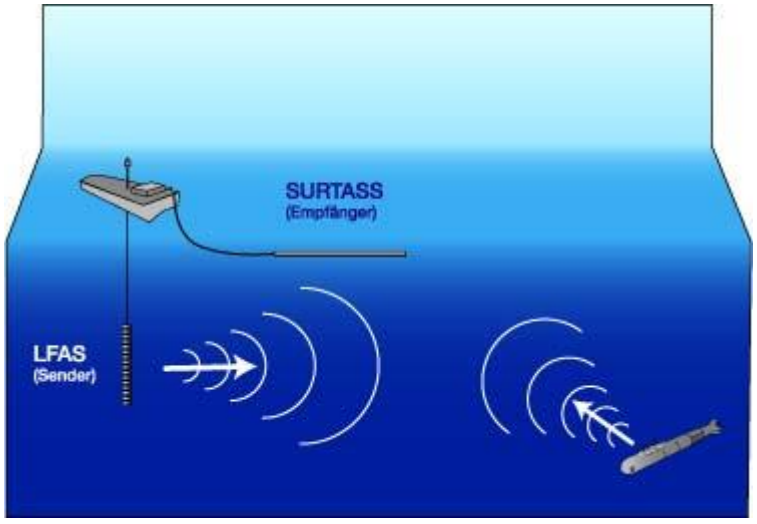
[3] Passive Sonar
[4] Active Sonar
[5] Titanic
[6] Paul Langevin
[7] Constantin Chilowski
[8] Piezoelectric
[9] Robert William Boyle

پس از جنگ جهانی دوم ناوگان آمریکا اقدام به تولید کشتی‌ها و زیر دریایی‌هایی که دارای فناوری معروف به ماهی کوچک بودند، کرد.

۱-۳- انواع سونار

۱-۳-۱- سونار فعال

با ایجاد پالس های صوتی معروف به پینگ[1] و گوش کردن به پالس بازگشتی عمل می کند، یعنی این نوع فرستنده از یک اسیلاتور با فرکانس بالا و یک تقویت کننده تشکیل شده است که فرستنده یک پالس با انرژی کم را به دستگاه ترنسدیوسر[2] برای ارسال به داخل آب تغذیه می‌کند سپس پژواک برگشتی را دریافت می‌کند (شکل ۱-۱). ترنسدیوسر دستگاهی است که یک نوع انرژی را به انرژی دیگر تبدیل می‌کند که در سیستم سونار فعال انرژی الکتریکی را به انرژی صوتی تبدیل می‌کند سپس در پژواک دریافتی برای نمایش دادن انرژی صوتی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، بدین ترتیب هر دو عمل میکروفون و بلندگو را انجام می‌دهد. بعضی از انواع آن عبارتند از:



شکل ۱-۱: سونار فعال

الف) سونارهای نورافکن[3]: سونارهای فعال اولیه اصول نورافکن را برای مخابره صوت به کار می‌بردند. ترنسدیوسر مانند نورافکن به قسمت معینی چرخانده می‌شود تا امواج صوتی در آن جهت مخابره شود. پرتو صوتی بسیار نازک بوده (در حدود ۵ درجه) و در نتیجه فقط قسمت کوچکی از آب‌های اطراف پژواک دریافت می شود. معایب این نوع سونار بررسی زاویه خاصی است که امکان فرار را برای فرار زیر دریایی

[1] Ping
[2] Transducers
[3] Searchlight Sonar

فراهم می‌کند و از معایب دیگر به دست آوردن اطلاعات فقط به صورت سمعی بوده در حالی که سونارهای امروزی اطلاعات را هم به صورت سمعی و هم به صورت بصری در اختیار می‌گذارند.

