دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کشف اهداف با رویکرد تئوری آشکارسازی و حذف تداخل در رادارهای غیرفعال و کاربرد آن در FM-PBR

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات

مریم مسجدی

اساتید راهنما

دکتر سید محمود مدرس‌هاشمی

دکتر سعید صدری

۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق – مخابرات خانم مریم مسجدی
تحت عنوان

کشف اهداف با رویکرد تئوری آشکارسازی و حذف تداخل در رادارهای غیرفعال و کاربرد آن در FM-PBR

در تاریخ ۸۹/۱۲/۲۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید محمود مدرس هاشمی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سعید صدری
۳- استاد داور	دکتر علیمحمد دوست‌حسینی
۴- استاد داور	دکتر عباس شیخی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمود مدرس هاشمی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ تاریخچه ۲

۱-۲ پردازش در رادارهای غیرفعال ۴

۱-۳ هدف و ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: رادارهای دوپایه و رادارهای غیرفعال

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ رادارهای دوپایه ۷

۲-۲-۱ دستگاه مختصات و ساختار هندسی رادارهای دو پایه ۸

۲-۲-۲ معادله رادار دوپایه ۱۰

۲-۲-۳ منحنی SNR ثابت ۱۱

۲-۲-۴ فاصله بدون ابهام ۱۱

۲-۲-۵ فرکانس داپلر ۱۲

۲-۲-۶ رابطه مکان ۱۳

۲-۲-۷ سنکرون‌سازی ۱۴

۲-۳ رادارهای غیرفعال ۱۴

۲-۳-۱ سیگنال مورد استفاده ۱۵

۲-۳-۲ انواع نویز در گیرنده ۲۱

۲-۴ پردازش سیگنال در رادارهای غیرفعال ۲۱

۲-۴-۱ پردازش باند باریک ۲۱

۲-۴-۲ پردازش باند پهن ۲۴

۲-۴-۳ مزایا و معایب رادار غیرفعال ۲۹

۲-۵ نتیجه‌گیری ۳۰

فصل سوم: فیلترهای وفقی

۳-۱ مقدمه ۳۲

۳-۲ ساختار فیلترهای وفقی ۳۴

۳-۳ فیلتر وینر ۳۵

۳-۴ روش های جستجو ۳۷

۳-۴-۱ روش کاهش با بیشترین شیب ۳۷

۳-۴-۲ روش نیوتن ۴۰

۳-۵ الگوریتم LMS ۴۱

۳-۵-۱ الگوریتم LMS نرمالیزه شده (NLMS) ۴۳

۳-۵-۲ الگوریتم LMS با اندازه گام متغیر (VSLMS) ۴۴
۳-۶ فیلترهای با ساختار نردبانی ۴۵
۳-۶-۱ پیشگویی کننده نردبانی ۴۵
۳-۶-۲ تخمین‌گر پروسه مشترک نردبانی ۴۸
۳-۶-۳ فیلتر وفقی نردبانی ۴۹
۳-۷ روش حداقل مربعات ۵۰
۳-۷-۱ الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی (RLS) ۵۲
۳-۸ فیلترهای وفقی حوزه تبدیل ۵۴
۳-۹ فیلترهای وفقی زیرباند ۵۷
۳-۹-۱ بانک فیلتر DFT ۵۷
۳-۹-۲ ساختارهای فیلتر وفقی زیرباند ۶۰
۳-۹-۳ انتخاب فیلترهای آنالیز و سنتز ۶۱
۳-۹-۴ پیچیدگی محاسباتی ۶۲
۳-۱۰ کاربردهای فیلترهای وفقی ۶۲
۳-۱۰-۱ مدل‌سازی ۶۲
۳-۱۰-۲ مدل‌سازی معکوس ۶۳
۳-۱۰-۳ پیشگویی کننده خطی ۶۴
۳-۱۰-۴ حذف کردن تداخل ۶۵
۳-۱۱ نتیجه‌گیری ۶۶
فصل چهارم: حذف سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چندمسیره در رادار غیرفعال
۴-۱ مقدمه ۶۷
۴-۲ شکل دادن به پترن آنتن ۶۸
۴-۳ پوشش فیزیکی ۶۸
۴-۴ حذف آنالوگ ۶۹
۴-۵ فیلتر کردن در حوزه زمان ۷۱
۴-۵-۱ حذف با فیلتر LMS ۷۲
۴-۵-۲ حذف با فیلتر وفقی نردبانی ۷۴
۴-۵-۳ حذف با فیلترهای مبتنی بر روش حداقل مربعات ۷۵
۴-۶ کاربرد فیلتر LMS زیرباند برای حذف سیگنال مستقیم و کلاتر ۷۶
۴-۷ نتایج شبیه‌سازی ۸۲
۴-۷-۱ نتایج اعمال الگوریتم‌های مختلف حذف بر سیگنال کانال هدف ۸۲
۴-۷-۲ بررسی الگوریتم‌های ارائه شده بر مبنای احتمال آشکارسازی ۸۵
۴-۸ نتیجه‌گیری ۸۶
فصل پنجم: کشف و استخراج پارامترهای اهداف از دیدگاه تئوری آشکارسازی
۵-۱ مقدمه ۸۸
۵-۲ تئوری تصمیم‌گیری آماری ۸۹

