Archive of SID

نشریه علمی «راداری»
سال هفتم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۸؛ ص ۱۳۴-۱۱۹

فریب موشک کروز ضدکشتی با استفاده از شناور سطحی بدون سرنشین مجهز به جمر راداری

روح‌اله هادی‌پور گودرزی[۱]، سید مهدی حسینی اندارگلی[۲*]

۱-دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۲- استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۸/۰۱/۲۰؛ پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰)

چکیده

در این مقاله به ارائه مطالعات طراحی و شبیه‌سازی عملکرد سامانه جمر راداری مبتنی بر DRFM در یک شناور سطحی بدون سرنشین که به‌عنوان دکوی فعال راداری برای محافظت ناو خودی در برابر موشک کروز ضدکشتی دارای سیکر رادیویی عمل می‌کند، پرداخته شده است. در این ساختار عملیاتی، فرض بر آن شد که برخی از مشخصات مهم سیگنالی تهدید، توسط سامانه‌های ESM ناو به‌موقع استخراج و از طریق لینک مخابراتی در اختیار جمر راداری در شناور بدون سرنشین قرار گیرد. جمر راداری با ضبط و تغییر سیگنال‌های دریافتی از سیکر به‌همراه مانورهای شناور سطحی بدون سرنشین که به‌صورت از پیش‌برنامه‌ریزی شده و یا کنترل از راه دور انجام می‌شود، موشک را از اصابت به ناو خودی منحرف سازد. جدا کردن محل جمر از پلت‌فرم مورد حفاظت (ناو خودی) و نصب آن در یک شناور سطحی می‌تواند به اثربخشی بهتر عملیات فریب و کاهش ریسک اصابت موشک به ناو خودی از طریق انحراف مؤثرتر و فریب زاویه‌ای موشک نیز بیانجامد به‌نحوی که ناو خودی را بتوان از زاویه دید سیکر موشک خارج نمود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با درنظر داشتن محدودیت‌های حجمی، وزنی، توانایی مانور و دریامانی شناور سطحی بدون سرنشین، تجهیز آن به جمر راداری برای فریب انواعی از موشک‌های کروز ضدکشتی مجهز به سیکر رادیویی، می‌تواند اثربخش باشد.

واژگان کلیدی

جمر تکرارگر، فریب راداری، سیکر رادیویی، موشک کروز، شناور سطحی بدون سرنشین

۱. مقدمه

محافظت از کشتی‌های جنگی و ناوها در برابر تهاجمات موشکی دشمن همواره یک دغدغه اصلی برای نیروهای نظامی بوده است. یکی از مهم‌ترین تهدیدات علیه کشتی‌ها، موشک‌های کروز ضد کشتی هستند. اکثر این موشک‌ها پس از پرتاب به‌صورت کاملاً مستقل به سمت اهداف خود حرکت می‌کنند و به همین دلیل به آنها "شلیک کن و فراموش کن[۱]" می‌گویند. در فازهای اولیه پس از پرتاب این نوع از موشک‌ها به سمت هدف، هدایت موشک بر اساس اطلاعات حاصل از سامانه کنترل آتش که در لحظه پرتاب در کامپیوتر موشک بارگذاری شده است با کمک دستگاه‌های ناوبری داخل موشک انجام می‌شود. در مراحل پایانی حرکت، موشک وارد فاز آشیانه‌یابی شده و هدایت موشک به‌سمت هدف با کمک سامانه جستجو و ردگیری فعال که می‌تواند راداری، اپتیکی، حرارتی و یا ترکیبی از آنها باشد صورت گیرد.

مساله‌ی فریب مفهوم جدیدی نیست و موشک‌های کروز دریایی ضدکشتی که اکثراً از سامانه‌های فعال راداری برای هدایت فازهای پایانی حرکت برخوردار هستند امکان اینکه بتوان آنها را با روش‌های فریب و جنگ الکترونیک از اصابت به هدف بازداشت، همواره در عملیات نظامی مورد توجه بوده است[۱و۲]. اگرچه با پیشرفت فناوری‌های ضدجنگ الکترونیک و پیاده‌سازی آنها در موشک‌های نسل جدید، اثربخشی عملیات جنگ الکترونیک علیه آنها سخت‌تر می‌شود اما به موازات آن نیز سامانه‌های جنگ الکترونیک در حال توسعه و همچنان استفاده از روش‌های فریب علیه موشک‌ها در حال گسترش روزافزون می‌باشند.

سامانه‌های فریب برای محافظت از یک کشتی در برابر موشک به‌صورت نصب روی خود کشتی[۲] و یا نصب روی پلت‌فرم جدای از کشتی[۳] نظیر هلی‌کوپتر، دکوی پرتاب‌شونده..) مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از شناور بدون سرنشین سطحی سبک به‌عنوان پلت‌فرم فریب، مفهوم نوینی است که برای فریب

* نویسنده مسئول: smh_andargoli@nit.ac.ir

[1] Fire and forget

[2] On-board
[3] Off-board

www.SID.ir

Archive of SID

موشک‌های ضدکشتی مورد توجه محافل عملیاتی نظامی قرار گرفته است [۳ و ۴]. تجهیزات جنگ الکترونیک مورد استفاده در این شناورها با انتشار سیگنال رادیویی مناسب در عملکرد سامانه موشکی مهاجم می‌تواند اختلال ایجاد کند و آن را از کار بیاندازد و یا اینکه از این شناورهای بدون‌سرنشین می‌توان به‌عنوان فریب استفاده کرد و موشک مهاجم را به سوی یک هدف جعلی کشاند.

نیروی دریایی کانادا در مارس سال ۲۰۱۷ طرح مقابله با تهدید موشک‌های کروز پرتاب‌شده از سمت شناورهای کوچک ایران و چین را با استفاده از شناورهای بدون سرنشین کوچک کنترل‌شونده از راه دور با نام هامپ‌بک[1] که مجهز به تجهیزات جمینگ است، رسانه‌ای نموده است. هامپ‌بک شامل محموله‌های جنگ الکترونیک برای ارسال سیگنال‌های رادیویی و فریب موشک مهاجم است [۳].

ایالات متحده نیز به‌عنوان پیشرو فناوری‌های هوشمندسازی برای مقابله با جدیدترین نسل سیکرهای به‌کاررفته در موشک‌های ضدکشتی از فناوری فریب راداری توسط شناور بدون سرنشین HS-USSV استفاده نموده است. با به‌کارگیری این محموله‌ها در چندین شناور بدون سرنشین، می‌توان محدوده‌ی وسیعی را برای انجام عملیات حمله و دفاع الکترونیکی در اختیار گرفت[۵].

در این مقاله تمرکز اصلی بر روی تعیین مشخصه‌های سامانه و شبیه‌سازی عملکرد یک جمر راداری در مد تکرارگر مبتنی بر DRFM[2] بر اساس محدودیت وزنی و حجمی قابل نصب روی یک شناور سبک بدون سرنشین علیه سیکر فعال رادیویی موشک است.

۲. اخلال و فریب راداری

در ادبیات نظامی، جنگ الکترونیک[3] سه حوزه اصلی شامل پشتیبانی الکترونیکی[4]، حفاظت الکترونیکی[5] و حمله الکترونیکی[6] را در بردارد. عملیات اخلال و فریب فعال راداری به‌عنوان یک اقدام پدافند غیرعامل در زمره حمله الکترونیکی است که هدف آن کنترل طیف الکترومغناطیسی تهدیدات مجهز به سامانه‌های جستجو، ردگیر و شنود راداری می‌باشد. در واقع هدف از این نوع عملیات، ایجاد اخلال در شناسایی مشخصه‌های تجهیزات خودی توسط تجهیزات تهدید می‌باشد تا دشمن نتایج اشتباهی از ظرفیت، توانایی و شرایط تجهیزات خودی به‌دست آورد[۶ و ۷].

در بحث اخلال و فریب راداری موشک‌های کروز ضدکشتی، هم‌زمان با روشن شدن سیکر فعال موشک می‌توان از طریق ارسال سیگنال اخلال، امکان استخراج اطلاعات دقیق از ناو یا کشتی را برای موشک سخت کرد. در صورتیکه اخلال به اندازه کافی مؤثر واقع شود حتی امکان قفل روی ناو یا آشکارسازی آن برای سیکر سخت می‌شود اما غالباً در مرحله ردگیری سیکر است که می‌توان یک اخلال مؤثر علیه سیکر به‌کار برد. هدف اصلی از اخلال در مرحله ردگیری، شکستن قفل حلقه ردگیر و اجبار سیکر به جستجوی مجدد هدف است که معمولاً این کار یک فرآیند زمان‌بر است و امکان عکس‌العمل مناسب را از موشک خواهد گرفت. در صورتی‌که موشک نتواند مجدداً یک قفل پایدار را در یک برد مناسب برقرار نماید امکان اصابت موشک به هدف کاهش می‌یابد.

شکل هوشمندانه اخلال، فریب است. در روش‌های فریب، هدف اصلی ارسال اطلاعات جعلی و اشتباه برای سیکر است که این امر هم می‌تواند قفل ردگیری را از مقدار واقعی منحرف نماید و در زمان مناسب با قطع سیگنال فریب، قفل بشکند که این امر مستلزم جستجوی مجدد مشخصات هدف توسط موشک است و هم اطلاعات جعلی می‌تواند موشک را به نقطه دلخواه ما منحرف نماید.

یکی دیگر از روش‌های اخلال، اخلال پسیو (غیرفعال) است. در این روش یک هدف جعلی مشابه هدف واقعی ایجاد می‌شود که می‌تواند موشک را به سمت خود منحرف نماید، مانند دکوی پسیو که با سطح مقطع راداری بالاتر از کشتی با فاصله کمی از کشتی اصلی به دنبال آن کشیده می‌شود. در این حالت، مشخصه زاویه‌ای، برد و سرعت آن خیلی شبیه هدف اصلی است و اگر هدایت فقط مبتنی بر سیکر فعال باشد به احتمال قوی موشک به دکوی برخورد خواهد کرد. مشابه این عمل را چف نیز در مرحله نهایی هدایت می‌تواند انجام دهد. برای تهدیدات مجهز به حسگرهای IR نیز می‌توان از فلیر استفاده کرد.

روش‌های مختلفی برای ایجاد اخلال در عملکرد سیکرهای رادیویی تاکنون به‌کار رفته است اما با توجه به پیشرفت‌های وسیع در ساخت و پردازش سیگنال در نسل‌های جدید موشک به‌منظور مقابله با جنگ الکترونیک، خیلی از این روش‌ها کارایی نخواهد داشت. فریب فعال رادیویی با کمک تکرارگر یکی از روش‌هایی است که می‌تواند کارایی خوبی جهت اخلال در عملکرد سیکرهای حتی با قابلیت ضد جنگ الکترونیک بالا، داشته باشد. تکرارگرها با تولید (سیگنال) بازگشتی همدوس این امکان را فراهم می‌سازند

[1] Humpback
[2] Digital Radio Frequency Memory
[3] Electronic Warfare (EW)
[4] Electronic Support (ES)
[5] Electronic Protection (EP)
[6] Electronic Attack (EA)

www.SID.ir

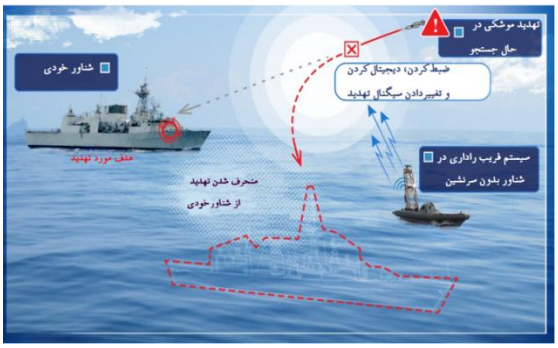
Archive of SID

که دامنه، فرکانس و مشخصه‌های گذرای سیگنال بازگشتی رادار واقعی تقلید شود. تکرارگرها معمولاً به‌نوعی از حافظه برای ذخیره‌سازی سیگنال‌های مایکروویو برای تولید سیگنال‌های انتظاری بازگشتی نیاز دارند که این‌کار معمولاً توسط DRFM انجام می‌شود [۸].

