



دانشکده‌ی مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی

مهندسی برق-مخابرات سیستم

بررسی و شبیه‌سازی سونارهای روزنه مصنوعی

به کوشش

حسین خورسند

استاد راهنما

دکتر محمد علی مسندی شیرازی

اسفندماه ۹۳

سِعْرُ الْبَدْرِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

به نام خدا

## اظہار نامہ

اینجانب حسین خورسند (۹۰۰۷۱۹) دانشجوی رشته‌ی مهندسی برق گرایش  
مخابرات سیستم دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر اظہار می‌نمایم که این  
پایان‌نامہ حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران  
استفادہ کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل را نوشته‌ام. همچنین اظہار  
می‌کنم کہ تحقیق و موضوع پایان‌نامہ‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم کہ  
بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر  
قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین‌نامہ مالکیت فکری و معنوی  
متعلق بہ دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی : حسین خورسند

تاریخ و امضا :

به نام خدا

بررسی و شبیه‌سازی سونارهای روزنه مصنوعی

به کوشش

حسین خورسند

پایان نامه‌ی

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم

برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی

مهندسی برق-مخابرات سیستم

دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته‌ی پایان نامه، با درجه‌ی: بسیار خوب

دکتر محمد علی مسندی شیرازی، استاد بخش مخابرات و الکترونیک (استاد راهنما).....

دکتر محمود کریمی، دانشیار بخش مخابرات و الکترونیک (استاد مشاور).....

دکتر مهران یزدی، دانشیار بخش مخابرات و الکترونیک (داور متخصص داخلی).....

اسفندماه ۹۳

سپاس خدای را که هرچه دارم از اوست

و تقدیم به پدر و مادر عزیز

و همسر مهربانم بخاطر دلگرمی وجودش

## سپاسگزاری

با سپاس فراوان از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی استاد ارجمند جناب آقای دکتر مسندی که صمیمانه مرا در طی انجام این پایان‌نامه راهنمایی کردند.

## چکیده

### بررسی و شبیه‌سازی سونارهای روزنه مصنوعی

به کوشش

حسین خورسند

امروزه سنجش از راه دور به منظور مطالعه‌ی زمین و مدیریت منابع آن کاملاً ضروری می‌باشد. ولی تقریباً ۷۰٪ از سطح زمین از آب پوشیده شده و تنها ابزار مناسب سنجش از راه دور در زیر آب سونار می‌باشد. تصویربرداری به کمک سونارهای معمولی بر اساس دامنه‌ی سیگنال بازگشتی از هدف انجام می‌شود، ولی می‌توان با استفاده از تکنیک روزنه مصنوعی علاوه بر دامنه‌ی سیگنال، فاز اکوهای بازگشتی از هدف را نیز ذخیره نمود و اکوها را پس از چند پردازش سیگنال به صورت همفاز با یکدیگر جمع نمود تا بدون نیاز به افزایش فرکانس و یا طول آرایه‌ی سونار، به تصویری با رزولوشن سمت بهتر و مستقل از برد دست یافت. این پایان‌نامه به ارائه شبیه‌سازی سونارهای روزنه مصنوعی می‌پردازد و اثرات ناشی از کم بودن سرعت صوت در آب نسبت به امواج الکترومغناطیس در فضا، انعکاس امواج صوت از سطح و کف دریا و ایجاد پدیده‌ی چند مسیری، حساسیت سونارهای روزنه مصنوعی به نوسانات ناشی از امواج آب و نیاز به جبران‌سازی و محدودیت‌های موجود در سرعت حرکت سونار می‌پردازد. همچنین سه مورد از محبوب‌ترین الگوریتم‌های تشکیل تصویر روزنه مصنوعی بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده سونار روزنه مصنوعی تست می‌شود و مزایا و معایب هر کدام توضیح داده می‌شود. در نهایت کارایی الگوریتم مهاجرت برد، به عنوان بهترین انتخاب برای تشکیل تصویر سونار روزنه مصنوعی، بر روی داده‌های واقعی بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی : سونار روزنه مصنوعی ، تصویربرداری سونار، الگوریتم‌های تشکیل تصویر