ب) سونارهای همه جانبه[1]: ناوهای ضد زیردریایی و زیردریایی های مدرن با سونارهای همه جانبه که پالس صوتی را در تمام جهات مخابره می‌کند مجهز می‌باشند. سونارهای همه جانبه که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند انرژی قابل ملاحظه‌ای تولید نموده که که برای ارسال امواج در ۳۶۰ درجه در یک آن کافی می‌باشد. طرز کار سونارهای فعال مدرن را با تقسیم بندی به سه قسمت می‌توان بررسی کرد:

۱) ارسال امواج: ارسال پالس‌های صوتی از قسمت کنترل که دارای کلیدهای ضروری می‌باشد، سرچشمه می‌گیرد. طول پالس نیز توسط اپراتور در هر قسمت کنترل می‌شود.

۲) دریافت امواج: چنانچه امواج صوتی مخابره شده به شیئ که دارای خاصیت منعکس نمودن به اندازه کافی باشد برخورد کنند یک قسمت کوچک از این علائم به ترنسدیوسر بر می‌گردد. در داخل ترنسدیوسر علائم صوتی در اثر خواص پیزوالکتریک به علائم الکتریکی تبدیل می‌شود سپس در تقویت کننده‌ها تقویت می‌شود و بعد از تقویت اولیه علائم به سوئیچ‌های همه جانبه سمعی و بصری که در داخل گیرنده همه جانبه قرار دارد فرستاده می‌شود.

۳) نمایش: برای آنکه پژواک های بازگشتی مورد استفاده قرار گیرند بایستی طوری نمایش داده شوند که اپراتور سونار بتواند اطلاعات به دست آمده را تفسیر نماید. در این قسمت از سیستم ODN[2] جهت خنثی نمودن اثر داپلر[3] استفاده می‌شود. پس از آنکه انرژی خروجی سوئیچ همه جانبه بصری به قسمت بصری گیرنده تغذیه شد در صفحه سونار در روی لامپ اشعه کاتدی نمایش داده می شود.

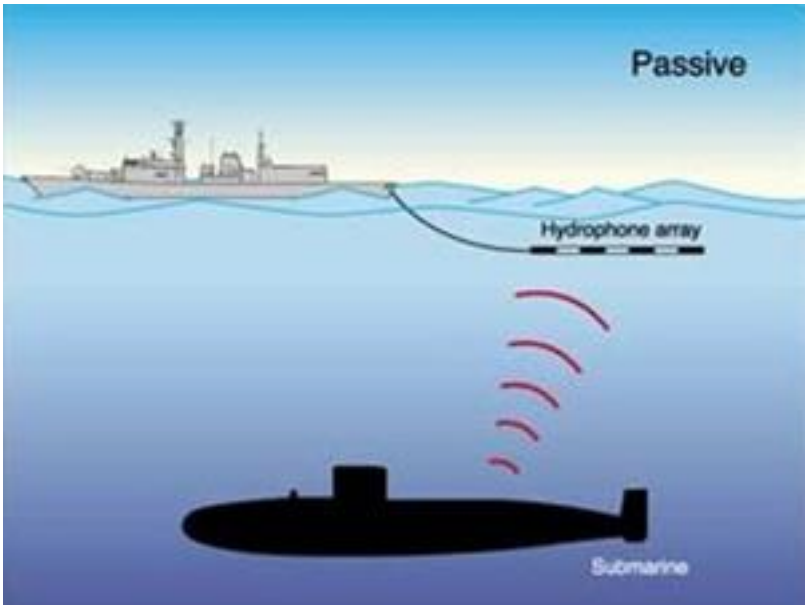
برای تشخیص فاصله از هدف می‌توان مدت زمان ارسال و دریافت پالس را اندازه گیری کرد. برای اندازه گیری جهت و راستای هدف می‌توان از هیدروفون‌های[4] مختلف استفاده کرد و سپس زمان دریافت پالس توسط هر یک از این هیدروفون‌ها را اندازه گیری کرد و با مقایسه این زمان‌ها جهت و راستای هدف را مشخص کرد. رابطه بین فرکانس و مسافت بدین صورت است که برای مسافت‌های طولانی از فرکانس‌های پایین استفاده می‌کنیم.