۳. اجزای درگیر در عملیات فریب راداری توسط شناور بدون سرنشین

با بررسی سیکرهای رادیویی موشک‌های کروز دریایی مجهز به هدایت آشیانه‌یاب فعال راداری، اکثر آنها در باند فرکانسی X و Ku کار می‌کنند. شناور سطحی بدون سرنشین به‌منظور پشتیبانی و محافظت از ناو خودی در برابر این تهدیدات، به سامانه فریب فعال راداری در این باندهای فرکانسی مجهز خواهد شد تا بتواند منجر به اخلال در عملکرد یا فریب این موشک‌ها شود. کنترل عملیات این شناور بدون سرنشین توسط اپراتور مستقر در ناو خودی (ناو مادر) یا به‌صورت هوشمند و خودکار صورت می‌پذیرد.

شکل (۱) طرح مفهومی عملیات فریب موشک توسط یک شناور سطحی بدون سرنشین مجهز به جمر راداری را نشان می‌دهد. اطلاعات تهدید از طریق سامانه ESM[1] کشتی خودی شناسایی و تصمیمات و فرامین کنترلی لازم از طریق لینک مخابراتی در اختیار شناور بدون سرنشین قرار می‌گیرد. شناور سطحی بدون سرنشین با جمر راداری مجهز به DRFM از طریق تغییر سیگنال دریافتی سیکر راداری موشک، حلقه ردگیر آن‌را در اختیار می‌گیرد و موشک را از اصابت به هدف اصلی باز می‌دارد.



شکل (۱): فریب موشک توسط شناور سطحی بدون سرنشین مجهز به جمر راداری

اجزای اصلی درگیر در عملیات فریب راداری توسط شناور بدون سرنشین عبارت‌اند از؛

۱. ناو خودی (به‌همراه سامانه‌های پشتیبانی الکترونیکی ESM ، مرکز کنترل و اپراتوری شناور بدون سرنشین، لینک مخابراتی...)
۲. شناور بدون سرنشین سطحی (به‌همراه جمر راداری، لینک مخابراتی و...)
۳. تهدید (موشک کروز ضد کشتی)

برای طراحی مناسب سامانه جمر راداری لازم است مشخصات عملیاتی و پارامترهای کلیدی تهدیدات راداری، تجهیزات ESM و راداری ناو مادر، لینک مخابراتی و نیز قابلیت‌های شناور بدون سرنشین (محدودیت‌های وزنی، حجمی، سرعت، مانور، دریامانی و ..) شناسایی شود.

۳-۱. ناو خودی (مجهز به ESM، مرکز کنترل و اپراتوری شناور بدون سرنشین و...)

ناو خودی، هدف تهدید موشکی می‌باشد و شناور بدون سرنشین یک لایه پدافندی غیرعامل را در شعاع معین از این شناور علیه تهدیدات موشکی باید ایجاد نماید. ناو خودی از سطح مقطع راداری معین برخوردار است و مجهز به سامانه‌های پشتیبانی الکترونیکی ESM برای شنود و شناسایی مشخصه‌های تهدیدات می‌باشد. فرماندهی و کنترل اپراتوری شناور بدون سرنشین نیز در این ناو مستقر است.

یکی از ارکان موفقیت عملیات اخلال و یا فریب راداری، عملکرد مناسب سامانه ESM برای استخراج زمان واقعی مشخصات سیگنال‌های راداری در محیط اطراف ناو است. این سامانه به‌عنوان یک حس‌گر اطلاعات ارزشمندی را برای مواجه با تهدیدات می‌تواند فراهم نماید تا در اختیار مرکز کنترل و فرماندهی ناو قرار گیرد. بر اساس این اطلاعات، فرامین کنترلی لازم به شناور بدون سرنشین صادر می‌شود. اهم وظایف و قابلیت‌های ESM ناو عبارت‌اند از؛

- مانیتورینگ طیفی و شناسایی فرکانسی سیگنال‌ها در محیط
- تشخیص زاویه ورود سیگنال (DF[2])
- تحلیل زمانی و تشخیص عرض پالس و پهنای باند سیگنال
- تشخیص PRF[3]
- تشخیص فشرده‌سازی پالس
- تشخیص پرش فرکانسی
- تشخیص سیگنال متغیر با زمان

[1] Electronic Support Measure

[2] Direction Finding
[3] Pulse Repetition Frequency

www.SID.ir

Archive of SID

- دسته‌بندی سیگنال‌ها و تشخیص سیگنال مطلوب
- اولویت‌بندی سیگنال‌ها و انتخاب سیگنال اولویت بالا
- ردگیری سیگنال اولویت بالا
- به‌روزرسانی اطلاعات سیگنال انتخاب‌شده

در ایستگاه کنترل و اپراتوری شناور سطحی بدون سرنشین در اتاق عملیات ناو، تمام اطلاعات اجزای درگیر در عملیات و نتایج آن برای اپراتور شناور سطحی بدون سرنشین نمایش داده و در عین حال بر اساس الگوریتم‌های طراحی‌شده، نتایج ترکیب اطلاعات حس‌گرها، اولویت‌بندی سیگنال‌ها و گزینه‌های برتر جهت انتخاب سناریو درگیری تعیین می‌شود. این بخش به‌طور مستقیم با اپراتور شناور سطحی بدون سرنشین در ارتباط بوده و فرامین به شناور بدون سرنشین ارسال و دریافت می‌شود. مهم‌ترین وظایف این بخش عبارت‌اند از؛

- تبادل اطلاعات با مرکز فرماندهی عملیات ناو و لینک مخابراتی مخصوص با شناور سطحی بدون سرنشین
- انتخاب سناریوی درگیری (فریب یا اخلال)
- محاسبه پارامترهای لازم برای سامانه جمر در شناور بدون سرنشین
- محاسبه پارامترهای حرکتی و موقعیتی شناور بدون سرنشین
- اجرا، دریافت و نمایش اطلاعات برای اپراتور

در کنار سخت‌افزارهای نمایشگرها و کلیدهای اعمال فرامین، مهم‌ترین قسمت در این بخش الگوریتم‌های محاسبات هوشمند و مدیریت نبرد است.

۳-۲. شناور سطحی بدون سرنشین مجهز به جمر راداری

شناور سطحی بدون سرنشین یک شناور سبک تندرو و حامل تجهیزات جمر راداری است. این شناور از قابلیت کنترل از راه دور و کنترل خودکار برخوردار خواهد بود. بر اساس قیود اولیه طراحی، وزن آن کمتر از ۲ تن و طول آن کمتر از ۸ متر درنظر گرفته شده است. با یک سامانه رانش برون‌نصب ۲۰۰ اسب بخاری، سرعت آن تا ۲۰ متر برثانیه در شرایط دریای آرام خواهد رسید. جنس بدنه اصلی آن از کامپوزیت الیاف شیشه می‌باشد. سایر تجهیزات این شناور شامل اتوپایلوت، سامانه ناوبری، لینک مخابراتی بی‌سیم امن، سامانه الکتریک و عملگرها می‌باشد. ارتباط این شناور با ناو خودی از طریق لینک مخابراتی امن برقرار خواهد بود و حداکثر شعاع عملیاتی آن نسبت به ناو در حد دید خط مستقیم می‌باشد. به‌دلیل سبک و کوچک بودن این شناور، محدودیت‌هایی به‌لحاظ حجم و وزن جانمایی در دسترس و نیز مشخصه‌های دریامانی (نوسانات حرکتی شناور در دریا) وجود دارد که بالطبع در تعیین سطح توان قابل نصب برای سامانه جمر در این شناور، انتخاب آنتن و پایدارسازی آن و... باید مورد توجه قرار گیرد.

۳-۳. موشک کروز ضد کشتی

یکی از مهم‌ترین سلاح‌هایی که نیروهای دریایی بر علیه کشتی‌ها و ناوها در جنگ‌های نوین بکار می‌گیرند، موشک‌های کروز ضد کشتی است که از فواصل دور از روی ناوها یا از هواپیماها و هلیکوپترها و یا از سواحل شلیک شده و بعد از طی مسافتی طولانی و بر اساس سناریو درگیری تنظیم‌شده در آنها، به هدف برخورد کرده و حجم وسیعی از خسارت را به بار می‌آورند و حتی ممکن است منجر به غرق شدن کشتی‌های جنگی شوند. این نوع سلاح‌های پیشرفته معمولاً در فازی از درگیری خود از طریق یک سیکر فعال رادیویی، سمت حرکت خود را تنظیم کرده و ردگیری هدف را انجام می‌دهند. در جدول (۱، مشخصات تاکتیکی-فنی تعدادی از موشک‌های کروز ضدکشتی معروف ارائه شده است.

۳-۳-۱. موشک هارپون

انواع این موشک از سیکر فعال باند KU و برخی مدل‌های آن هم از سیکر پسیو IR و هم از ESM بهره می‌برد. این موشک قابلیت عملیات تا فورس ۵ و با امواجی به ارتفاع ۳,۶ متر را دارد. در شکل (۱ مدل پرتاب سطحی آن با سیکر رادیویی نمایش داده شده است. این موشک برای هدایت و آشیانه یابی از تجهیزات الکترونیکی مختلفی استفاده می‌نماید. قبل از پرتاب بر اساس اطلاعات تخمینی از هدف تنظیمات اولیه در موشک انجام می‌شود و بعد از پرتاب موشک بر اساس حس‌گرهای INS و GPS هدایت می‌شود. این موشک از یک ارتفاع‌سنج راداری برای تشخیص ارتفاع استفاده می‌نماید مخصوصاً در مد کروز که باید ارتفاع با دقت بالایی استخراج گردد تا موشک به سطح برخورد ننماید. بعد از رسیدن موشک به یک بردی که از قبل و پیش از شلیک تنظیم شده است، سیکر فعال روشن شده و هدایت موشک بر اساس ردگیری هدف توسط سیکر رادیویی فعال انجام می‌شود. در مدل‌های جدید از سیکر غیرفعال IR و سامانه ESM هم برای هدایت موشک استفاده شده است. مطابق گزارش‌ها سیکر فعال قادر است اهداف دریایی کروز را با احتمال بالای ۹۰ درصد و قایق‌های پاترول را با احتمال کمتر از ۸۰ درصد در برد تنظیم شده آشکارسازی نماید. موشک بر اساس تنظیمات انجام‌شده می‌تواند به جستجوی وسیع، متوسط یا باریک ناحیه محتمل حضور هدف بپردازد که این امر زمان اکتساب هدف را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۱): مشخصات تاکتیکی و فنی چند موشک کروز ضدکشتی [۹]- [۱۲]