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول. مقدمه</b>
۲	۱-۱- تصویربرداری زیر آب
۲	۲-۱- سونار
۴	۳-۱- سونار اسکن جانبی
۵	۱-۳-۱- سونار اسکن جانبی معمولی (روزنه حقیقی)
۶	۲-۳-۱- سونار اسکن جانبی روزنه مصنوعی
۷	۴-۱- نگاهی به فصول پایان نامه
	<b>فصل دوم. مبانی سونار روزنه مصنوعی</b>
۹	۱-۲- مقدمه
۹	۲-۲- مبانی سونار
۹	۱-۲-۲- معادله سونار
۱۵	۲-۲-۲- برد و رزولوشن برد
۱۶	۳-۲-۲- فرکانس تکرار پالس و ابهام برد
۱۶	۴-۲-۲- سمت و رزولوشن سمت
۱۸	۳-۲- سونار روزنه مصنوعی SAS
۱۹	۱-۳-۲- رزولوشن سمت سونار روزنه مصنوعی
۲۰	۴-۲- حالت های مختلف عملکرد سونار روزنه مصنوعی



۲-۵-۵- محدودیت های سونار روزنه مصنوعی .....	۲۲
۲-۵-۱- همفاز بودن سیگنال در محیط .....	۲۲
۲-۵-۲- ابهام در برد سونار روزنه مصنوعی .....	۲۳
۲-۵-۳- خطای حرکت در سونار روزنه مصنوعی .....	۲۴

### فصل سوم. الگوریتم های تشکیل تصویر

۳-۱- مقدمه .....	۲۷
۳-۲- مدل تصویر برداری سونار روزنه مصنوعی در حالت استریپ مپ .....	۲۷
۳-۲-۱- اثر الگوی آنتن محدود روی پاسخ هدف .....	۲۸
۳-۲-۲- مدل داده خام برای سونار روزنه مصنوعی .....	۳۰
۳-۳- الگوریتم برد-داپلر .....	۳۱
۳-۳-۱- فشرده سازی برد .....	۳۲
۳-۳-۲- تبدیل فوریه در راستای سمت .....	۳۳
۳-۳-۳- اصلاح مهاجرت سلول برد .....	۳۴
۳-۳-۴- فشرده سازی سمت .....	۳۵
۳-۳-۵- اصلاحات مورد نیاز سیستم با روزنه مصنوعی طولانی .....	۳۶
۳-۴- الگوریتم مهاجرت برد .....	۳۷
۳-۴-۱- ضرب تابع مرجع .....	۳۸
۳-۴-۲- درونیابی استولت .....	۳۸

۳-۵- الگوریتم مقیاس‌بندی چیرپ.....	۳۹
۳-۵-۱- تبدیل فوریه در راستای سمت و ضریب اول.....	۴۱
۳-۵-۲- تبدیل فوریه برد و ضریب دوم.....	۴۲
۳-۵-۳- عکس تبدیل فوریه سمت و ضریب سوم.....	۴۲

### فصل چهارم. شبیه‌سازی و نتایج آن

۴-۱- مقدمه.....	۴۵
۴-۲- نتایج داده‌های شبیه‌سازی.....	۴۵
۴-۲-۱- شبیه‌سازی هدف نقطه‌ای و تشکیل تصویر آن.....	۴۶
۴-۲-۲- شبیه‌سازی اثر نمونه برداری در راستای برد.....	۵۹
۴-۲-۳- شبیه‌سازی اثر خطای جابجایی عرضی.....	۶۱
۴-۲-۴- اثر چند مسیری بر روی داده‌های سونار روزنه مصنوعی.....	۶۵
۴-۳- تشکیل تصویر داده‌های واقعی.....	۷۶

### فصل پنجم. نتیجه‌گیری

۵-۱- خلاصه‌ی مطالب و نتیجه‌گیری.....	۸۰
۵-۲- پیشنهادها و کارهای آینده.....	۸۱
فهرست منابع و مآخذ.....	۸۳

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۵.....	جدول شماره ۱-۴: مشخصات سونار روزنه مصنوعی دارپا
۵۹.....	جدول شماره ۲-۴: مقایسه پارامترهای تصویر سه الگوریتم