۱-۳-۲- سونار غیرفعال

همانطور که از اسم آن پیداست سونار غیرفعال روی صدای هدف به عنوان منبع تولید صوت به جای بازگشت پژواک امواج ارسالی تکیه می‌کند (شکل ۱-۲). در نتیجه هیدروفون‌های بسیار حساس جهت

[1] Scaning Sonar
[2] Own Doppler Nallifier
[3] Doppler Shift
[4] Hydrophones

اکتشاف هدف در فاصله‌های دور به کار برده می‌شود. گرچه سونار غیرفعال معمولا توسط زیر دریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی تعداد زیادی از ناوها از سیستم سونار غیرفعال نیز استفاده می‌کنند که دارای ترنسدیوسرهای غیرفعال می‌باشد. دریافت پژواک در این نوع سونارها با سونار فعال هیچ فرقی نخواهد داشت، فقط ارسال امواج در سیستم سونار غیرفعال نخواهیم داشت. بخش اصلی سونار غیرفعال هیدروفون‌ها می‌باشد. سونار غیرفعال تنوع سونار فعال را ندارد اما اغلب کار یکسانی دارند.



شکل ۱-۲: سونار غیرفعال

چون کانال ارتباطی سونار در آب می‌باشد بنابراین لازم است خصوصیات کانال و عوامل مزاحم در کانال صوتی را مورد بررسی قرار دهیم.

فصل ۲– کانال صوتی زیر آب

۲–۱– مقدمه

اصوات همانند نور به صورت موجی منتشر می‌شوند و البته برخلاف نور برای آن که بتوانند منتشر شوند نیاز به محیط مادی دارند.

فشار اعمال شده به یک نقطه ماده موجب به حرکت در آوردن ذرات موجود در آن نقطه می‌شود. ارتعاشات حاصله در این ذرات که در اثر فشار اولیه ایجاد شده‌اند موجب ارتعاش ذرات مجاور خود می‌شوند. به همین طریق انرژی صوتی از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌شود. بنابراین با توجه به مطالب بالا امواج صوتی برخلاف نور برای آن که بتوانند منتشر شوند لازم است در یک محیط مادی واقع شوند. در مورد امواج نوری این فوتون‌های نوری هستند که از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌شوند. همان‌طور که گفته شد صوت به صورت مادی منتقل می‌شود و لذا هر نوع صوتی دارای فرکانس خاصی می‌باشد.

طیف امواج صوتی به صورت زیر تقسیم می‌شوند:

۱- امواج صوتی با فرکانس کمتر از ۲۰ هرتز را امواج مادون صوتی می‌نامند.

۲- امواج صوتی با فرکانس بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را امواج شنوایی می‌نامند.

۳- امواج صوتی با فرکانس بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز را امواج ماوراء صوت یا اولتراسوند می‌نامند.

۲–۲– انتشار امواج

امواج اولتراسونیک فقط می‌توانند در اجسام انتشار یابند و در خلاء قابل انتشار نمی‌باشند. انتشار این امواج در اجسام به وسیله حرکت و جا به جایی مولکول‌های آن صورت می‌گیرد. تقریبا هر ماده‌ای که قابلیت ارتجاع دارد می‌تواند امواج اولتراسونیک را از خود عبور دهد و این انتشار به وسیله حرکت مولکولی و انتقال دادن آن به مولکول‌های بعدی صورت می‌گیرد.