موشک	هارپون	اگزوست	یاخونت/براهموث
مدل	AGM-84, RGM-84, UGM-84,...(Block1, Block II)	SM39, AM 39, MM38, MM40,...(Block2, Block3)	P-100 Oinks, P-800 Yahkont (3M55)
کشور توسعه دهنده	آمریکا	فرانسه	روسیه/هند
هدایت	تا میان مسیر براساس اتوپایلوت؛ در آخر مسیر با سیکر راداری فعال باند Ku/غیرفعال IR	تا میان مسیر براساس اتوپایلوت؛ در آخر مسیر با سیکر راداری فعال باند J	تا میان مسیر براساس اتوپایلوت؛ در آخر مسیر با سیکر راداری فعال باند X/غیرفعال IR
محدوده زاویه جستجو سیکر	-	-	±۴۵ درجه
محدود زاویه شلیک	۴۵ درجه	۴۵ درجه	۱۵ تا ۹۰ درجه
ارتفاع پرواز فاز نهایی	۱۵ تا ۶۰ متر	-	۵ تا ۱۵ متر
سرجنگی	۲۲۰ کیلوگرم HE-frag نفوذی	۱۶۵ کیلوگرم HE-frag نفوذی	۲۰۰ کیلوگرم HE نیمه نفوذی
پیشران	بوستر سوخت جامد؛ ساستینر توربو جت سوخت مایع	موتور سوخت جامد تک مرحله‌ای	بوستر سوخت جامد؛ ساستینر رم‌جت سوخت مایع
برد حداکثر	۱۲۰ تا ۲۲۰ کیلومتر (بسته به مدل و پلت‌فرم پرتاب)	۷۰کیلومتر Block2 ۱۸۰ کیلومتر Block3	۳۰۰ کیلومتر با تراز کروزی بالامایین، ۱۲۰ کیلومتر با تراز کروزی پایین‌مایین
برد حداقل	۵۰ کیلومتر	۴ کیلومتر	۵۰ کیلومتر
سرعت	۰.۸۵ ماخ	۰.۹ ماخ	۲ تا ۲.۵ ماخ
طول	۴.۶ متر (سطح پرتاب) ۳.۸ (هواپایه)	۵.۸ متر (سطح پرتاب) ۴.۷ متر (هواپایه)	۸.۹ متر
قطر بدنه	۳۴۰ میلی‌متر	۳۵۰ میلی‌متر	۶۷۰ میلی‌متر
طول بال	۹۱۰ میلی‌متر (۲۲۰۰ میلی‌متر AGM-84D) ER-SLAM-Block II	۱۰۰۰ میلی‌متر ۱۱۳۰ میلی‌متر Block3	۱۴۰۰ میلی‌متر
وزن کامل	۶۹۰ کیلوگرم (دریاپایه) ۵۲۶ کیلوگرم (هواپایه)	۶۷۰ تا ۸۷۵ کیلوگرم	۳۰۰۰ کیلوگرم
پلت‌فرم پرتاب	کشتی، زیردریایی، هواپیما، کامیون	کشتی، زیردریایی، هواپیما، کامیون	کشتی، زیردریایی، هواپیما، کامیون
سال عملیاتی شدن	۱۹۷۷	۱۹۷۳	۱۹۹۸

شکل (۱): موشک هارپون(پرتاب سطحی) [۱۴]

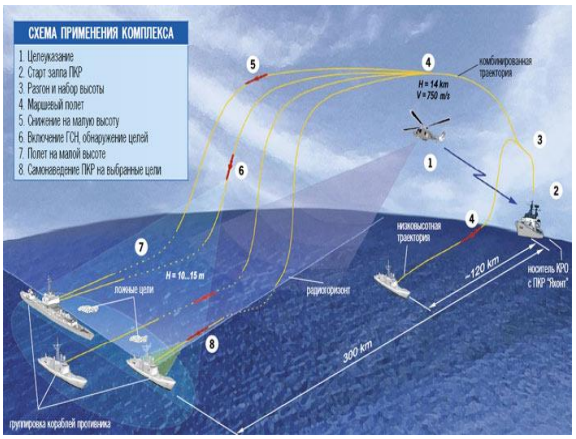
۳-۳-۲. موشک یاخونت/براهموث

این موشک هم از سیکر فعال باند X و هم از سیکر پسیو IR[1] بهره می‌برد (شکل (۲)). هدایت این موشک تا میانه مسیر بر عهده سامانه ناوبری داخلی و در بخش پایانی بر عهده سامانه راداری فعال/غیرفعال تعبیه‌شده در موشک می‌باشد. این موشک قابلیت انتخاب یک کشتی از یک گروه را به‌عنوان هدف دارد.

شکل (۲): موشک یاخونت/براهموث [۱۱]

موشک دارای سرعت کروز ۲,۵ ماخ در ارتفاع پروازی بالا و ۲ ماخ در ارتفاع پایین است. کمینه برد آن ۵۰ کیلومتر و بیشینه برد ۳۰۰ کیلومتر (بالا-پایین) و ۱۲۰ کیلومتری (پایین-پایین) است.

شکل (۳) مراحل درگیری و مسیر پروازی موشک یاخونت/براهموث را نشان می‌دهد. در فاصله ۶۰-۸۰ کیلومتری هدف، سیکر موشک روشن شده و به دنبال هدف می‌گردد و پس از یافتن هدف بر روی آن قفل راداری می‌کند. پس از آنکه موشک بر روی هدف قفل کرد، در فاصله حدود ۲۵- ۳۰ کیلومتری هدف، رادار از حالت فعال به حالت غیرفعال تغییر وضعیت می‌دهد. برای جلوگیری از شناسایی، علاوه بر استفاده از حالت غیرفعال راداری موارد خاص دیگری نیز اندیشیده شده است، از جمله استفاده از مواد جاذب امواج راداری در سطح بدنه موشک و نیز کاهش ارتفاع پروازی در فاز پایانی (معمولاً در ارتفاع ۵- ۱۵ متری از سطح دریا). موشک دارای یک رادار پیش‌اخطار نیز می‌باشد که در صورت قفل راداری بر روی موشک، موشک را در حالت اجرای مانورهای سریع و تند قرار می‌دهد. در سالیان اخیر موشک یاخونت مورد بهینه‌سازی‌های فراوانی قرار گرفته که از این میان می‌توان به افزایش سامانه‌های هدایت موشک، استفاده از سامانه ناوبری ماهواره‌ای و همچنین افزوده شدن یک جستجوگر تصویربرداری مادون قرمز در نمونه زمین پایه آن اشاره کرد [۱۱].



شکل (۳): مراحل درگیری موشک یاخونت/براهموث [۱۱]

۴. روش‌های ضد جنگ الکترونیک توسط موشک‌ها

بررسی موشک‌های کروز دریایی و رادارهای سطحی روز دنیا نشان می‌دهد که سیکرها و حس‌گرهای بکار گرفته در آنها و رادارهای جدید پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در قابلیت‌های ضد جنگ الکترونیک[2] داشته‌اند. موشک‌های جدید و رادارهای ردگیر معمولاً تلفیقی از حس‌گرهای فعال راداری و دوربین‌های IR یا مرئی را بکار می‌برند تا در مراحل نهایی درگیری امکان فریب یا اخلال از طریق حس‌گرهای پسیو IR کاهش یابد. با توجه به اینکه قبل افق رادیویی، سیکرها در حالت سکوت راداری بوده و علاوه بر این، در

[1] Infra-red

[2] Electronic Counter Counter Measure (ECCM)

www.SID.ir

Archive of SID

حالت سینه‌مال[1] در ارتفاع پایینی پرواز می‌نمایند امکان شنود سیگنال راداری آنها قبل از افق رادیویی (حدود ۳۰ کیلومتر) وجود ندارد و با توجه به به‌کارگیری دوربین IR در فاز نهایی درگیری (حدود ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر آخر با توجه به برد دوربین‌های IR جدید)، سامانه فریب راداری تنها در مدتی که موشک کروز فاصله ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری را طی می‌نماید قابلیت درگیری دارد. این مدت برای موشک‌های مافوق صوت روسی (سرعت حدود ۳ ماخ) در حدود ۱۰ تا ۲۰ ثانیه و برای موشک‌های کروز غربی (سرعت نزدیک ۱ ماخ) در حدود ۳۰ تا ۶۰ ثانیه است.

سامانه‌های راداری و سیکرهای نسل جدید از سیگنال‌های بسیار پیچیده‌ای برای مقابله با اخلال و فریب استفاده می‌نمایند که برای مؤثر واقع شدن نیاز است سامانه‌های اخلال و فریب نیز به همان نسبت پیچیده و هوشمند گردند. مهم‌ترین خصوصیاتی که باعث می‌شود اخلال سیکرهای جدید سخت شوند را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد؛

- پردازش همدوس از طریق تجمیع همدوس تعداد زیادی از پالس‌های برگشتی
- تغییر فرکانس حامل پالس‌های راداری
- فشرده‌سازی پالس
- تغییر مشخصات پالس‌های ارسالی
- ردگیری مونوپالس
- سطح ساید لوب پایین آنتن
- SLC[2] و SLB[3] [۱۳]
- آشیانه‌یابی روی اخلالگر
- استفاده از چندین حسگر

۵. تحلیل اولیه سیکر راداری موشک‌های کروز ضد کشتی

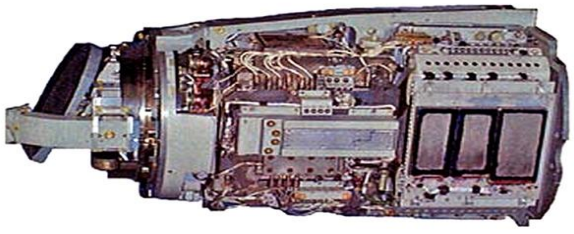
سیکر راداری فعال موشک هارپون طبق برخی از اسناد در باند Ku و با توان حداکثر ۳۵ کیلووات و توان متوسط ۶۸۴ وات عمل می‌کند [۹]. ردگیری زاویه‌ای سیکر به‌صورت مونوپالس است. آنتن سیکر از نوع آرایه صفحه‌ای گیمبال شده و قطر سیکر تقریباً ۳۰ سانتی‌متر هست. از تحلیل مشخصات سیکر راداری می‌توان دریافت که فرستنده سیکر یک فرستنده توان بالا است که با توجه به $dutycycle = \frac{P_{ave}}{P_{peak}} = \frac{684}{35kw} = 0.02$ می‌توان پی به حدود عرض پالس‌های ارسالی برد. با توجه به اینکه حدود PRF بکار گرفته‌شده یک کیلوهرتز تخمین زده می‌شود (به‌دلیل برد بدون ابهام ۵۰ کیلومتر) بنابراین عرض پالس تقریباً برابر با :

$$dutycycle = \frac{P_{ave}}{P_{peak}} = \frac{\tau}{PRI} \quad (۱)$$

$$\frac{\tau}{1m\sec} = 0.02 \Rightarrow \tau = 20\mu\sec$$

خواهد شد که به نسبت پالس کوتاهی می‌باشد. اما با توجه به این عرض پالس تفکیک‌پذیری برد برابر با $\Delta R = \frac{c\tau}{2} = 3\ km$ خواهد شد که یقیناً جوابگوی ردگیری مؤثر هدف را نخواهد داد لذا حتماً از فشرده‌سازی پالس در سیکر استفاده شده است. اگر تفکیک‌پذیری محدوده مورد نیاز را حدود ۱۰ متر فرض نماییم حداقل به نرخ فشرده‌سازی $compression_{rate} = \frac{3000}{10} = 300$ نیاز است که می‌توان به روش LFM یا مدولاسیون فاز پالس‌ها به آن دست یافت. در این صورت پهنای باند مؤثر پالس‌ها $BW = \frac{c}{2\Delta R} = 15\ MHz$ خواهد شد. توان متوسط هارپون از یاخونت هم بالاتر است لذا در نگاه اول به نظر می‌رسد برد آشکارسازی آن نیز بیشتر باشد. البته شاید به‌دلیل قطر کمتر آنتن و باند فرکانسی بالاتر، بهره آنتن و تفکیک‌پذیری فرکانسی تغییر زیادی نسبت به یاخونت نداشته باشد. اما به‌دلیل تضعیف بیشتر باند بالاتر شاید توان بیشتر هارپون نتواند برد آشکارسازی هارپون را نسبت به یاخونت افزایش دهد. به هر حال به نظر می‌رسد برد آشکارسازی آنها اختلاف زیادی نداشته باشند. سیکر راداری هارپون از تغییر فرکانس و تغییر PRF استفاده کرده که این امر امکان اخلال در آن را مشکل می‌سازد.