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳.....	شکل ۱-۱: عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی و امواج صوتی در آب دریا.....
۴.....	شکل ۲-۱: هندسه تصویر برداری سونار اسکن جانبی.....
۱۳.....	شکل ۱-۲: انتشار کروی در یک محیط نامحدود.....
۱۳.....	شکل ۲-۲: انتشار استوانه‌ای در آب‌های کم عمق.....
۱۴.....	شکل ۳-۲: تغییرات تلفات جذب بر حسب فرکانس.....
۱۵.....	شکل ۴-۲: پالس ارسالی و دریافتی در برد.....
۱۷.....	شکل ۵-۲: رزولوشن سمت سونار.....
۲۰.....	شکل ۶-۲: هندسه تصویر برداری روزنه مصنوعی و حداکثر طول روزنه مصنوعی.....
۲۱.....	شکل ۷-۲: حالت‌های عملکرد سونار روزنه مصنوعی.....
۲۵.....	شکل ۸-۲: درجات آزادی حرکت سونار.....
۲۸.....	شکل ۱-۳: حالت تصویر برداری استریپ مپ سونار روزنه مصنوعی.....
۲۹.....	شکل ۲-۳: هندسه مورد نیاز برای محاسبه الگوی تشعشعی آنتن.....
۳۰.....	شکل ۳-۳: الگوی تشعشعی سونار روزنه مصنوعی برای هدفی در برد ۱۵۰ متر.....
۳۲.....	شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام الگوریتم برد-داپلر.....
۳۷.....	شکل ۵-۳: بلوک دیاگرام الگوریتم مهاجرت برد.....
۴۰.....	شکل ۶-۳: بلوک دیاگرام الگوریتم مقیاس‌بندی چیرپ.....

## عنوان

## صفحه

- شکل ۳-۷: تاثیر ضرب کردن فاز اول روی مکان هندسی برد اهداف ..... ۴۲
- شکل ۴-۱: داده خام مربوط به ۴ هدف نقطه ای ..... ۴۶
- شکل ۴-۲: داده فشرده شده در راستای برد، مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم برد-دایر ..... ۴۷
- شکل ۴-۳: داده فشرده شده در راستای برد، در حوزه برد دایر مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم برد-دایر ..... ۴۸
- شکل ۴-۴: داده فشرده شده پس از عملیات تصحیح مهاجرت سلول برد، مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم برد-دایر ..... ۴۹
- شکل ۴-۵: تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم برد-دایر ..... ۵۰
- شکل ۴-۶: جزئیات تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم برد-دایر ..... ۵۰
- شکل ۴-۷: برشی در راستای برد از تصویر نهایی هدف موجود در (۳۰ و ۰) با الگوریتم برد-دایر .. ۵۱
- شکل ۴-۸: برشی در راستای سمت از تصویر نهایی هدف موجود در (۳۰ و ۰) با الگوریتم برد-دایر ..... ۵۲
- شکل ۴-۹: تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم مقیاس بندی چیرپ ..... ۵۳
- شکل ۴-۱۰: جزئیات تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم مقیاس بندی چیرپ ... ۵۳
- شکل ۴-۱۱: برش در راستای برد از تصویر نهایی هدف موجود در (۳۰ و ۰) با الگوریتم مقیاس بندی چیرپ ..... ۵۴
- شکل ۴-۱۲: برش در راستای سمت از تصویر نهایی هدف موجود در (۳۰ و ۰) با الگوریتم مقیاس بندی چیرپ ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۳: تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم مهاجرت برد ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۴: جزئیات تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای با الگوریتم مهاجرت برد ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۵: برشی در راستای برد از تصویر نهایی هدف موجود در (۳۰ و ۰) با الگوریتم مهاجرت برد ..... ۵۷