۵-۳ معیارهای آشکارسازی ۹۰
۵-۴ مسئله آزمون- فرضیه ساده و مرکب ۹۱
۵-۵ مروری بر الگوریتم‌های کشف اهداف در رادار غیرفعال ۹۲
۵-۵-۱ استفاده از یک مرحله فیلتر منطبق ۹۲
۵-۵-۲ استفاده از چند مرحله فیلتر منطبق ۹۳
۵-۵-۳ بررسی دو روش ارائه شده ۹۴
۵-۶ کشف و استخراج پارامترهای اهداف در رادار غیرفعال از دیدگاه تئوری آشکارسازی ۹۵
۵-۶-۱ مدل‌سازی مسئله ۹۵
۵-۶-۲ نوشتن مسئله به صورت آزمون- فرضیه ۹۶
۵-۶-۳ حل مسئله آزمون- فرضیه چندتایی مرکب ۹۷
۵-۶-۴ استفاده از نمودار درختی در مسئله آزمون- فرضیه چندتایی ۹۹
۵-۶-۵ حل مسئله آشکارسازی اهداف در رادار غیرفعال ۱۰۰
۵-۶-۶ آشکارسازی در حضور سیگنال مسیر مستقیم و کلاتر ۱۰۸
۵-۶-۷ کاهش مؤثر بار محاسباتی الگوریتم ۱۱۰
۵-۶-۸ شبیه‌سازی ۱۱۴
۵-۷ نتیجه‌گیری ۱۲۲
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۳
۶-۲ پیشنهادات ۱۲۵
مراجع ۱۲۶

چکیده

رادارهای غیرفعال به دلیل نداشتن فرستنده اختصاصی، رادارهایی ارزان قیمت، غیر قابل شناسایی و مقاوم در برابر شیوه های جنگ الکترونیک هستند. ایده استفاده از سیگنال های موجود در محیط (مانند سیگنال‌های رادیو FM، تلویزیون آنالوگ، GSM و ...) به عنوان فرستنده رادار از سال‌های اولیه پیدایش رادار مطرح بوده است. آشکارسازی و ردیابی اهداف در این رادارها، نیازمند روش های پیشرفته پردازش سیگنال می‌باشد و بار محاسباتی سنگینی را به سیستم تحمیل می‌کند. از آنجاییکه در رادارهای غیرفعال گیرنده اطلاعی از شکل موج ارسال شده توسط فرستنده ندارد، معمولاً یک کانال مرجع برای جمع‌آوری سیگنال فرستنده لازم بوده و دو یا چند کانال هدف نیز برای جمع‌آوری سیگنال‌های اهداف مورد نیاز است. در سال‌های اخیر با پیشرفت پردازنده‌های دیجیتال، تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با رادار غیرفعال به عمل آمده و به کارگیری این رادارها در بسیاری از زمینه ها محقق شده است. مهم‌ترین تداخل در رادارهای غیرفعال، سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چند مسیره یا کلاترها هستند. حضور این سیگنال‌ها در کانال هدف گیرنده، عملیات کشف وآشکارسازی اهداف را مختل کرده و فاصله آشکارسازی را به شدت محدود می‌کند. بنابراین حذف این سیگنال‌ها قبل از فیلتر منطبق لازم و ضروری است. بنابراین در این پایان‌نامه پس از معرفی رادارهای غیرفعال، به بررسی این مشکل پرداخته و روش‌های مورد استفاده به این منظور که به طور عمده روش‌های فیلتر وفقی هستند بررسی شده‌اند. با توجه به ویژگی‌های سیگنال FM، روشی بر اساس فیلترهای وفقی زیرباند ارائه شده است و روش‌های حذف از لحاظ آشکارسازی اهداف و پیچیدگی محاسباتی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

یکی دیگر از موضوعات مهم در هر رادار، مسئله آشکارسازی اهداف است. در واقع هدف اصلی یک رادار کشف اهداف است. در رادارهای پالسی معمولی، تا به حال، تحقیقات بسیار زیادی در زمینه کشف اهداف از دیدگاه تئوری آشکارسازی انجام شده است، ولی در رادارهای غیرفعال با این دیدگاه به موضوع پرداخته نشده است. با توجه به تفاوت‌های فراوان رادارهای فعال و رادارهای غیرفعال، استفاده از روش‌های آشکارسازی رادارهای پالسی فعال در رادارهای غیرفعال صحیح نبوده و نتیجه مطلوبی به دست نمی‌دهد. بنابراین در ادامه به بررسی کشف و استخراج پارامترهای اهداف از دیدگاه تئوری آشکارسازی پرداخته و روشی به این منظور پیشنهاد نموده‌ایم. در پایان نیز روش‌های مختلف آشکارسازی در رادارهای غیرفعال با استفاده از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و بر این اساس کارآمدی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: رادار غیرفعال، حذف کلاتر، تئوری آشکارسازی، سیگنال رادیو FM

فصل اول
مقدمه

۱-۱ تاریخچه

رادار یک سیستم الکترومغناطیسی است که از یک گیرنده و یک فرستنده تشکیل میشود. با ارسال یک سیگنال به سمت هدف و دریافت بازتابش آن در گیرنده، وجود هدف کشف می شود، از فاصله زمان بین ارسال و دریافت سیگنال، فاصله هدف و از تغییر فرکانس موج برگشتی، سرعت هدف محاسبه می شود.