سیکر رادیویی فعال موشک براهموث، یک سیکر رادیویی باند X است که شکل ظاهری آن در شکل (۴)، آورده شده است.



شکل (۴): سیکر رادیویی موشک براهموث [۱۱]

این سیکر از یک لامپ TWT پالسی توان بالا بهره می‌برد. این سیکر قابلیت آشکارسازی اهداف فراتر از ۱۰۰ کیلومتر را داراست و تفکیک‌پذیری برد آن ۹ تا ۱۵ متر و تفکیک‌پذیری زاویه‌ای آن حدود ۱ درجه است و از روش مونوپالس برای ردگیری زاویه‌ای استفاده می‌نماید. این سیکر قابلیت تصویربرداری SAR جهت مقابله با اهداف شهری را دارد. توان متوسط مصرفی آن ۴۰۰ وات است [۱۰]-[۱۱].

[1] Sea Skimming
[2] Side Lobe Cancellation
[3] Side Lobe Blanking

www.SID.ir

Archive of SID

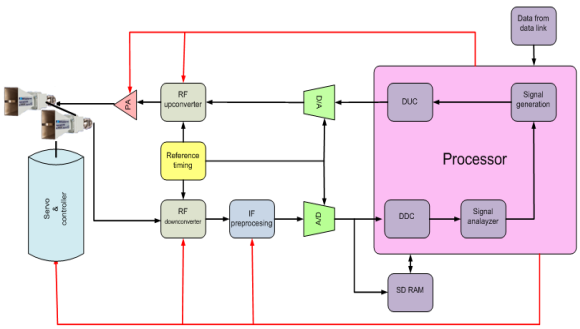
درباره قابلیت‌های ضد جنگ الکترونیک آن گفته می‌شود که از پالس‌های بلند همدوس و برای فشرده‌سازی پالس از مدولاسیون فاز استفاده می‌کند. سیکر قابلیت تغییر تصادفی فرکانس در یک پهنای باند وسیع، قابلیت تغییر طول پالس، تغییر زمان ارسال پالس، تغییر طول کد استفاده شده در مدولاسیون فاز و تغییر سیکل وظیفه پالس‌ها را دارد. این مشخصات باعث خواهد شد تا امکان ایجاد اختلال در عملکرد سیکر از طریق جنگ الکترونیک بسیار سخت شود [۱۰].

در این سیکر امکان تشخیص جمینگ نقطه‌ای، دیکوی پسیو مانند چف دایپل و بازتاب‌کننده زاویه‌ای وجود دارد. از سامانه SAR به روش باریک‌سازی بیم داپلر برای محیط‌های شهری می‌تواند استفاده کند. این سیکر بر اساس بعضی پارامترها امکان تفکیک اهداف دروغین از اهداف واقعی را نیز داراست.

با توجه به تفکیک‌پذیری زاویه‌ای یک درجه آنتن [۱۰] این سیکر حدود ۴۰ دسی‌بل بهره را فراهم خواهد کرد و با توجه تفکیک‌پذیری برد حدود ۱۰ متر مدولاسیون فاز مبتنی بر کد فاز تصادفی می‌تواند حدود $BW = \frac{c}{2\Delta R} = \frac{3\times10^8}{20} = 15MHz$ پهنای باند ایجاد کند. با توجه به باند X بودن، سیکر منطقاً نمی‌تواند بیش‌تر از ۱ گیگاهرتز قابلیت تغییر فرکانس حامل داشته باشد. اگر فرکانس حامل قابلیت پرش‌هایی با تفکیک‌پذیری ۱۵ مگاهرتز را داشته باشد سطح متوسط چگالی طیف توان سیگنال رادار نسبت به حالتی که پرش فرکانسی نداشته باشد حدود $\frac{1GHz}{15MHz} = 66$ برابر کاهش می‌یابد و همین کاهش ۱۸ دسی‌بل امکان شنود را کاهش می‌دهد.

۶. طرح سامانه جمر راداری

جمر راداری برای کارکرد در مدهای فریب و جمر نویزی علیه رادار ردگیر درنظر گرفته شده است. ساختار کلی جمر راداری در شکل (۵) ارائه شده است. در این ساختار از روش DRFM برای فریب رادارهای ردگیر (سیکر موشک) پیش‌بینی شده است.



شکل (۵): ساختار کلی جمر راداری مد تکرارگر با DRFM

با توجه به ساختار پیشنهادی در ادامه برخی از پارامترهای طراحی بر اساس مشخصات سیکر موشک کروز و نیز سناریو درگیری، محاسبه و ارائه می‌شود.

۶-۱. پهنای باند

یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سامانه DRFM پهنای باند لحظه‌ای آن است. وظیفه مدارات گیرنده DRFM دریافت سیگنال رادارهای دشمن با سطح مناسب و ذخیره‌سازی آنها در حافظه است. با توجه به اینکه تهدیدات نسل کنونی دارای تغییرات فرکانسی سریع و در محدوده فرکانسی وسیع هستند به ناچار باید پهنای باند لحظه‌ای DRFM را وسیع در نظر گرفت تا حتی با وجود تغییرات فرکانسی نیز در پهنای باند لحظه‌ای گیرنده DRFM قرار گیرد. با توجه به تکنولوژیهای موجود دنیا به‌طور معمول پهنای باند فرستنده رادار یا سیکر نمی‌تواند بیش‌تر از ۱۰ درصد فرکانس مرکزی باشد بنابراین به نظر می‌رسد برای باند ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز انتخاب پهنای باند لحظه‌ای ۱ گیگاهرتز در بدترین شرایط (فرکانس ۱۸ گیگاهرتز) نیز جوابگو باشد. برای درگیری با هر راداری در باند ۶ تا ۱۸ گیگا هرتز پهنای باند کلی مدارات RF نیز باید کل باند ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز را با یک افت معقول جوابگو باشد.

۶-۲. آنتن

در مورد انتخاب نوع آنتن فرستنده جمر دو گزینه وجود دارد. ۱- استفاده از آنتن کلاسیک و ۲- استفاده از آنتن ارائه فازی. با توجه به جمیع موارد آنتن کلاسیک به‌عنوان گزینه دسترس‌پذیر مدنظر قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مشخصات آنتن عرض بیم جهت سمت و ارتفاع است که متناسب با آن بهره آنتن نیز قابل محاسبه است. در تعیین عرض بیم دقت سامانه ESM در تشخیص جهت ورود سیگنال، خطاهای تبدیل دستگاه مختصات بر اساس ژایروهای بکار گرفته شده و دیگری نوسانات بدنه شناور حامل جمر و روش کنترل نوسانات مؤثر است. با توجه به دقت ESM در زاویه سمت، نوسانات شناور بدون سرنشین در صورت عدم استفاده از پایدارساز و نیز معلوم نبودن برد تهدید، عرض بیم جهت سمت حدود ۳۰ درجه تعیین شده است. در صورت عدم استفاده از پایدارساز آنتن، بهره آنتن با انتخاب عرض بیم ۱۵ درجه در جهت سمت و ۴۰ درجه در جهت ارتفاع، حدود ۱۵ دسی‌بل خواهد شد.

برای آنتن گیرنده DRFM دوگزینه شامل استفاده از آنتن جهت‌دار با بهره مناسب یا استفاده از آنتن همه جهتی وجود دارد. آنتن جهت‌دار باعث بهبود سیگنال به نویز پالس‌های دریافتی خواهد شد اما با توجه به اینکه برای آنتن فرستنده به ناچار باید از آنتن جهت‌دار استفاده کرد (برای افزایش سطح سیگنال جمر

www.SID.ir

Archive of SID

نویزی و فریب در گیرنده دشمن) برای آنتن گیرنده نیز همین نوع آنتن درنظر گرفته می‌شود.

۶-۳. سیگنال به نویز

برای حالتی که رادار ردگیر مد نظر باشد چون بیم رادار همواره روی ناو یا بعد از فریب خوردن روی شناور بدون سرنشین است سطح سیگنال دریافتی مقدار مناسب را خواهد داشت. برای بدترین حالت که توان رادار ۱۰۰ وات و فاصله ۴۰ کیلومتر و بهره آنتن رادار ۳۰ دسی‌بل و بهره آنتن گیرنده DRFM، ۳ دسی‌بل فرض شود در فرکانس ۱۸ گیگاهرتز سطح سیگنال دریافتی پشت آنتن گیرنده برابر با:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \cong -65 dBm \qquad (۲)$$

خواهد شد در حالیکه توان نویز با فرض پهنای باند ۱ گیگاهرتز برای گیرنده و عدد نویز ۱۰ دسی‌بل (در شرایط سخت‌گیرانه) برابر با مقدار زیر خواهد شد؛

$$P_n = KTBF_n \cong -74 dBm \qquad (۳)$$

و سیگنال به نویز ۹ دسی‌بل را فراهم خواهد کرد که خیلی مناسب نیست. زیرا حدود ۵ تا ۱۰ دسی‌بل افت سیگنال داخل گیرنده خواهیم داشت که کار را دشوارتر می‌نماید. این مشکل از پهنای باند وسیع گیرنده نشات می‌گیرد که توان نویز بالایی را وارد A/D خواهد کرد. با توجه به اینکه اکثر رادارهای دشمن قابلیت LPI را دارا هستند بعید نیست که از همین توان کم در فواصل نزدیک استفاده نمایند. می‌توان نشان داد که رادار دشمن با توجه به بهره پردازش همدوسی که به‌دست می‌آورد می‌تواند رهگیری را برای ناوچه‌ای با سطح مقطع راداری ۱۰۰۰ متر مربع هم انجام دهد. توان دریافتی رادار در این شرایط برابر است با؛

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \cong -112 dBm \qquad (۴)$$

با توجه به پهنای باند رهگیری که در بدترین شرایط کمتر از ۱۰۰ هرتز است، توان نویز حداکثر برابر با $P_n = kTB_n N_f = -145 dBm$ خواهد شد که سیگنال به نویز ۳۰ دسی‌بل را برای رادار در بر خواهد داشت.

مشکل اصلی پهنای باند زیاد گیرنده (۱ گیگاهرتز) است که سطح نویز را افزایش خواهد داد و بهره پایین آنتن گیرنده نیز مزید بر علت خواهد شد. البته افزایش بهره تا حدود ۱۵ دسی‌بل نمی‌تواند خیلی مؤثر واقع شود. به نظر می‌رسد یک راه حل، کاهش پهنای باند گیرنده باشد. انتخاب پهنای باند ۱ گیگاهرتز در حالتی‌که فرکانس رادار سریع تغییر می‌نماید نمی‌تواند خیلی کارا باشد زیرا به‌دلیل تأخیر ارسال داده‌ها از ESM ناو به DRFM روی شناور سطحی ساختن پالس‌هایی با انحراف فرکانسی زیاد از فرکانس لحظه‌ای رادار نمی‌تواند بهره پردازش همدوس را در گیرنده رادار دریافت نماید و به احتمال زیاد در فیلترهای گیرنده رادار شدیداً تضعیف خواهد شد. در چنین سناریویی استفاده از مد تکرارگر و تقویت بدون ذخیره‌سازی بهترین گزینه است. لذا DRFM تنها وقتی‌که سیگنال‌های راداری دارای ثبات فرکانسی کافی باشند کارا خواهد بود که در این حالت برای درگیری با یک هدف، انتخاب پهنای باند در حد چند ده مگاهرتز کفایت خواهد کرد.