## عنوان

## صفحه

- شکل ۴-۱۶: برشی در راستای سمت از تصویر نهایی هدف موجود در (۰ و ۳۰) با الگوریتم مهاجرت برد ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۷: پارامترهای PSLR و ISLR ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۸: اثر ناشی از تصویر برداری با فاصله  $D/2$  در راستای حرکت ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۹: اثر ناشی از تصویر برداری با فاصله  $D$  در راستای حرکت ..... ۶۱
- شکل ۴-۲۰: میزان خطای نوسان جابجایی عرضی ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۱: اثر خطای جابجایی عرضی بر روی سیگنال فشرده شده برد، مربوط به ۴ هدف نقطه ای ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۲: اثر خطای جابجایی عرضی بر روی تصویر نهایی مربوط به ۴ هدف نقطه ای ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۳: تصویر نهایی پس از اعمال جبران سازی خطای حرکتی ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۴: حالت های ممکن انعکاس های مرتبه اول و دوم از سطح و کف دریا ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۵: ضریب تضعیف ناشی از انعکاس از سطح دریا ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۶: ضریب انعکاس ناشی از انعکاس از کف دریا ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۷: نمای ۳ بعدی سونار و مسیر انعکاس سیگنال از سطح دریا ..... ۶۹
- شکل ۴-۲۸: سیگنال فشرده شده در راستای برد و تاثیر پدیده چند مسیری بر روی هدف موجود در (۰ و ۱۵۰) ..... ۷۰
- شکل ۴-۲۹: تصویر نهایی هدف موجود در (۰ و ۱۵۰) و تاثیر پدیده چند مسیری بر روی آن .. ۷۱
- شکل ۴-۳۰: تصویر نهایی هدف مستطیلی و تاثیر پدیده چند مسیری بر روی آن ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۱: داده خام هدف مستطیلی و تاثیر پدیده چند مسیری و نویز بر روی آن ..... ۷۳
- شکل ۴-۳۲: داده فشرده شده در راستای برد هدف مستطیلی و تاثیر پدیده چند مسیری و نویز بر روی آن ..... ۷۳

## عنوان

## صفحه

- شکل ۴-۳۳: تصویر نهایی هدف مستطیلی و تاثیر پدیده چند مسیری و نویز بر روی آن ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۴: تصویر نهایی هدف مستطیلی و تاثیر انعکاس از کف ..... ۷۵
- شکل ۴-۳۵: تصویر نهایی یک هدف مستطیلی و یک تخته سنگ ماسه‌ای ..... ۷۵
- شکل ۴-۳۶: مشخصات تاسیسات آزمایشگاهی و استخر NSW ..... ۷۶
- شکل ۴-۳۷: داده خام واقعی ..... ۷۷
- شکل ۴-۳۸: تصویر نهایی تشکیل شده از روی داده واقعی با الگوریتم مهاجرت برد ..... ۷۸
- شکل ۴-۳۹: پدیده چند مسیری استوانه آلومنیومی در مجاورت کف ماسه‌ای ..... ۷۸

# فصل اول



## ۱- مقدمه

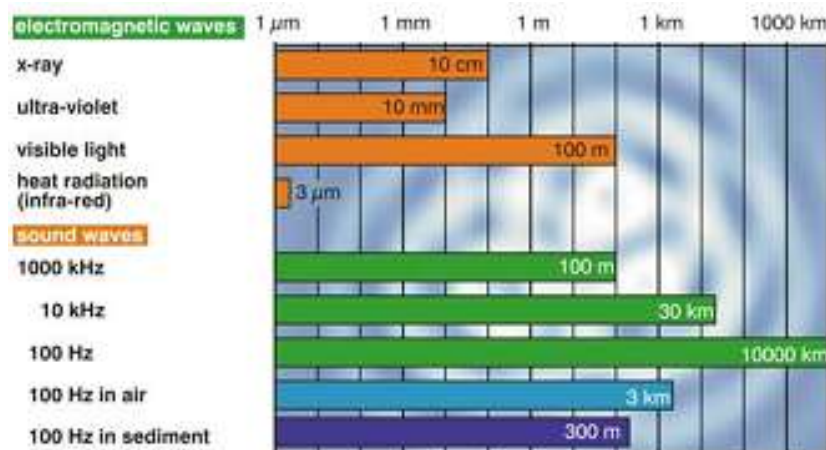
### ۱-۱- تصویربرداری زیر آب

زمین یک کره آبی است و تقریباً ۷۰٪ از سطح آن توسط آب اقیانوس‌ها و دریاها پوشیده شده است. بنابراین بخش عمده‌ای از سطح کره زمین ناشناخته مانده است. نور مرئی قابلیت نفوذ بسیار کمی در عمق آب دارد و برد آن از چند متر شروع شده و نهایتاً به چند ده متر می‌رسد. بنابراین استفاده از نور و دوربین‌های عکاسی برای تصویربرداری زیر آب مناسب نمی‌باشد. امواج الکترومغناطیس نیز به شدت در آب رسانای دریاها تضعیف می‌شوند.