تقریباً تمام رادارهای اولیه و در طول جنگ جهانی دوم، دوپایه[1] بودند، زیرا در آن زمان امکان جداسازی سیگنال ارسالی از دریافتی وجود نداشت. با اختراع داپلکسر[2] و امکان ارسال سیگنال به صورت پالسی، ایده استفاده از یک آنتن مشترک برای گیرنده و فرستنده مطرح شد و رادارهای دو پایه جای خود را به رادارهای تک‌پایه[3] دادند که پیچیدگی کمتری نسبت به رادارهای دوپایه داشتند. امروزه اغلب سیستم‌های رادار معمولی تک‌پایه بوده و به عبارت دیگر از یک فرستنده و گیرنده تشکیل می‌شود که در یک مکان قرار دارند و از یک آنتن به صورت مشترک استفاده می‌کنند. با ارسال یک سیگنال پالسی به سمت هدف و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت آن، فاصله هدف محاسبه می‌شود.

---

[1] Bistatic
[2] Duplexer
[3] Monostatic

در سال‌های بعد با اختراع موشک‌های ضدتشعشع ARM[1]، مختل‌کننده‌ها[2] و هواپیماهای پنهان[3] ایده استفاده از رادارهای دوپایه و چند پایه[4] دوباره مطرح شد.

رادارهای غیر فعال[5] یکی از انواع رادارهای دو پایه هستند که در آن‌ها فرستنده اختصاصی وجود ندارد و به صورت فرصت‌طلبانه از فرستنده های موجود در محیط استفاده می کنند. ایده استفاده از فرستنده‌های موجود در محیط، ایده جدیدی نیست. نخستین آزمایش در زمینه رادار غیرفعال، در سال ۱۹۳۵ در دونتری انگلستان انجام شد. در این آزمایش، آرنولد ویلکینز[6] و رابرت واتسون- وات[7] توانستند یک بمب افکن را تقریباً در فاصله ۸ مایلی با استفاده از امواج کوتاه رادیو BBC[8] آشکارسازی کنند [۱]. اما به دلیل شکل موج پیوسته فرستنده، بازتاب‌های کوچک هدف در سیگنال مستقیم و قوی فرستنده گم و فاصله آشکارسازی به شدت محدود می‌شد. بنابراین این رادارها فراموش شدند. در سال های اخیر با پیشرفت پردازنده های دیجیتال و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال ارزان قیمت و پرسرعت با محدوده دینامیکی بالا، رادارهای غیرفعال به دلیل مزیت های منحصر به فرد، دوباره مورد توجه قرار گرفته‌اند.

رادارهای غیرفعال به دلیل نداشتن فرستنده اختصاصی ارزان قیمت و غیر قابل شناسایی بوده و نیاز به تخصیص باند فرکانسی ندارند. این رادارها نسبت به رادارهای تک‌پایه، توانایی کشف اهداف پنهان را دارند. همچنین امکان تداخل عمدی در این رادارها کمتر است و بنابراین در برابر شیوه‌های جنگ الکترونیک مقاوم‌ترند.

در مقابل، این رادارها معایبی نیز دارند. مهم‌ترین عیب آن‌ها، این است که طراح رادار هیچگونه کنترلی بر شکل موج و توان فرستنده ندارد. در فرکانس‌های پایین مثل رادیو FM و VHF و UHF بهره قابل دستیابی توسط آنتن‌ها، محدود است و آنتن‌ها پهنای بیم زیادی دارند. به دلیل محدود بودن بهره آنتن ها، آنتنی که به منظور دریافت سیگنال بازتابی از اهداف به کار می‌رود، سیگنال مستقیم فرستنده را نیز دریافت می کند. عملیات پردازش سیگنال در این رادارها به مراتب بیشتر از رادارهای معمولی است.

سیگنال‌های معمول مورد استفاده در رادارهای غیرفعال عبارت‌اند از:

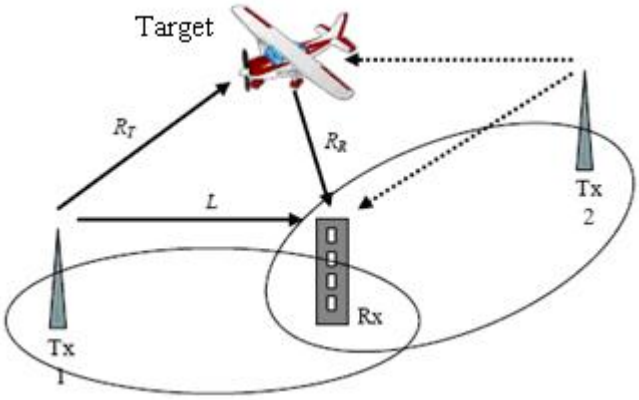
- سیگنال تلویزیون آنالوگ [۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]،
- سیگنال رادیوی FM [۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]،

---

[1] Anti Radiation Missiles
[2] Jammers
[3] Stealth
[4] Multistatic
[5] Passive
[6] Arnold Wilkins
[7] Robert Watson-Watt
[8] British Broadcasting Company

- سیگنال GSM فرستنده‌های تلفن همراه [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷]،
- سیگنال DAB[1] [۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و۲۲]،
- سیگنال DVB-T[2] [۲۳، ۲۴ و ۲۵]،
- سیگنال HDTV[3] [۲۶] و
- سیگنال CDMA[4] [۲۷].