با توجه به اینکه در مد تکرارگر لازم است با وجود پرش فرکانسی سیگنال رادار بتوانیم عمل فریب را انجام دهیم لذا فرض پهنای باند کمتر از ۱ گیگاهرتز زیر سوال خواهد رفت و برای رسیدن به سیگنال به نویز بهتر استفاده از آنتن گیرنده جهت‌دار با بهره کافی ضروری است و با توجه به ملاحظات مطرح شده برای آنتن فرستنده جمر به آنتنی مشابه آنتن فرستنده جمر در گیرنده DRFM نیاز خواهیم داشت.

۶-۴. تقویت‌کننده توان

برای اینکه سیگنال فریب مؤثر واقع شود و حلقه ردگیری را در رادار در اختیار بگیرد لازم است نسبت جمر به سیگنال در خروجی آشکارساز حداقل ۱۰ دسی‌بل باشد. در این صورت بر اساس معادله رادار، حداقل توان لازم جمر برای مؤثر واقع شدن برابر است با؛

$$\frac{P_j G_j G_{miss} \lambda^2}{(4\pi R)^2} = \left(\frac{J}{S}\right)\frac{P_t G_{\max}^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \Rightarrow$$
$$P_{j-\max} = \left(\frac{J}{S}\right)\frac{P_t G_{\max}\sigma}{4\pi R^2 G_j} = 10 \times \frac{P_t \times 10^{3.5} \times 15000}{4\pi \times (30^K)^2 \times 10^{1.5}} \approx 0.0013 P_t \qquad (۵)$$

که P_j توان جمر، G_j بهره آنتن جمر، G_{miss} بهره آنتن سیکر یا رادار، λ طول موج، σ سطح مقطع راداری شناور اصلی، R فاصله سیکر یا رادار از شناور است.توان پیک رادارهای پالسی با سیکل وظیفه پایین حدود ۲۰-۴۰ کیلو وات و برای رادارهای با سیکل وظیفه بالا (با تقویت کننده حالت جامد) حدود ۲۰۰-۴۰۰ وات است لذا در حالت پالسی در بدترین شرایط به توان ۴۰ وات نیاز داریم. حتی اگر بهره آنتن را ۱۰ دسی‌بل هم فرض نماییم توان مورد نیاز بیشتر از ۱۲۰ وات نخواهد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک لامپ TWT ۱۰۰ تا ۵۰۰ وات برای باند ۶ تا ۱۸ گیگاهرتز همراه با تغذیه و خنک کننده آن بیشتر از ۱۰۰ کیلو وزن نخواهد داشت.

۷. شبیه‌سازی عملیات فریب توسط شناور بدون سرنشین

برای سامانه نظامی الکترونیکی نظیر سامانه فریب و جمینگ راداری، شبیه‌سازی‌های سیستمی یا شبیه‌سازی کلان سناریو

www.SID.ir

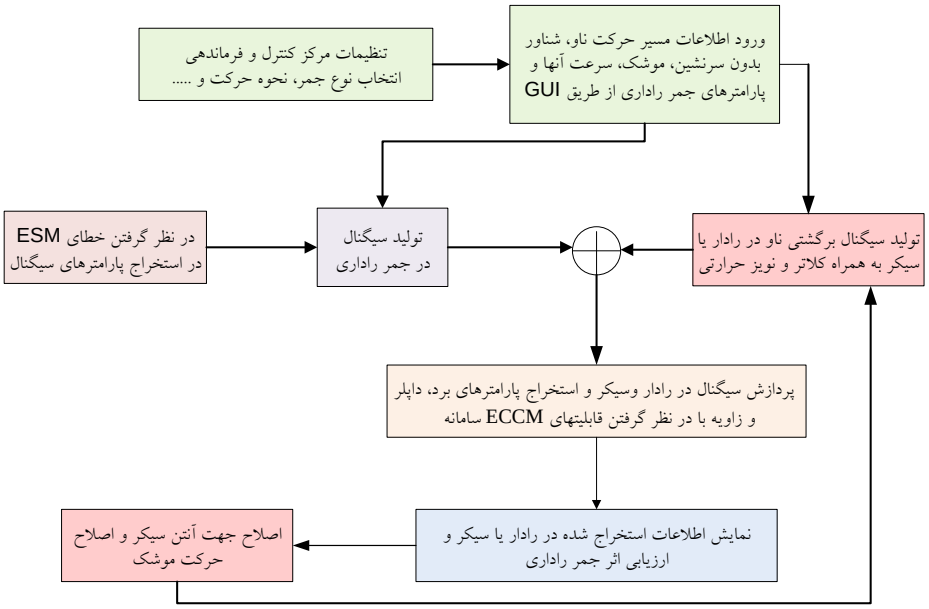
Archive of SID

عملیاتی در مراحل اولیه طراحی مورد توجه می‌باشد. با توجه به اینکه سامانه مولد فعال راداری (جمر راداری) در شناور بدون سرنشین از زیرمجموعه‌های مختلفی تشکیل شده است کارایی هر یک از زیرمجموعه‌ها روی اثربخشی کلی عملیات مؤثر است.

۷-۱. ساختار کلی شبیه‌سازی

برای ارزیابی مولد فعال راداری دو نوع شبیه‌سازی کلان و سامانه مورد استفاده قرار گرفته است که در شکل (۶) ساختار کلی آن ارائه شده است. در شبیه‌سازی کلان، کارایی کلی سامانه در درگیری با تهدیدات مختلف بر اساس روابطی که خلاصه‌شده تحلیل سامانه هستند استخراج شده است. در این نوع شبیه‌سازی می‌توان تأثیر مانور شناور و ناو، مسیر حرکت موشک، کارایی کلی مولد فعال راداری از لحاظ نسبت جمر به سیگنال در سر آشکارساز راداری را بررسی کرد.

در شبیه‌سازی سامانه که در واقع شبیه‌سازی در سطح سیگنال است می‌توان فرآیندهای داخل اجزای رادار یا سیکر را مانیتور کرد و مشخص کرد که سیگنال فریب یا جمر نویزی چه تأثیری در خروجی اجزای رادار خواهد داشت. مهم‌ترین خروجی‌ها، خروجی پردازش سیگنال، خروجی CFAR و خروجی محاسبه خطای زاویه‌ای بر اساس ردگیری مونوپالس است. در این شبیه‌سازی‌ها سیگنال برگشتی ناو، سیگنال کلاتر، سیگنال نویز حرارتی و سیگنال فریب یا جمر نویزی بر اساس مشخصات تنظیمی، مدل‌سازی و به ورودی رادار اعمال می‌شوند. مجموعه زیرسامانه‌های رادار نیز مدل‌سازی شده و تأثیرات آنها بر روی سیگنال‌ها اعمال می‌گردد. تحلیل خروجی پردازش سیگنال به‌عنوان معیاری برای ارزیابی موفق بودن یا نبودن عملیات درگیری نمایش داده خواهد شد.



شکل (۶): ساختار کلی شبیه‌سازی سامانه

۷-۲. جایابی شناور سطحی بدون سرنشین

یکی از موضوعات مهم در بحث فریب راداری موشک توسط شناور سطحی بدون سرنشین، موقعیت قرارگیری آن نسبت به ناو خودی و موشک و نحوه حرکت‌ها آن می‌باشد. یکی از دغدغه‌ها در این رابطه عدم اطلاع (دقیق) از برد سیکر موشک نسبت به ناو خودی و همچنین عدم دقت بالا در تشخیص فاصله نسبی شناور نسبت به ناو از دید رادار ردگیر موشک است. از آنجا که در ابتدای عملیات لازم است حلقه ردگیری سیکر از بایاس اولیه خود که روی مشخصات ناو قفل شده است خارج و به دنبال سیگنال فریب بیافتد، خیلی مهم است که سیگنال فریب در پنجره ردگیری در ابعاد مختلف (زاویه، برد و داپلر) قرار گیرد. عدم دقت در تخمین صحیح سرعت ناو و شناور نسبت به رادار ردگیر یا عدم دقت در تخمین فاصله موشک نسبت به ناو و شناور باعث خواهد شد تا سیگنال فریب به‌درستی تنظیم نشود و در پنجره ردگیری سیکر راداری قرار نگیرد که در این صورت نمی‌تواند مؤثر واقع شود.

مطابق شکل (۸)، اگر موقعیت ناو را با $[x_n , y_n]$ و موقعیت شناور بدون سرنشین را با $[x_d , y_d]$ نمایش دهیم و در صورتیکه ناو مادر بتواند زاویه سمت تهدید را نسبت به خود به دست آورد (از طریق سامانه ESM) و برد تهدید را نیز نسبت به خود داشته باشد (در صورتیکه یک حس‌گر راداری در ناو بتواند اندازه بگیرد)، زاویه سمت هدف نسبت به شناور بدون سرنشین قابل محاسبه

www.SID.ir

Archive of SID

است. موقعیت هدف بر اساس رابطه زیر و با توجه به گزارش حس‌گرهای ناو مادر محاسبه می‌شود.

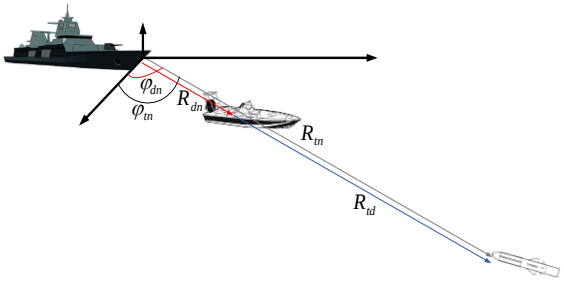
$$[x_t\ , y_t]=[x_n\ +R_{tn}\cos(\varphi_{tn}), y_n+R_{tn}\sin(\varphi_{tn})] \qquad (۶)$$

حال با داشتن موقعیت شناور بدون سرنشین می‌توان زاویه سمت مورد نیاز جهت قرارگیری بیم آنتن جمر روی هدف (موشک) را با رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\varphi_{td}=\mathrm{Arctan}(\frac{y_n+R_{tn}\sin(\varphi_{tn})-y_d}{x_n\ +R_{tn}\cos(\varphi_{tn})-x_d}) \qquad (۷)$$

گلوگاه اصلی در این محاسبه، اندازه‌گیری فاصله هدف نسبت به ناو است که حس‌گرهای پسیو مانند ESM این قابلیت را ندارند و تنها حس‌گرهای اکتیو مانند رادار می‌توانند برد اهداف را اندازه‌گیری نمایند. به‌صورت تقریبی اگر در محاسبات، برد هدف (تهدید) نسبت به ناو را $\hat{R}_{tn}$ فرض نماییم، به‌صورت تقریبی عرض بیم آنتن جمر محدوده قطاعی حدود $\Delta R_{tn}=\hat{R}_{tn}\varphi_{3dB}$ را پوشش خواهد داد. مثلاً اگر برد هدف را ۲۰ کیلومتر فرض نماییم و عرض بیم آنتن ۳۰ درجه فرض شود محدوده قطاعی حدود ۱۰ کیلومتر را پوشش خواهد داد.