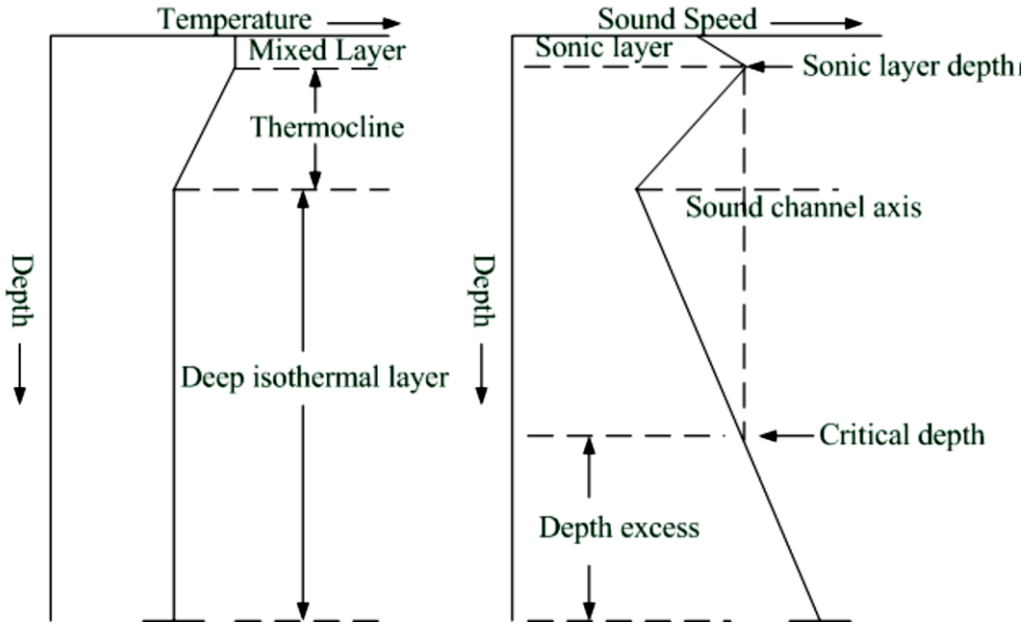
۲–۳– توزیع سرعت صوت

سرعت صوت در آب دریا یک متغیر بنیادی اقیانوس‌هاست که رفتار انتشار صوت در اقیانوس را تعیین می‌کند. بسیاری از فرمول‌های تجربی در طول سال‌ها برای محاسبه سرعت صوت با استفاده از مقادیر دمای آب، شوری و فشار (عمق) توسعه یافته است. یک بیان ساده شده برای سرعت صوت به صورت رابطه (۲-۱) است:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (۱-۲)$$

که در آن c سرعت صوت در آب دریا، T دمای آب بر حسب درجه سلسیوس، S شوری آب بر حسب ppt[1] و D عمق بر حسب متر می‌باشد که رابطه بالا برای موارد بسیاری به اندازه کافی دقیق می‌باشد.

طبق مشخصه‌های متفاوت آب دریا، نمایه‌های سرعت صوت می‌تواند به لایه‌های یکسانی تقسیم شود. همانطور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است در سمت چپ شکل با افزایش عمق دما کاهش می‌یابد که دمای سطح آب برای مناطق مختلف بین ۳۲ درجه سلسیوس تا ۲- درجه سلسیوس متفاوت می‌باشد. به لایه‌ای از عمق آب که دما به یکباره از دمای ۳۲ درجه سلسیوس به ۴ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد ترموکلاین[2] گفته می‌شود. بعد از این لایه دمای عمق آب تقریبا ثابت (معمولا ۴ درجه سلسیوس) می‌ماند ولی فشار آب افزایش می‌یابد. در سمت راست شکل هم سرعت صوت برای لایه های مختلف متفاوت می‌باشد. در لایه اول سرعت صوت ابتدا افزایش می‌یابد ولی در لایه ترموکلاین با کاهش دما سرعت صوت هم کاهش می‌یابد تا جایی که دما ثابت می‌ماند ولی فشار آب افزایش می‌یابد که باعث افزایش سرعت صوت می‌شود. در ارتباط صوتی زیرآب اثراتی از جمله چندگانگی مسیر، اثر داپلر ، نویز و جذب فرکانس اختلالاتی در انتشار امواج صوتی در کانال آب‌های کم عمق ایجاد می‌کند به طوری که باعث کاهش انرژی موج انتشار یافته می‌شود.