برخلاف نور مرئی و امواج الکترومغناطیس، سیگنال صوتی به خوبی در آب منتشر می‌شود و صوت را به یک ابزار قدرتمند در زیر آب تبدیل کرده است. شکل ۱-۱ قدرت نفوذ امواج مختلف را در آب نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱-۱ پیداست سیگنال صوتی به خصوص در فرکانس‌های زیر 10 KHz می‌تواند کیلومترها در آب پیشروی کند. در نتیجه تصویربرداری صوتی تنها ابزار برای تصویربرداری زیر آب در مقیاس‌های بزرگ می‌باشد.

### ۱-۲- سونار

سونار در واقع نوعی رادار زیرآبی به حساب می‌آید که به جای امواج رادیویی از صوت استفاده می‌کند. واژه سونار مخفف Sound Navigation And Ranging می‌باشد و هدف اولیه آن کشف موقعیت و سرعت اهداف موجود زیر آب است.



شکل ۱-۱. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس و امواج صوتی در آب دریا [1]

در اوایل قرن نوزدهم، دنیل کلادون<sup>۱</sup> و چارلز اشتروم<sup>۲</sup> سعی کردند که سرعت صوت در آب را اندازه‌گیری نمایند. در شروع قرن بیستم لوییز نیکسون<sup>۳</sup> اولین سونار را برای کشف توده‌های یخی شناور اختراع نمود. اولین سیستم سونار با نام ASDIC<sup>۴</sup> در طول جنگ جهانی اول توسط آمریکا، انگلیس و فرانسه، برای کشف زیردریایی‌ها و کوه‌های یخ مورد استفاده قرار گرفت [2]. اولین بار واژه سونار در جنگ جهانی دوم توسط آمریکایی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سونار اولیه یک وسیله مکانیکی بود که پرتو صوت آن به صورت مکانیکی جابجا می‌شد.

سونارها به دو دسته اصلی فعال<sup>۵</sup> و غیرفعال<sup>۶</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. سونار غیرفعال فقط شامل گیرنده می‌باشد و سیگنال‌های صوتی منتشرشده توسط اهداف را رهگیری می‌کند، درحالی‌که سونار فعال سیگنال صوتی را توسط فرستنده ارسال می‌کند و منتظر اکو بازگشتی می‌ماند. برد هدف با توجه به زمان بازگشت صوت و در نظر گرفتن سرعت صوت در محیط تعیین می‌شود.