مطابق شکل قبل برای تنظیم صحیح زمان ارسال، نیاز به تخمین $R_{tn}-R_{td}$ با دقت حدود تفکیک‌پذیری برد پردازش رادار ردگیر یا سیکر داریم. با توجه به اینکه برد رادار ردگیر یا سیکر توسط سامانه‌های پسیو قابل اندازه‌گیری نیست تنها می‌توان R_{dn} و φ_{dn} را از طریق ژایروها یا جی‌پی‌اس نصب‌شده در ناو و شناور بدون سرنشین تخمین زد و φ_{tn} را نیز ESM تخمین می‌زند. بنابراین تنها راه برای حل این مشکل این است که یا شناور و ناو در نزدیکی هم قرار داشته باشند تا $R_{tn}-R_{td}$ به صفر نزدیک باشد یا اینکه با توجه به تخمین φ_{tn}، ناو و شناور در راستای بردار جهت رادار ردگیر یا سیکر (به‌صورت شعاعی) حرکت نمایند که در این‌صورت اختلاف بردهای آنها نسبت به رادار ردگیر یا سیکر برابر با R_{dn} خواهد شد (شکل ۹).

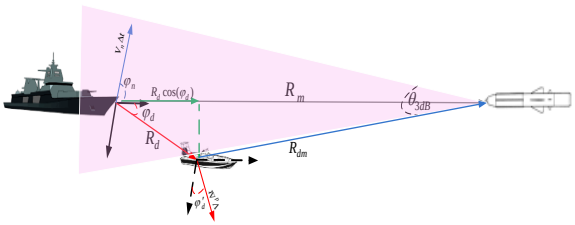


شکل (۷): حرکت شعاعی جهت فریب برد بر اساس گزارش حس‌گرهای اندازه‌گیری موقعیت

مهم‌ترین ایراد این حرکت آن است که اگر حرکت به همین شکل ادامه یابد از لحاظ زاویه‌ای فریبی اتفاق نمی‌افتد. مهم‌ترین مزیت این فریب این است که بعد از به‌دست گرفتن حلقه ردگیری توسط سیگنال فریب و بیرون کشیدن پنجره ردگیری در حوزه برد، داپلر و زاویه، شناور بدون سرنشین به هر شکلی می‌تواند مانور دهد، چون حلقه روی مقادیر سیگنال فریب بایاس شده است و امکان بازگشت حلقه قفل به روی برگشتی ناو وجود ندارد.

۷-۲-۱. بهینه‌سازی موقعیت اولیه شناور سطحی بدون سرنشین

فرض نماییم در لحظه‌ای که سیگنال سیکر توسط سامانه ESM ناو آشکارسازی شده است و جهت موشک در صفحه X-Y به دست آمده است بخواهیم موقعیت اولیه شناور بدون سرنشین و جهت حرکت مانوری آن و جهت حرکت ناو را مطابق شکل زیر به شکل بهینه تعیین نماییم.



شکل (۱۰): موقعیت اولیه و نحوه حرکت ناو و دکوی در ابتدای درگیری

در این بهینه‌سازی هدف این است که بعد از گذشت مدت زمان مشخصی از عملیات مانند Δt شناور بدون سرنشین و ناو بیشترین فاصله قطاعی را نسبت به جهت اولیه موشک پیدا کنند. بیشترین فاصله قطاعی تضمین خواهد کرد که در صورت قفل کردن مدارات سیکر روی سیگنال ارسالی شناور بدون سرنشین، احتمال بازیابی قفل سیکر روی ناو در مد اکتیو یا پسیو حداقل گردد. فرض می‌شود که بیشینه سرعت حرکت ناو و شناور بدون سرنشین به ترتیب V_n و V_d می باشد و هنگام حرکت مانوری، ناو و دکوی با بیشینه سرعت حرکت می‌نمایند. در این حالت فاصله قطاعی ناو و دکوی نسبت به جهت حرکت موشک برابر است با:

$$D=\left|V_n\sin(\varphi_n)\Delta t-R_d\sin(\varphi_d)-V_d\sin(\varphi'_d)\Delta t\right| \qquad (۸)$$

از طرفی محل اولیه دکوی باید بگونه‌ای تنظیم شود که در شروع عملیات فریب، سیگنال بازگشتی ناو و سیگنال فریب ارسالی توسط دکوی در یک پنجره ردگیری برد و یک پنجره ردگیری زاویه‌ای قرار گیرند تا عملیات فریب موفقیت‌آمیز شود. برای اینکه سیگنال بازگشتی ناو و سیگنال دکوی در یک پنجره ردگیری برد قرار گیرند لازم است تا شرط زیر برقرار باشد:

$$\left|R_m-\sqrt{R_d^2+R_m^2-2R_mR_d\cos(\varphi_d)}\right|\le\Delta R \qquad (۹)$$

www.SID.ir

Archive of SID

که ΔR معرف عرض پنجره ردگیری برد است. از طرف دیگر با توجه به اینکه در ابتدای مانور شناور دکوی، ناو در مرکز بیم سیکر قرار دارد لازم است شناور دکوی نیز در عرض بیم سیکر قرار داشته باشد تا امکان بدست گرفتن حلقه ردگیری سیکر توسط سیگنال فریب امکان‌پذیر باشد.

$$(R_m - R_d\cos(\varphi_d))^2 \geq \cos^2(\frac{\theta_{3dB}}{2})(R_d^2 + R_m^2 - 2R_mR_d\cos(\varphi_d)) \quad (۱۰)$$

در این‌صورت مسئله بهینه‌سازی موقعیت اولیه شناور دکوی و جهت حرکت مانوری ناو و دکوی به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\max_{\varphi_n,\varphi'_d,\varphi_d,R_d} D = |V_n\sin(\varphi_n)\Delta t - R_d\sin(\varphi_d) - V_d\sin(\varphi'_d)\Delta t|$$
$$s.t.: \left|R_m - \sqrt{R_d^2 + R_m^2 - 2R_mR_d\cos(\varphi_d)}\right| \leq \Delta R \quad (۱۱)$$
$$(R_m - R_d\cos(\varphi_d))^2 \geq \cos^2(\frac{\theta_{3dB}}{2})(R_d^2 + R_m^2 - 2R_mR_d\cos(\varphi_d))$$

با توجه به این‌که پارامترهای φ_n, φ'_d تأثیری روی قیدهای مسئله ندارند و با توجه به تابع هدف (۸) واضح است که $\varphi_n = \frac{\pi}{2}$ و $\varphi'_d = \frac{\pi}{2}$ جهت بهینه حرکت مانوری ناو و شناور دکوی است. در این حالت تابع هدف مسئله می‌تواند به شکل $\max_{\varphi_d,R_d} R_d\sin(\varphi_d)$ ساده‌سازی گردد. با حل مسئله بهینه‌سازی می‌توان نشان داد که جواب بهینه مسئله به‌صورت زیر خواهد بود. (با توجه به محدودیت صفحات مقاله از آوردن اثبات خودداری شده است):

الف) اگر $R_m \leq \cos(\frac{\theta_{3dB}}{2})(R_m + \Delta R)$ است موقعیت اولیه بهینه شناور دکوی برابر است با

$$R_d = R_m\tan(\frac{\theta_{3dB}}{2}) \quad , \quad \varphi_d = -\frac{\pi}{2} \quad (۱۲)$$

ب) اگر $R_m > \cos(\frac{\theta_{3dB}}{2})(R_m + \Delta R)$ است موقعیت اولیه بهینه شناور دکوی برابر است با

$$R_d = (R_m + \Delta R)\sin(\frac{\theta_{3dB}}{2})\times \sqrt{1 + \frac{[R_m - (R_m + \Delta R)\cos(\frac{\theta_{3dB}}{2})]^2}{(R_m + \Delta R)^2\sin^2(\frac{\theta_{3dB}}{2})}} \quad (۱۳)$$

$$\varphi_d = \tan^{-1}(\frac{(R_m + \Delta R)\sin(\frac{\theta_{3dB}}{2})}{R_m - (R_m + \Delta R)\cos(\frac{\theta_{3dB}}{2})}) \quad (۱۴)$$

برای پارامترها نامی مفروض در سناریو مد نظر سامانه پیشنهادی که معمولاً R_m حدود ۳۰ کیلومتر، عرض بیم آنتن سیکر θ_{3dB} حدود ۳ درجه و عرض پنجره ردگیری برد سیکر ΔR حداقل ۱۰۰ متر است شرایط حالت الف برقرار است و در این حالت موقعیت اولیه بهینه شناور دکوی در راستای عمود بر جهت موشک و در خلاف جهت حرکت ناو و به فاصله $R_m\tan(\frac{\theta_{3dB}}{2})$ متر از ناو است. محل بهینه قرارگیری و استقرار شناور دکوی به پارامترهای موشک وابسته است و الزاما قرارگیری عمود بر خط واصل موشک-ناو و در گوشه عرض پرتو محل بهینه نمی‌باشد. مثلاً برای وقتی‌که برد آشکارسازی سیگنال سیکر ۳۰ کیلومتر و تفکیک‌پذیری برد پردازش سیکر ۱۰ متر است و عرض بیم آنتن سیکر بیش از ۳ درجه باشد دیگر رابطه (۱۲) موقعیت بهینه را مشخص نمی‌کند بلکه روابط (۱۳ و ۱۴) موقعیت بهینه را معلوم می‌نمایند. مثلاً به ازای عرض بیم سیکر ۶ درجه، بهترین زاویه حرکت شناور دکوی به جای ۹۰ درجه (عمود بر خط واصل موشک-ناو)، زاویه ۸۸ درجه (یعنی ۲ درجه مورب به سمت موشک) و بهترین فاصله به‌جای ۱۵۷۲ متر، ۱۵۷۰ متر خواهد بود. اگر چه جواب موارد الف و ب به ازای مقادیر متداول پارامترهای موشک، تفاوت بسیار ناچیزی دارند ولی از لحاظ ریاضی جواب بهینه‌سازی نتیجه متفاوتی در برخواهد داشت. لازم به ذکر است که در شرایط عملیات واقعی با توجه به تلورانس‌هایی که در اندازه‌گیری پارامترها داریم (مثل خطای موقعیت یابی شناور دکوی، خطای زاویه‌سنجی ESM در شناسایی جهت موشک و .....) باید زاویه را کمی کمتر از ۹۰ درجه و فاصله را کمتر از گوشه عرض بیم سیکر انتخاب کرد تا مطمئن شویم که سیگنال فریب در آغاز عملیات کنترل گیت ردگیری را به دست خواهد گرفت.

با توجه به اینکه در زمان درگیری واقعی، شرایط جنگی بر محیط عملیات حاکم است و معمولاً آرایش نیروها بر اساس اطلاعات اولیه‌ای که توسط سامانه‌های شناسایی مانند پهپادها و سامانههای شنود الکترونیکی فراهم شده است مشخص می‌باشد، شناور دکوی از قبل به آب انداخته شده و موضع مناسب را نسبت به ناو اصلی حفظ می‌نماید. بنابراین همواره قبل از دریافت علایم سیگنال سیکر، شناور دکوی موضع خود را به شکلی که گفته شد حفظ می‌نماید تا به محض دریافت فرامین از ESM مستقر بر روی ناو (که به معنی وارد شدن سیکر در فاز فعال و برد کمتر از افق رادیویی (حدود ۳۰ کیلومتر) است) عملیات فریب را شروع نماید. مستقر کردن شناور دکوی در محل مناسب احتمال موفقیت در ایجاد انحراف زاویه‌ای کافی سیکر از ناو اصلی را افزایش خواهد داد. با توجه به سرعت بالای خانواده‌ای از موشک‌های کروز ضد کشتی، شروع کردن عملیات فریب نزدیک‌تر از نقطه مذکور ممکن است انحراف زاویه‌ای کافی را برای سیکر موشک ایجاد ننماید و بعد از وارد شدن سیکر در مد پسیو (دوربین IR) مجدداً قفل روی ناو اصلی بازیابی شود. در صورتیکه قبل از مستقر شدن شناور دکوی در فاصله مناسب، سامانه ESM شروع درگیری را اعلام نماید به‌طور منطقی شناور دکوی قبل از رسیدن به نقطه مذکور عملیات فریب را شروع می‌نماید. زودتر

www.SID.ir

Archive of SID

شروع کردن عملیات فریب احتمال به دست گرفتن کنترل مرکز پنجره ردگیری برد سیکر را افزایش می‌دهد اما ممکن است برای انحراف زاویه‌ای جدایش کافی از ناو اصلی را موجب نشود.