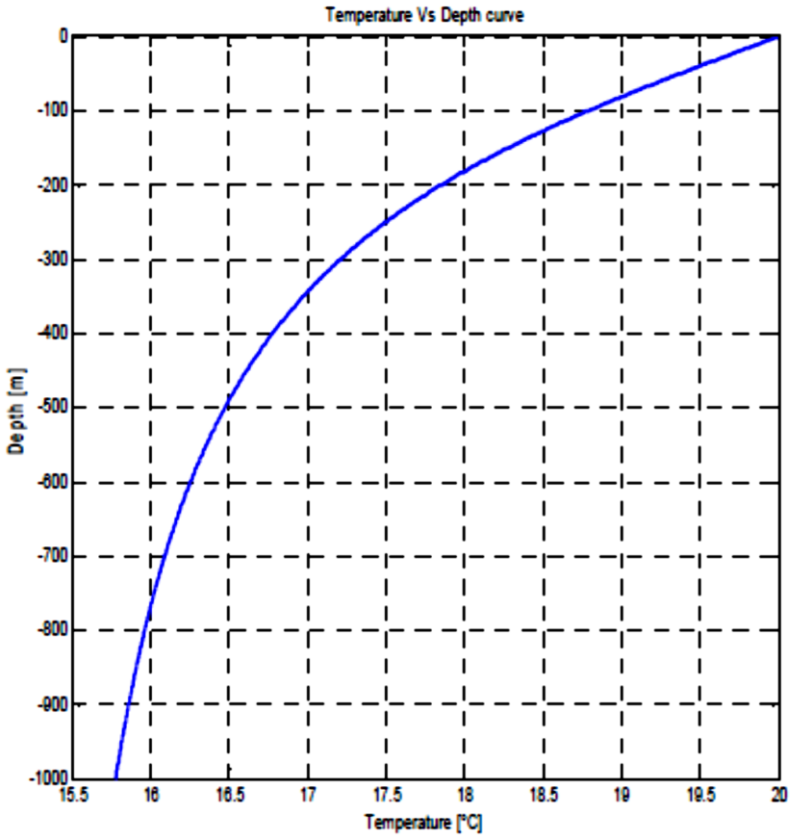
شکل ۲-۱: توزیع سرعت صوت در لایه‌های مختلف زیر آب [۲]

[1] Part per thousand

[2] Thermocline

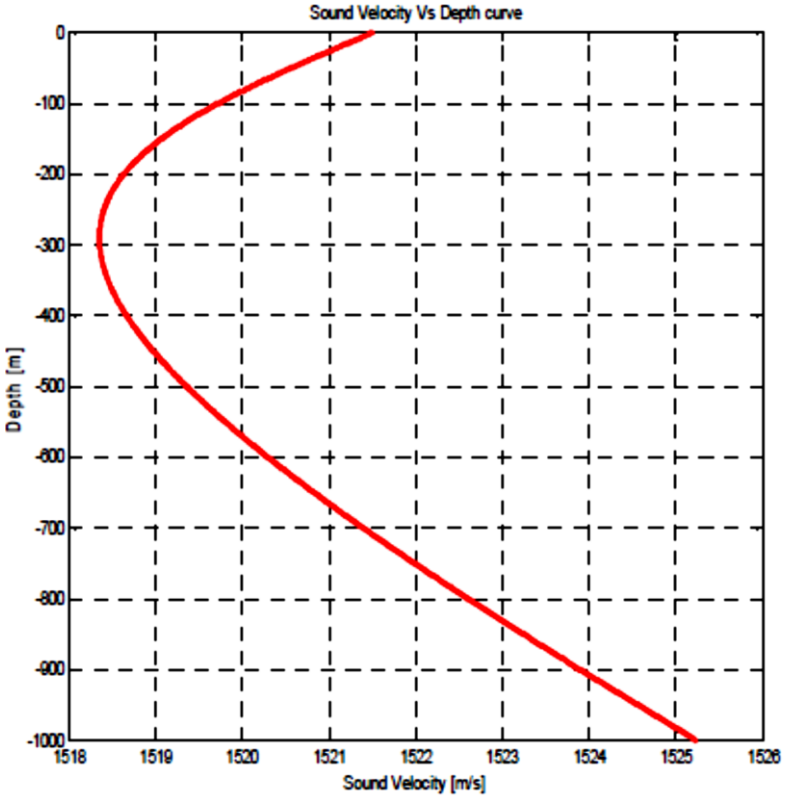
۲-۴- وابستگی سرعت صوت به دما، شوری و عمق