<sup>1</sup> Daniel Colladon

<sup>2</sup> Charles Strum

<sup>3</sup> Lewis Nixon

<sup>4</sup> Anti Submarine Detection Investigation Committee

<sup>5</sup> Active Sonar

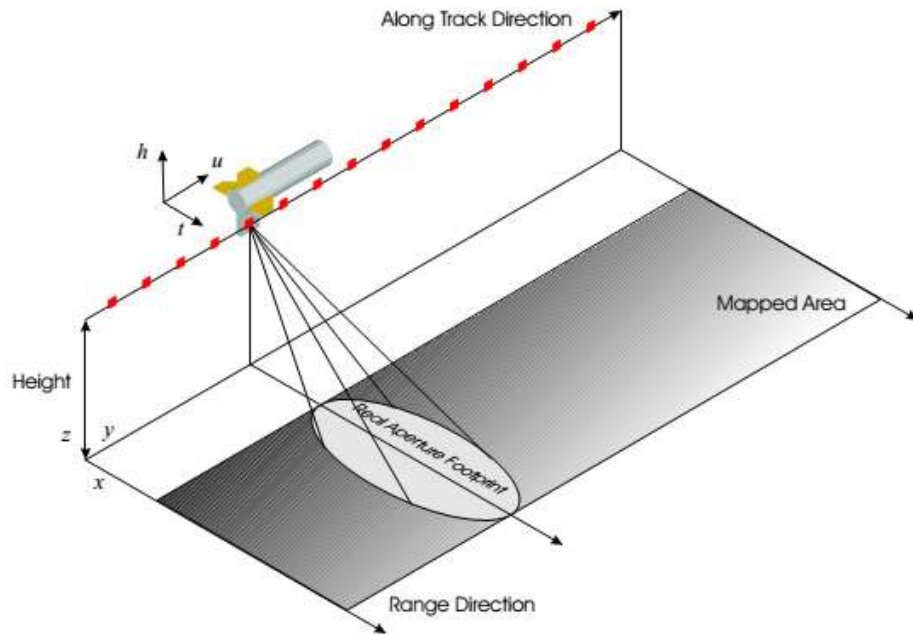
<sup>6</sup> Passive Sonar

امروزه سونارهای اسکن جانبی<sup>۷</sup> برای مقاصد عمرانی و نظامی برای تصویربرداری از کف دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- سونار اسکن جانبی

سیستم سونار اسکن جانبی، هم در حالت روزنه مصنوعی و هم در حالت روزنه حقیقی، پالس‌های صوتی را به صورت عمود بر مسیر حرکت سونار ارسال می‌کند. اکو بازگشتی باریکه‌ای از تصویر را تشکیل می‌دهد. با کنار هم قرار گرفتن این باریکه‌های تصویر و حرکت کردن رو به جلو سونار، تصویر نهایی کف دریا تشکیل می‌شود.

شکل ۱-۲ هندسه یک سیستم اسکن جانبی نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲. هندسه تصویر برداری سونار اسکن جانبی

<sup>7</sup> Side-scan Sonar

شناور حامل سونار، یک مسیر مستقیم را در راستای محور  $u$  و با ارتفاع میانگین  $H$  از کف دریا طی می‌کند. پالس‌های صوتی به صورت عمود بر مسیر حرکت و در راستای محور  $x$  ارسال می‌گردند. اکوهای یک پالس خاص به صورت تابعی از زمان، که متناسب با برد رفت و برگشت هدف می‌باشد، ذخیره می‌گردد. همانگونه که از شکل ۱-۲ مشخص است دو جهت برای مشخص کردن محورهای تصویربرداری و هندسه‌ی سونار در نظر گرفته شده است. یکی، جهت در مسیر حرکت<sup>۸</sup> که خط سیر سونار را در حین تصویربرداری نشان می‌دهد و دیگری جهت برد<sup>۹</sup> می‌باشد که عمود بر مسیر حرکت سونار و در جهت تشعشع پرتوهای سونار می‌باشد.

### ۱-۳-۱- سونار اسکن جانبی معمولی (روزنه حقیقی)

سونار اسکن جانبی معمولی با ارسال پرتو باریکی از انرژی صوتی و سپس ترسیم هر اکوی بازگشتی تصویری از کف دریا ارائه می‌دهد. رزولوشن سمت در تصویر نهایی با پهنای پرتو ارسالی متناسب است و هر چه پرتو باریکتر باشد رزولوشن بهتر است. باریک کردن پرتو به دو صورت امکان‌پذیر است. روش اول بالا بردن فرکانس پالس صوتی ارسالی می‌باشد. اشکال این روش، تضعیف شدید پالس‌های فرکانس بالا می‌باشد. بنابراین سونارهای اسکن جانبی فرکانس بالا فقط در بردهای خیلی کم کار می‌کنند. روش دوم افزودن طول روزنه سونار می‌باشد که این روش نیز به دلیل محدودیت‌های فیزیکی، تا حدود زیادی غیرممکن می‌باشد.

عیب بعدی سونارهای اسکن جانبی با رزولوشن بالا این است که با ارسال پرتوهای باریک (بین یک‌دهم تا یک درجه) کوچکترین انحراف از مسیر، باعث می‌شود تا تعدادی از اهداف را از دست بدهد و این مشکل با پردازش سیگنال نیز قابل حل نخواهد بود. چون اگر پرتوی به هدف برخورد نکند هیچ بازتابشی نیز نخواهد داشت.

---

<sup>8</sup> Along Track Direction

<sup>9</sup> Range Direction