رادار غیرفعال می‌تواند به طور هم‌زمان از چند فرستنده استفاده کند و اطلاعات آن‌ها را با هم مورد پردازش قرار دهد [۲۸، ۲۹ و ۳۰]. شکل شماتیک یک رادار غیرفعال در شکل ۱-۱ آمده است.



شکل ۱-۱- شکل شماتیک یک رادار غیرفعال [۳۱]

۱-۲ پردازش در رادارهای غیرفعال

پردازش در رادارهای غیرفعال به دو دسته کلی باند پهن و باند باریک تقسیم می‌شوند. معمولاً در رادارهای غیرفعال مبتنی بر سیگنال تلویزیون آنالوگ از پردازش باند باریک استفاده می‌شود. سیگنال تلویزیون آنالوگ تابع ابهام[5] نامناسبی دارد به طوری‌که اطلاعات مربوط به فاصله را نمی‌توان از آن استخراج کرد، بنابراین از باند باریکی از سیگنال استفاده می‌شود و اطلاعات مربوط به داپلر هدف به سادگی و با گرفتن FFT از سیگنال دریافت شده به دست می‌آید. در رادارهای غیرفعال مبتنی بر بقیه سیگنال‌های اشاره شده در بالا، از پردازش باند پهن استفاده می‌شود. در پردازش باند پهن، حداقل سه کانال مورد نیاز است. یک کانال برای جمع‌آوری سیگنال مرجع و دو کانال برای

[1] Digital Audio Broadcasting
[2] Digital Audio Broadcasting- Terrestrial
[3] High Definition Television
[4] Code Division Multiple Access
[5] Ambiguity Function

جمع‌آوری سیگنال هدف به کار می‌رود و با استفاده از سیگنال کانال مرجع، بر سیگنال کانال هدف، فیلتر منطبق اعمال می‌شود و اطلاعات مربوط به فاصله و سرعت هدف استخراج می‌شود.

یکی از مشکلات اساسی در رادارهای غیرفعال آن است که سیگنال مستقیم[1] و سیگنال‌های چندمسیره[2] دریافتی از فرستنده در کانال‌های هدف نفوذ کرده و بازتاب‌های کوچک هدف در این سیگنال‌های قوی گم می‌شود. با وجود استفاده از روش‌های شکل‌دهی به پترن آنتن‌ها و روش‌های حذف آنالوگ، هنوز مقدار قابل توجهی از این سیگنال‌ها توسط کانال هدف دریافت می‌شود. با وجود اینکه در فیلتر منطبق، این سیگنال‌ها بر روی محور فرکانس داپلر برابر صفر، ظاهر می‌شوند، به دلیل ایده‌آل نبودن تابع ابهام، سیگنال کوچک هدف در گلبرگ‌های فرعی ناشی از آن‌ها گم می‌شود. بنابراین لازم است این سیگنال‌ها توسط روش‌های دیجیتال و قبل از فیلتر منطبق تا حد ممکن حذف شوند. یکی دیگر از مشکلات در رادار غیرفعال که باز هم از نامناسب بودن تابع ابهام ناشی می‌شود، پنهان شدن[3] اکوی اهداف با توان کم در اهداف با توان‌های بالا است. اهداف به دلیل داشتن فواصل و سطح مقطع‌های راداری مختلف دارای توان‌های مختلفی هستند. بنابراین در فیلتر منطبق، گلبرگ‌های فرعی ناشی از اهداف با اکوهای بزرگ، اهداف با اکوهای کوچکتر را می‌پوشانند و مانع آشکارسازی آن‌ها می‌شوند.

۱-۳ هدف و ساختار پایان‌نامه

از بین این سیگنال‌ها، سیگنال رادیوی FM تابع ابهام قابل قبول و توان نسبتاً بالایی دارد، بنابراین در این پایان‌نامه رادار غیرفعال موج FM مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. هدف کلی پایان‌نامه بررسی روش‌های مختلف حذف سیگنال مسیر مستقیم و کلاتر در این نوع رادارهای غیرفعال بوده و روش جدیدی نیز به این منظور ارائه می‌شود. همچنین پرداختن به موضوع رادار غیرفعال از دیدگاه تئوری آشکارسازی موضوع دیگری است که در این پایان‌نامه به آن خواهیم پرداخت.

از آنجاییکه رادارهای غیرفعال گونه‌ای از رادارهای دوپایه هستند، در فصل دوم این پایان‌نامه، به بررسی ساختار و هندسه رادارهای دوپایه، روابط مربوط به سیگنال به نویز، فرکانس داپلر ، فاصله و سنکرون‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. همچنین رادارهای غیرفعال و روابط آن، شکل موج‌های مورد استفاده و انواع و نحوه پردازش سیگنال در این نوع رادارها بررسی شده است و در آخر مزایا و معایب رادارهای غیرفعال بیان شده است.