شکل ۲-۲ مشخصات دمای معمولی دمای بالای سطح دریا نسبت به دمای بستر دریا را نشان می‌دهد. از اینجا می‌توان دید که دما با افزایش عمق تا عمق ۳۰۰ متری کاهش می‌یابد سپس تقریبا ثابت می‌ماند. این مشخصات دریا در تابستان است.

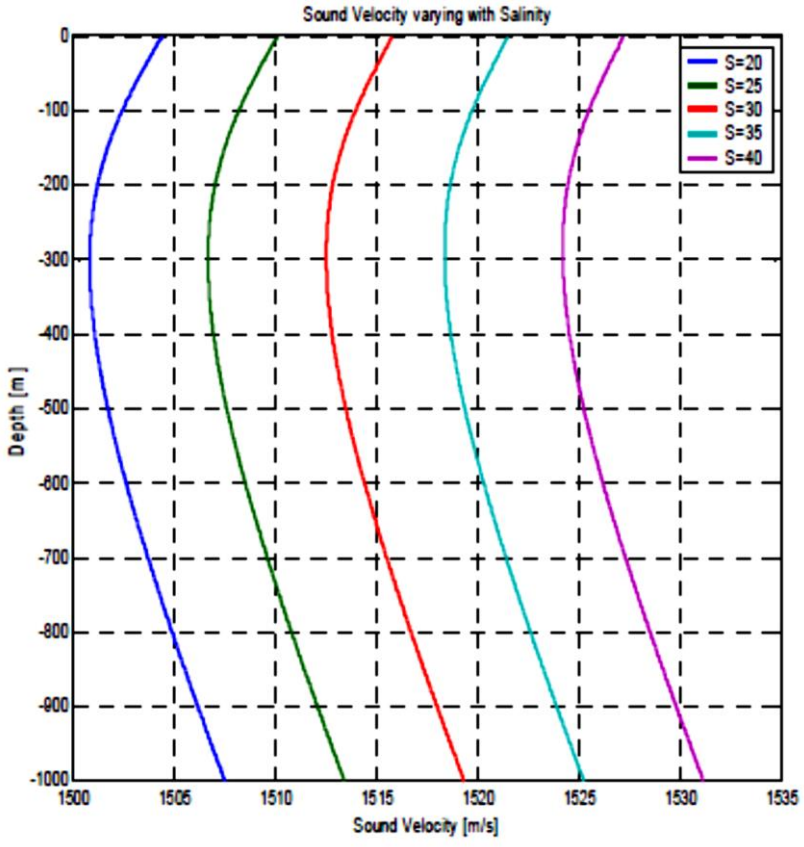


شکل ۲-۲: مقایسه دما و عمق [۵]

سرعت صوت با دما، شوری و عمق متفاوت است. اثر دما و فشار آب روی سرعت صوت در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود به سه ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول، دما بر سرعت صوت غالب است. در ناحیه دوم یا ناحیه گذرا (تغییر از یک حالت به حالت دیگر)، دما و عمق هر دو بر سرعت صوت غالب هستند. در ناحیه سوم، سرعت صوت کاملا به عمق بستگی دارد. این سه ناحیه در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، ناحیه اول تا عمق ۲۰۰ متری، ناحیه گذرا از عمق ۲۰۰ متری تا ۴۰۰ متری و ناحیه سوم از عمق ۴۰۰ متری تا بستر دریا می‌باشد.