۷-۳. ارزیابی قابلیت درگیری جمر راداری در مد فریب

یکی از گلوگاه‌های طراحی مولد فعال راداری در شناور سطحی بدون سرنشین، محدودیت تأمین توان تقویت‌کننده در این شناور است. لذا در اینجا علاوه بر ارزیابی توان مورد نیاز جمر راداری جهت ایجاد اخلال مؤثر، قابلیت‌های درگیری جمر بر حسب ویژگی‌های تهدید ارزیابی می‌شود. برای نمونه، یک رادار ردگیر متداول مشخصات تقریبی جدول (۲) را می‌تواند داشته باشد. برای جمر راداری نیز مشخصات مطابق جدول (۳) درنظر گرفته شده است؛

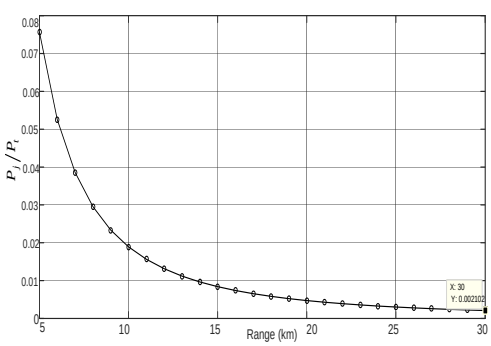
جدول (۲): مشخصات یک رادار ردگیر متداول

مشخصه	مقدار
توان پیک	۱۰وات-۱۰۰ کیلووات
سیکل وظیفه	۱-۵۰ درصد
PRF	۲ کیلوهرتز
پهنای باند LFM	۱-۱۵ مگاهرتز
زمان پردازش	۱۰۰-۱۰۰۰ میلی‌ثانیه
بهره آنتن	۳۷ دسی‌بل
عرض بیم	۲ درجه در سمت و ۲ درجه در ارتفاع

جدول (۳): مشخصات جمر راداری

مشخصه	مقدار
توان	۵۰۰ وات
بهره آنتن	۱۰-۱۵ دسی‌بل
عرض بیم	۳۰ درجه در سمت و ارتفاع
پهنای باند لحظه‌ای	۱ گیگا هرتز

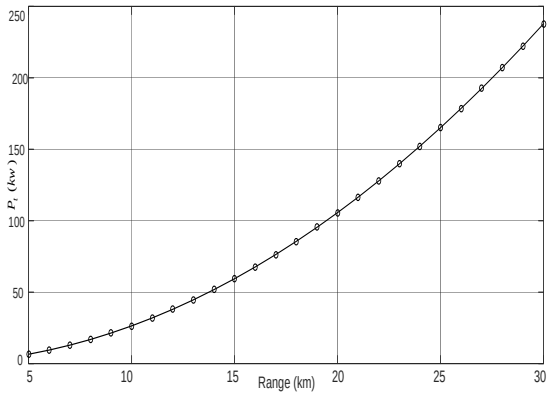
سطح مقطع راداری ناو خودی، ۱۵ هزار مترمربع و بیشینه انحراف معیار نوسانات دریا ۵ درجه فرض می‌شود. در این صورت برای دست‌یابی به نسبت جمر به سیگنال، ۱۰ دسی‌بل، لازم است نسبت توان جمر به توان رادار بر حسب فاصله شروع درگیری از نمودار شکل (۱۱) پیروی نماید.



شکل (۱۱): نسبت توان جمر به توان رادار ردگیر بر حسب فاصله رادار از ناو خودی

از آنجاکه برد افق رادیویی بر اساس ارتفاع پروازی موشک‌های کروز دریایی و ارتفاع آنتن سامانه ESM حدود ۳۰ کیلومتر تخمین زده می‌شود، لذا اگر در ابتدای درگیری بخواهیم از طریق تولید سیگنال فریب با شدت ۱۰ برابر قوی‌تر از سیگنال بازگشتی ناو، حلقه ردگیری را فریب دهیم، باید توان مولد فعال راداری حدود ۰،۰۰۲ توان رادار ردگیر یا سیکر باشد. توان مولد فعال راداری بیشتر در این مرحله حائز اهمیت است زیرا بعد از فریب حلقه ردگیری و ایجاد انحراف زاویه‌ای آنقدر سیگنال برگشتی ناو ضعیف خواهد شد که با توان کمتر نیز ادامه فریب امکان‌پذیر خواهد بود.

حال اگر توان مولد فعال راداری ۵۰۰ وات فرض شود با رادارهای ردگیر با توان‌های نمایش داده شده مطابق شکل (۱۲) در فواصل مختلف می‌توان درگیر شد، به‌گونه‌ای که نسبت جمر به سیگنال، ۱۰ دسی‌بل برآورده شده و حلقه قفل ردگیری در اختیار سیگنال فریب قرار خواهد گرفت.



شکل (۱۲): توان رادارهای قابل فریب بر حسب فاصله رادار یا سیکر از ناو خودی

همان‌طور که قابل مشاهده است، جمر راداری در مد فریب، قابلیت درگیری با طیف وسیعی از رادارها با توان‌های متفاوت را خواهد داشت و عملاً اکثر رادارهای ردگیر و سیکرهای رادیویی در ناحیه عملکرد آن قرار می‌گیرند.

۷-۴. ارزیابی سینماتیک اجزای درگیر در عملیات

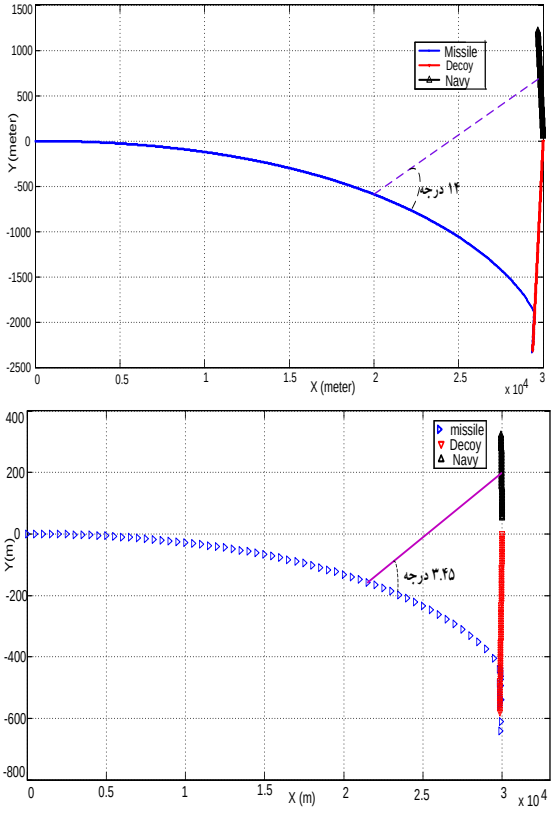
با توجه به نمودار قابلیت درگیری جمر راداری، در صورت درست تنظیم شدن پارامترها، فریب حلقه ردگیری سیکر یا رادار ردگیر حتمی است زیرا توان در نظر گرفته شده برای جمر راداری به مراتب بیشتر از توان مورد نیاز برای فریب سیکرها (که توان معمولاً به مراتب کمتری از رادارها دارند) است. در صورتی‌که فریب زاویه‌ای که لازمه آن فریب حلقه ردگیر برد و داپلر است اتفاق بیافتد، با توجه به مانور حرکتی شناور و ناو، مسیر حرکتی زیر برای موشک به‌دست می‌آید. هدف اصلی از فریب زاویه‌ای

www.SID.ir

Archive of SID

انحراف محور LOS[1] سیکر از روی ناو است تا در صورت استفاده از دوربین IR یا مرئی در مراحل انتهای درگیری، ناو در FOV[2] دوربین قرار نگیرد یا اینکه در صورت قطع شدن سیگنال فریب، سیکر نتواند به‌راحتی ناو را بازیابی و قفل مجدد نماید. پر واضح است که برای فریب موشک، بهترین مانور حرکتی برای شناور و ناو آن است که پس از تشخیص جهت سیگنال سیکر توسط ESM ناو، هم ناو و هم شناور بدون سرنشین عمود بر این جهت در خلاف یکدیگر و با بیشینه سرعت ممکن حرکت نمایند.

در صورتی‌که توان کافی که مطابق نمودار شکل (۱۱)، توان خیلی کمی است فراهم شود، سیگنال فریب، حلقه قفل ردگیری را در اختیار گرفته و با توجه به مانور در نظر گرفته شده برای شناور و ناو که در حال دور شدن از هم هستند، مسیر حرکت موشک بر اساس اطلاعات استخراجی در پردازشگر سیکر موشک به‌صورت شکل (۱۳) خواهد شد.



شکل (۱۳): مسیر حرکت اجزای درگیر، (در نمودار بالایی برای موشک با سرعت ۱ ماخ) در ۱۰ کیلومتری ناو، سیکر ۱۴ درجه از ناو و (در نمودار پایینی برای موشک با سرعت ۳ ماخ) سیکر ۳/۴۵ درجه از ناو منحرف شده است.

در شکل فوق، خط (نقاط مثلثی) آبی بیانگر مسیر حرکت موشک، خط قرمز مسیر شناور بدون سرنشین و خط مشکی حرکت ناو را نشان می‌دهد.

در این شبیه‌سازی، یک‌بارسرعت موشک برابر با ۱ماخ، سرعت شناور بدون‌سرنشین ۲۰ متر بر ثانیه، سرعت ناو ۱۰ متر بر ثانیه و فرض شد در ۳۰ کیلومتری از ناو، درگیری شروع شده و از ابتدا نیز سیکر روی ناو در برد و زاویه قفل بوده است (نمودار بالایی شکل ۱۳). در این سناریو وقتی موشک به ۱۰ کیلومتری ناو می‌رسد، LOS محور سیکر که مرجع زاویه‌ای جهت روشن کردن دوربین IR و یا دوربین مرئی است نسبت به موقعیت ناو حدود ۱۴ درجه منحرف خواهد شد که این عدد خیلی بیشتر از FOV سیکرهای IR است و عملاً دیگر سیگنالی از ناو در حس‌گر IR جهت فاز نهایی هدایت دریافت نخواهد شد و تنها همان طیف حرارتی شناور بدون سرنشین دریافت می‌گردد.