---

[1] Direct-path signal
[2] Multipath signals
[3] Masking

با توجه به مشکل سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چندمسیره و لزوم حذف آن‌ها توسط یک فیلتر که در اکثر مواقع از نوع وفقی می‌باشد، فصل سوم، به بررسی فیلترهای وفقی و روابط آن‌ها و همچنین مزایا و معایب آن‌ها نسبت به همدیگر اختصاص داده شده است.

در فصل چهارم، به مشکل سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال‌های چندمسیره در رادار غیرفعال و حذف آن‌ها توسط روش‌های فیلتر وفقی پرداخته شده است و پیشنهادی بر اساس فیلترهای وفقی زیرباند با اندازه گام متغیر ارائه شده و همچنین معیاری برای مقایسه این روش‌ها از طریق شبیه‌سازی پیشنهاد شده است.

از آنجاییکه بر روی مسئله آشکارسازی در رادار غیرفعال تحقیقات زیادی انجام نگرفته است، در فصل پنجم، از دیدگاه تئوری آشکارسازی به مسئله نگاه شده و پیشنهادی برای آشکارسازی اهداف در رادار غیرفعال از طریق آزمون GLR[1]، ارائه شده است. همچنین برای کاهش بار محاسباتی الگوریتم ارائه شده، روشی پیشنهاد شده است.

در نهایت در فصل ششم، نتایج پایان‌نامه جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده است.

[1] Generalized Likelihood Ratio Test

فصل دوم
رادارهای دوپایه و رادارهای غیرفعال

۲-۱ مقدمه

از آنجاییکه رادارهای غیرفعال نوع خاصی از رادارهای دوپایه هستند، در این فصل ابتدا معادلات و ساختار هندسی رادار دوپایه بررسی می‌شود و پس از آن، ساختار رادارهای غیرفعال، مشخصات شکل موج‌های مورد استفاده و نحوه پردازش سیگنال در این رادارها به طور مختصر بیان می‌شود.

۲-۲ رادارهای دوپایه

رادارهای دوپایه ساختار و عملکرد پیچیده‌ای دارند. بنابراین با پیشرفت تکنولوژی و اختراع رادارهای تک‌پایه، این رادارها کاملاً در حاشیه قرار گرفتند و تحقیقات زیادی روی آن‌ها انجام نمی‌گرفت. اما اخیراً به دلایلی که ذکر شد، این رادارها دوباره مورد توجه قرار گرفته‌اند. در زیر به برخی از مهم‌ترین مزایای رادارهای دوپایه اشاره می‌شود.

اگر فرستنده رادار از منطقه جنگی دور باشد، (یا حتی اگر فرستنده رادار ماهواره باشد) از هدف قرار گرفتن توسط موشک های ARM محفوظ میماند. همچنین اگر گیرنده و فرستنده رادار فاصله قابل ملاحظه‌ای با هم داشته باشند، گیرنده درگلبرگ اصلی مختل‌کننده قرار نمیگیرد. کاهش سطح مقطع راداری تک پایه یک هدف، معمولاً

سطح مقطع راداری دوپایه[1] آن را کاهش نمی‌دهد، بنابراین هواپیماهای پنهان در مقابل رادار دوپایه کارایی خود را از دست می‌دهند [۱].

رادارهای دوپایه در موارد خاص زیر کاربرد دارند [۱]:

۱- hitchhiking: استفاده از رادارهای همکار یا غیرهمکار دیگر به عنوان فرستنده. به عنوان مثال رادار آلمانی کلین هیدلبرگ[2]، که در جنگ جهانی دوم از رادارهای انگلیسی به عنوان فرستنده استفاده می‌کرد.

۲- موشک‌های نیمه فعال[3]: بر روی این موشک‌ها، گیرنده رادار نصب شده و فرستنده رادار بر روی زمین قرار دارد.

۳- Forward-Scatter Fences: در این حالت رادار قادر به تشخیص اهدافی است که از بین فرستنده و گیرنده میگذرند.

۴-رادارهای چندپایه: این حالت، تعمیم یافته رادار دوپایه است و در آن از چند فرستنده و چند گیرنده استفاده می‌شود.

۵- رادارهای غیرفعال: همانطور که گفته شد، این رادارها فرستنده اختصاصی ندارند و به صورت فرصت‌طلبانه از فرستنده‌های موجود در محیط استفاده می‌کنند.