شکل ۲-۳: مقایسه سرعت صوت و عمق [۵]



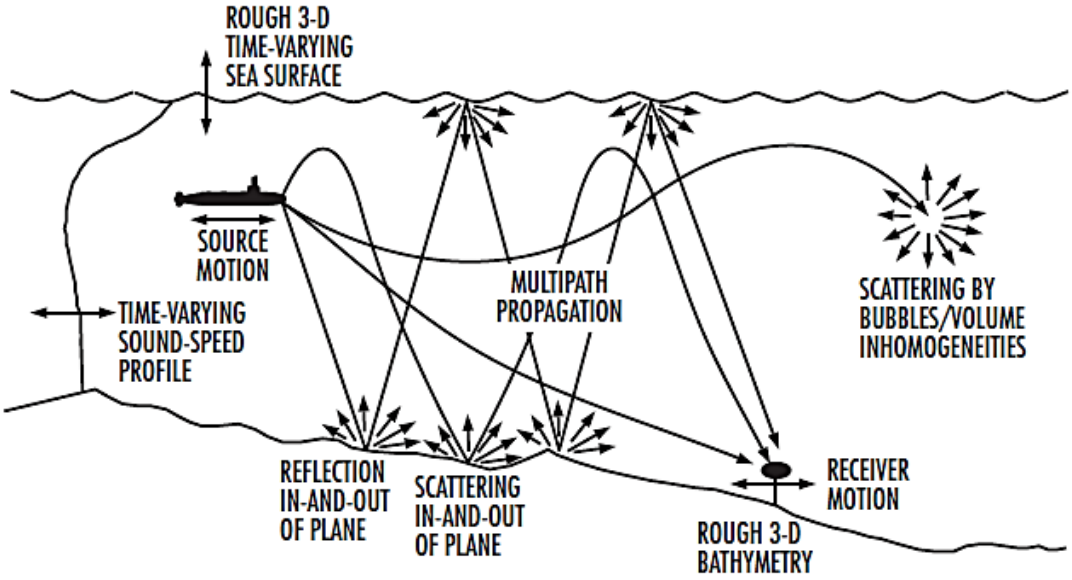
شکل ۲-۴: مقایسه سرعت صوت و شوری آب [۵]

وابستگی سرعت صوت به شوری آب (S) نیز در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. در اینجا نیز، با افزایش شوری آب، سرعت صوت نیز طبق مشخصات شکل افزایش می‌یابد.

۲-۵- چندگانگی مسیر[1] و اثر داپلر

چندگانگی مسیر به دلیل انعکاس موج از سطح و کف دریا رخ می‌دهد. گیرنده سیگنال‌های متعددی را از سیگنال دید مستقیم و انعکاس یافته از سطح و کف دریا را دریافت می‌کند. اما ممکن است موج‌های دید مستقیم مختلفی در زمان‌های متفاوت به گیرنده برسد که بستگی به این دارد که موج چقدر خم شده است. تاخیر زمانی طولانی با این واقعیت ایجاد می‌شود که سرعت صوت در زیر آب در حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است که به مراتب پایین‌تر از سرعت موج رادیویی که در حدود ۳×۱۰^{۸} متر بر ثانیه است.

همان‌طور که در شکل ۲-۷ ملاحظه می شود اثرات چندگانگی مسیر از طریق انعکاس از سطح و انعکاس از کف دریا موجب می‌شود که دو فاکتور مهمی هستند که ارسال قابل اطمینان در کانال‌های ارتباطی صوتی آب‌های کم عمق را تحت تأثیر قرار می‌دهد که منجر به ISI[2] می‌شود، همچنین اثر داپلر از طریق حرکت فرستنده و گیرنده موجب می‌شود.



شکل ۲-۵: اثرات چندگانگی مسیر و داپلر در کانال صوتی زیر آب [۱۱]

موجی که در اثر برخورد با جسمی منعکس می‌شود اگر جسم ثابت باشد فرکانس موج رفت و برگشتی یکسان خواهد بود اما اگر جسم به طرف انعکاس حرکت کند موج منعکس متراکم تر خواهد شد و فرکانس

[1] Multipath
[2] Intersymbol interference