۲-۲-۱ دستگاه مختصات و ساختار هندسی رادارهای دو پایه

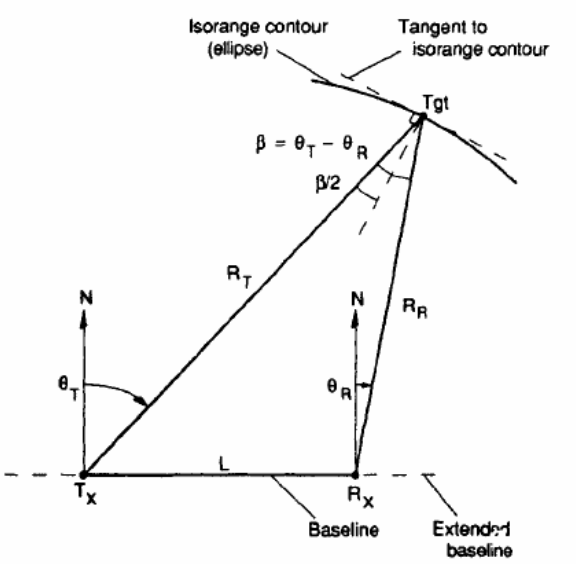
رادار دوپایه از یک فرستنده و گیرنده که فاصله قابل ملاحظه ای با هم دارند، تشکیل شده است [۱]. شکل ۲-۱ دستگاه مختصات معمول مورد استفاده در رادارهای دوپایه را نشان می دهد.

صفحه‌ای که در آن گیرنده، فرستنده و هدف قرار دارند، صفحه دوپایه[4] نامیده میشود. خط واصل گیرنده و فرستنده به طول L، خط مبنا[5] نامیده می شود. θ_T و θ_R به ترتیب زاویه فرستنده وگیرنده هستند، که در جهت عقربه‌های ساعت از خط شمال اندازه گیری می شوند. زاویه‌ای که رأس آنرا هدف تشکیل میدهد و اضلاع آن از گیرنده و فرستنده می گذرد، زاویه دوپایه[6] نام دارد. با توجه به شکل مشخص است که:

$$\beta = \theta_T - \theta_R \qquad (۱-۲)$$

---

[1] Bistatic Radar Cross-Section
[2] Klein Heidelberg
[3] Semiactive homing missiles
[4] Bistatic plane
[5] Baseline
[6] Bistatic angle

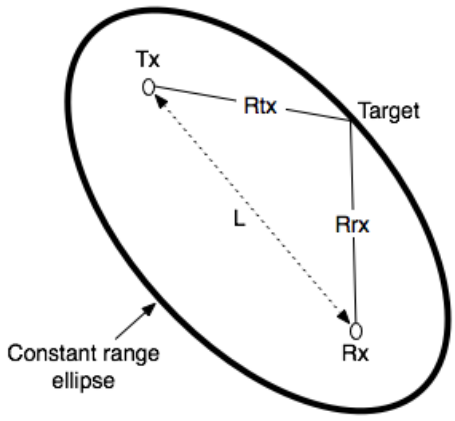


شکل ۲-۱- دستگاه مختصات رادار دوپایه [۱]

رادارهای دوپایه عموماً جمع فاصله یعنی R_T+R_R را اندازه گیری می کنند. منحنی فاصله ثابت در رادارهای دوپایه بصورت یک بیضی تعریف می شود که محل گیرنده و فرستنده کانونهای آن هستند و فاصله نقاط روی آن از دو کانون برابر با $R_T+R_R=2a$ است که a قطر بزرگ بیضی می باشد. واضح است که در حالت تک‌پایه که $R_T=R_R$ است، این منحنی‌ها به صورت دوایری حول گیرنده و فرستنده در می‌آیند. منحنی فاصله ثابت در رادار دوپایه به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1 \qquad (۲-۲)$$

که درآن a قطر بزرگ بیضی، b قطر کوچک بیضی و $b^2=a^2-L^2/4$ می باشد. یکی از این منحنی‌ها در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- منحنی فاصله ثابت در رادار دوپایه

یکی از روابط مهم در این ساختار این است که نیمساز زاویه دوپایه بر خط مماس بر منحنی فاصله ثابت عمود است [۲].

۲-۲-۲ معادله رادار دوپایه

معادله رادار دوپایه به صورت زیر به دست می آید [۱].

$$\frac{P_r}{P_n}=\frac{P_tG_t}{4\pi r_1^2}\sigma_b\frac{1}{4\pi r_2^2}\frac{G_r\lambda^2}{4\pi}\frac{L}{kT_0BF} \qquad (۳-۲)$$

که درآن،

P_t: توان ارسال شده،

P_r: توان دریافتی،

P_n: توان نویز دریافتی،

G_t: بهره آنتن فرستنده،

r_1: فاصله هدف تا فرستنده،

σ_b: سطح مقطع راداری دوپایه هدف،

r_2: فاصله هدف تا گیرنده،

G_r: بهره آنتن گیرنده،

λ: طول موج سیگنال،

k: ثابت بولتزمن،

T_0: دمای نویز (۲۹۰k) ،

B: پهنای باند مؤثر گیرنده،

F: عدد نویز[1] در گیرنده،

L: اتلاف سیستم

می باشد. این رابطه مشابه با رابطه رادار تک‌پایه است. با قرار دادن $r_1^2r_2^2=r_m^2$ و $\sigma_b=\sigma_m$، معادله رادار تک‌پایه بدست می‌آید.

این رابطه برای تمام شکل موجهای پیوسته، مدولاسیون دامنه، مدولاسیون فاز و پالسی شکل، کاربرد دارد.

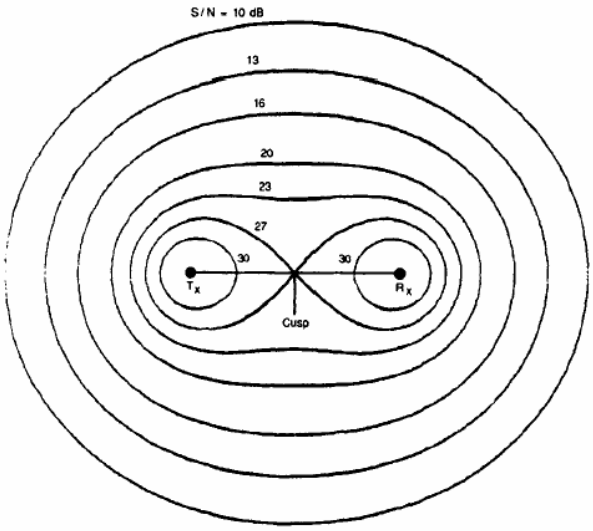
[1] Noise figure

۲-۲-۳ منحنی SNR ثابت

مطابق رابطه ۲-۳ رابطه مقابل به دست می‌آید [۲].

$$\frac{P_r}{P_n} = \frac{K}{r_1^2 r_2^2} \qquad (۴-۲)$$

که درآن P_r/P_n نسبت توان سیگنال به نویز در فاصله r_1 و r_2 به ترتیب از فرستنده و گیرنده و K یک ثابت است که با توجه به رابطه(۲-۳) تعیین می‌شود. با استفاده از این رابطه می توان منحنی‌های SNR ثابت را رسم کرد. در هر یک از این منحنی‌ها $SNR = P_r/P_n$ مقدار معینی فرض شده و مکان هندسی نقاطی از صفحه که در آن این SNR ثابت می‌ماند رسم شده است. به عبارت دیگر، در این منحنی‌ها فرض بر آن است که به غیر از r_1 و r_2، تمام پارامتر ها ثابت می مانند، که البته در عمل درست نیست. با افزایش SNR این منحنی ها جمع‌تر می‌شوند ودر آخر در اطراف گیرنده و فرستنده متمرکز می‌شوند. در شکل ۲-۳ این منحنی‌ها نمایش داده شده‌اند [۲].



شکل ۲-۳- منحنی SNR ثابت در رادار دوپایه [۲]

۲-۲-٤ فاصله بدون ابهام

در رادار تک‌پایه اگر اکوی پالس اول بعد از فرستادن پالس دوم دریافت شود، رادار در اندازه‌گیری فاصله اشتباه می کند. بر همین مبنا ماکزیمم برد بدون ابهام بر حسب فرکانس تکرار پالس در رادار تعریف می شود و به صورت زیر بدست می‌آید [۱].

$$(R_m)_u = \frac{c}{2PRF} \qquad (۵-۲)$$

که درآن PRF[1] فرکانس تکرار پالس رادار بوده و $(R_m)_u$ حداکثر برد بدون ابهام در رادار تک‌پایه است.

بر همین اساس حداکثر برد بدون ابهام در رادار دوپایه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(R_T + R_R)_u = \frac{c}{2PRF} \qquad (۶-۲)$$

همان طورکه مشخص است، ماکزیمم برد بدون ابهام، یکی از بیضی‌های فاصله ثابت است که قطر بزرگ آن برابر با $c/2PRF$ است.

۲-۲-۵ فرکانس داپلر[2]

شیفت داپلر برابر با نرخ تغییرات طول مسیر سیگنال فرستاده شده می باشد که به طول موج نرمالیزه شده است [۱]:

$$f_B = \frac{1}{\lambda}\left[\frac{d}{dt}(R_T + R_R)\right] \qquad (۷-۲)$$

واضح است که با برابر قرار دادن R_T و R_R رابطه فرکانس داپلر برای رادار تک‌پایه به دست می‌آید.

شکل ۲-۴ ساختار هندسی مورد نیاز برای فرستنده وگیرنده و هدف متحرک جهت تعیین شیفت داپلر را نشان می دهد. سرعت هدف که در صفحه دوپایه تصویر شده است دارای اندازه v و زاویه δ درجه با نیمساز زاویه دوپایه می باشد. این زاویه از نیمساز در جهت عقربه‌های ساعت مثبت فرض می شود.

اگر حالت گیرنده و فرستنده ثابت را در نظر بگیریم و فقط هدف را متحرک فرض کنیم در این صورت روابط زیر با توجه به رابطه ۲-۷ به دست می‌آیند [۱]:

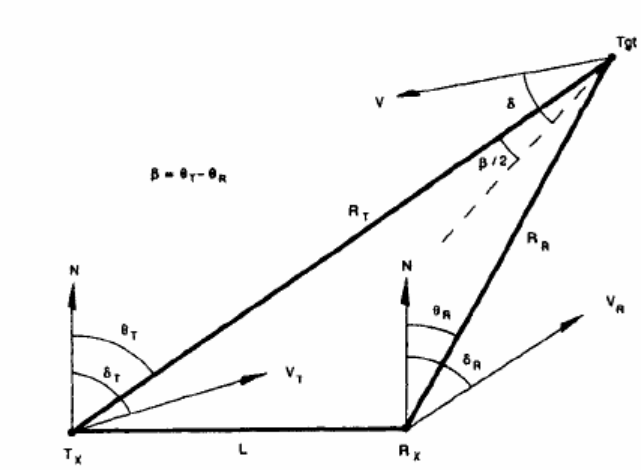
$$\frac{dR_T}{dt} = V\cos(\delta - \beta/2) \qquad (۸-۲)$$

$$\frac{dR_R}{dt} = V\cos(\delta + \beta/2) \qquad (۹-۲)$$

$$f_B = \left(\frac{2V}{\lambda}\right)\cos(\delta)\cos(\beta/2) \qquad (۱۰-۲)$$

---

[1] Pulse Repetition Frequency
[2] Doppler



شکل ۲-۴- هندسه رادار دوپایه با گیرنده و فرستنده متحرک[۲]

با قرار دادن $\beta=0$ رابطه برای رادار تک پایه که روی نیمساز β قرار دارد به دست می‌آید. با قرار دادن $\beta=180$ برای هر δ، $f_B=0$ می‌شود. از رابطه ۲-۱۰ نکات زیر بدست می‌آید :

الف- به ازای هر δ معین، اندازه شیفت داپلر، از حالت تک پایه که رادار روی نیمساز β قرار دارد، بیشتر نمی‌شود.

ب- به ازای هر β وقتی $-90<\delta<90$ باشد، شیفت داپلر مثبت است.

ج- به ازای هر β، وقتی سرعت هدف بر نیمساز β عمود باشد، شیفت داپلر برابر صفر است. در این حالت سرعت هم‌راستا با خط مماس بر منحنی فاصله ثابت است. بنابراین تمام منحنی‌های فاصله ثابت و همچنین خط مبنا، منحنی‌های شیفت داپلر برابر صفر هستند.

د- برای $\beta<180$ وقتی سرعت هدف با نیمساز زاویه β هم‌جهت است اندازه شیفت داپلر ماکزیمم می‌شود. به ازای $\delta=0$ ماکزیمم مثبت و به ازای $\delta=180$، ماکزیمم منفی می‌شود.

۲-۲-۶ رابطه مکان

مکان هدف (R_R,θ_R) باید در رادار دوپایه محاسبه شود. مقدار R_R به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست اما با روابطی می‌توان آنرا بدست آورد. زاویه گیرنده را میتوان بطور مستقیم و یا با تبدیل زاویه سمت و ارتفاع به دست آورد [۱]:

$$R_R = \frac{(R_T + R_R)^2 - L^2}{2(R_T + R_R + L\sin\theta_R)} \qquad (۲-۱۱)$$

برای محاسبه فاصله دوپایه یا $(R_T + R_R)$، در روش مستقیم، گیرنده فاصله زمانی بین دریافت اکوی هدف و دریافت سیگنال فرستنده را حساب می کند و در آن صورت با رابطه زیر فاصله را محاسبه می‌کند:

$$(R_T + R_R) = c\Delta T + L \qquad (۱۲-۲)$$

در روش غیرمستقیم با استفاده از هم‌زمان سازی[1]، فاصله زمانی بین دریافت اکوی هدف و ارسال پالس توسط فرستنده را محاسبه می کند:

$$(R_T + R_R) = c\Delta T \qquad (۱۳-۲)$$

۲-۲-۷ همزمان‌سازی

همزمان کردن زمان و فاز برای پردازش داپلر یا MTI[2] در رادارهای دوپایه لازم است [۱]. سنکرون کردن زمان برای تعیین فاصله لازم است. این کار با استفاده از ارسال سیگنال از فرستنده به گیرنده برای سنکرون کردن یک ساعت یا یک نوسان‌ساز محلی، از طریق خطوط مخابراتی و یا به طور مستقیم (در صورت وجود دید مستقیم بین فرستنده و گیرنده) صورت میگیرد. همچنین این سنکرون سازی میتواند از طریق یک سیستم دیگر مثل GPS[3] صورت بگیرد.

هماهنگ کردن فاز، برای پردازش داپلر یا MTI همانند رادار تک پایه، لازم است. برای پردازش ناهمدوس[4] مثل رادار تک پایه می‌توان از انعکاس کلاتر استفاده کرد. برای پردازش همدوس[5] می‌توان از روش‌هایی مشابه سنکرون کردن زمان استفاده کرد. برای سنکرون سازی می‌توان از یک کانال مرجع در گیرنده استفاده کرد (در صورت وجود دید مستقیم بین فرستنده و گیرنده) و از سیگنال این کانال در هبسته‌یاب استفاده کرد.

۲-۳ رادارهای غیرفعال

رادارهای غیرفعال گونه ای از رادارهای دوپایه هستند، که فرستنده اختصاصی ندارند و از فرستنده‌های موجود در محیط، استفاده می کنند. ایده استفاده از فرستنده‌های موجود در محیط، ایده جدیدی نیست. نخستین آزمایش در زمینه رادار غیرفعال، در سال ۱۹۳۵ در دونتری انگلستان انجام شد. در این آزمایش، آرنولد ویلکینز و

[1] Synchronization
[2] Moving Target Indicator
[3] Global Positioning System
[4] Non-coherent
[5] Coherent