با توجه به الگوی فوق، برای کلاس موشک‌های کروز دریایی مافوق صوت نیز یک موشک با سرعت ۳ ماخ بررسی شد که از فاصله ۳۰ کیلومتری سیگنال‌های سیکر آن آشکارسازی و بر اساس زاویه سمت تشخیص داده شده، درگیری مولد فعال راداری با آن آغاز می‌گردد. سرعت ناو ۷ متر بر ثانیه، سرعت شناور بدون سرنشین ۱۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در شروع درگیری فرض بر این بود که شناور بدون سرنشین داخل بیم سیکر و با فاصله ۰٫۱ درجه در زاویه سمت نسبت به ناو قرار دارد و عملیات فریب موفق بوده است و جمر راداری توانسته حلقه ردگیری را به دست گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت موشک به ۳ ماخ، زمان عکس‌العمل شناور بدون سرنشین و ناو شدیداً کاهش یافته و در بهترین شرایط نمی‌توان بیش از ۴ درجه، LOS سیکر را قبل از رسیدن به ۱۰ کیلومتری ناو منحرف کرد (نمودار پایینی شکل ۱۳). لذا این قابلیت برای فریب موشک‌های مافوق صوت بسیار محدود خواهد بود و بستگی زیادی به FOV دوربین موشک خواهد داشت.

در حالت کلی، هر چه برد شناسایی سیگنال سیکر موشک بیشتر و سرعت موشک کمتر باشد فرصت بیشتری برای عملیات شناور دکوی وجود خواهد داشت که نتیجه آن انحراف زاویه‌ای بیشتر در LOS موشک و انحراف بیشتر مرکز پنجره ردگیری برد است. به همین شکل، هر چه سرعت دورشوندگی نسبی ناو و شناور دکوی بیشتر باشد جدایش زاویه‌ای و برد بیشتری قبل از رسیدن موشک به برد روشن کردن حس‌گرهای پسیو اتفاق خواهد افتاد و نتیجه عملیات موفق‌آمیزتر خواهد بود. پارامترهای ذکر شده بیشتر روی جدایش زاویه‌ای سیکر از ناو اصلی تأثیرگذار هستند و موفقیت در دزدیدن گیت ردگیری بیشتر به محل اولیه

[1] Line of Sight
[2] Field of View

www.SID.ir

Archive of SID

قرارگیری شناور دکوی نسبت به ناو، توان فرستنده دکوی در مقایسه با سطح مقطع راداری ناو، مشخصات سیگنال سیکر (مثل پرش فرکانسی و ....) و الگوریتم‌های پردازشی سیکر وابسته است.

۷-۵. ارزیابی فریب بر اساس تحلیل پردازش سیگنال سیکر

در این بخش اثر سیگنال فریب ارسال‌شده توسط جمر راداری در خروجی پردازش سیگنال سیکر که بر اساس آن ردگیری برد، سرعت و زاویه انجام می‌شود بررسی می‌گردد. هدایت موشک معمولاً بر اساس خروجی فیلترهای ردگیر انجام می‌شود. برای اعتبارسنجی از مدل‌های در دسترس یک رادار ردگیر و جمر راداری در مد DRFM با مشخصات جداول زیر استفاده شده است.

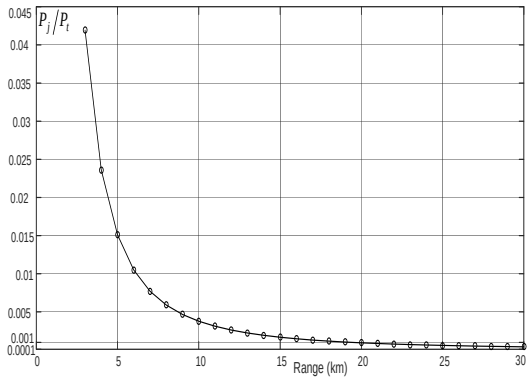
جدول (۴): مشخصات یک رادار (سیکر) ردگیر شبیه‌سازی‌شده

مشخصه	مقدار
توان پیک	۲۰۰ وات
سیکل وظیفه	۵۰ درصد
PRF	۲ کیلوهرتز
پهنای باند LFM	۵ مگاهرتز
باند فرکانسی	۱۴ گیگاهرتزKU
زمان پردازش	۴۵ میلی‌ثانیه
بهره آنتن	۴۰ دسی‌بل
عرض بیم	۱ درجه در سمت و ارتفاع

جدول (۵): مشخصات جمر راداری

مشخصه	مقدار
توان	۰٫۲وات
بهره آنتن	۲۵ دسی‌بل
عرض بیم	۱۵ درجه در سمت و ارتفاع
انحراف معیار نوسانات شناور	۵ درجه در سمت و ارتفاع

مطابق جداول فوق برای اینکه جمر راداری بتواند نسبت جمر به سیگنال ۱۰ دسی‌بل را برای محافظت از ناوی با سطح مقطع راداری ۱۵۰۰۰ متر مربع فراهم نماید، نسبت توان آن به توان رادار ردگیر بر حسب فاصله ناو (یا جمر راداری) از رادار ردگیر باید مطابق شکل (۱۴) باشد.

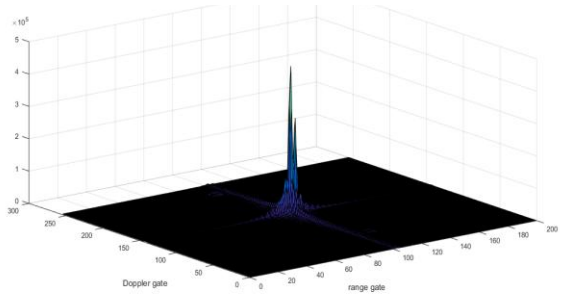


شکل (۱۴): توان جمر به توان رادار ردگیر بر حسب فاصله رادار از ناو

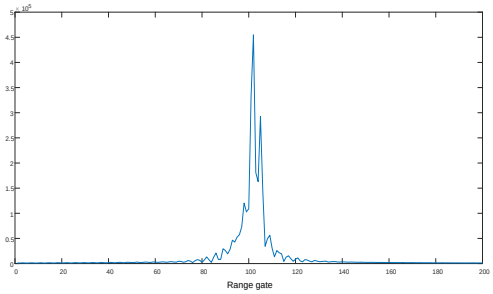
در عمل با توجه به مشخصات رادار ردگیر و مشخصات جمر راداری در ابتدای درگیری برای تأمین نسبت جمر به سیگنال ۱۰ دسی‌بل، توان مولد فعال حدود ۰٫۰۸ وات نیاز است.

$$P_{j-\max} = (\frac{J}{S})\frac{P_t G_{\max}\sigma}{4\pi R^2 G_j} = 10 \times \frac{P_t \times 10^4 \times 15000}{4\pi \times (30^K)^2 \times 10^{2.5}} \approx 0.0004\ P_t \qquad (۱۵)$$

ابتدا برای اینکه اثر توان جمر راداری را در حوزه سیگنال بررسی نماییم فرض می‌نماییم توان مولد در مد فریب کمتر از مقدار مورد نیاز باشد. مقدار مورد نیاز ۰٫۰۸ وات است اما اگر توان تنظیم شده ۰٫۰۰۵ وات باشد، یعنی حدود ۱۲ دسی‌بل کمتر که معادل جمر به سیگنال ۲- دسی‌بل است. سرعت موشک، ۱ ماخ در نظر گرفته شده و در ۳۰ کیلومتری از ناو، درگیری شروع و از ابتدای درگیری فرض شود که سیکر روی ناو در برد و زاویه قفل بوده است. مقدار فریب برد (RGPO[1])، ۷۰ متر در نظر گرفته شده است تا سیگنال فریب و برگشتی ناو قابل تفکیک باشند. در شکل زیر، خروجی پردازش زمان-فرکانس نمایش داده شده است که پردازش زمانی برای استخراج برد و پردازش فرکانسی به‌منظور جمع‌بندی پالس‌های دریافتی است. خروجی این نمایش در مرحله ردگیری است که تنها ۱۰۰ سلول رنج قبل و ۱۰۰ سلول رنج بعد از آخرین مشاهده سلول برد هدف در پنجره ردگیری برد قرار دارند. جمع‌بندی پالس هم با توجه به مشخصات رادار ردگیر، شامل ۹۰ پالس می‌شود که با استفاده از ۲۵۶ FFT[2] نقطه‌ای، پیاده‌سازی شده است (شکل ۱۵).



شکل (۱۵): خروجی پردازش زمان-فرکانس در ابتدای درگیری با جمر راداری با توان کم



شکل (۱۶): خروجی فشرده‌سازی پالس در ابتدای درگیری با جمر راداری توان کم

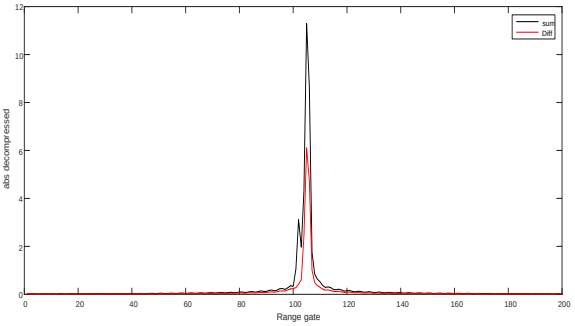
[1] Range Gate Pull Out
[2] Fast Fourier Transform

www.SID.ir

Archive of SID

در شکل (۱۶)، جمع‌بندی خروجی تحلیل برد نشان داده می‌شود که به‌راحتی می‌توان سیگنال برگشتی ناو اصلی و سیگنال فریب جمر که چند سلول برد از هم فاصله دارند را مشاهده نمود. با توجه به تفکیک‌پذیری برد که $\Delta R = \frac{C}{2B_{LFM}} = 30m$ است و با توجه به RGPO معادل ۷۰ متر، چند سلول رنج با هم فاصله دارند. با توجه به این‌که سطح سیگنال فریب ضعیف‌تر از سیگنال برگشتی ناو است محاسبات ردگیری بر اساس خروجی قوی‌تر سلول برد که همان سلول برد ناو است انجام شده و عملیات فریب نمی‌تواند موفقیت‌آمیز باشد.

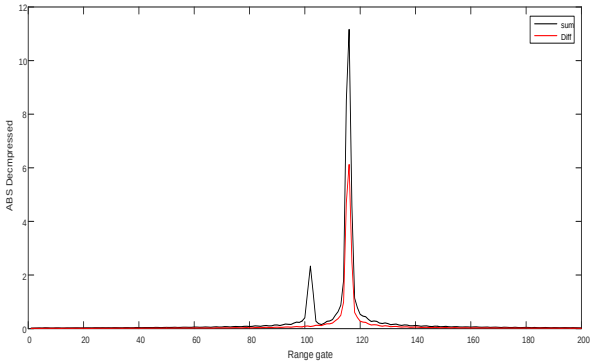
در ادامه، توان جمر راداری به ۰/۲ وات افزایش داده می‌شود. در ابتدا فرض می‌نماییم RGPO یا موقعیت شناور بدون سرنشین و ناو حدود ۷۰ متر با هم فاصله داشته باشند و شناور از دید سیکر ۰,۱ درجه از موقعیت ناو فاصله زاویه‌ای داشته و سیکر بر روی ناو قفل بوده و در حال ردگیری آن باشد. با این افزایش توان جمر راداری، سیگنال برگشتی ناو بسیار کوچک‌تر از سیگنال فریب در خروجی ردگیری برد است و عملاً سیگنال فریب از CFAR[1] عبور کرده و حلقه ردگیری را به دست می‌گیرد. در نمودار شکل (۱۷) خط قرمز، سیگنال کانال تفاضل سمت در ردگیر مونوپالس است که از تقسیم آن بر سیگنال کانال مجموع برای استخراج انحراف هدف از محور آنتن و هدایت موشک استفاده می‌شود.



شکل (۱۷): خروجی فشرده‌سازی پالس در ابتدای درگیری با توان کافی و به ازای اختلاف برد ۷۰ متر

همان‌طور که مشاهده می‌شود سیگنال برگشتی ناو که به‌صورت یک برجستگی کوچک و با چند سلول فاصله از پیک که محل برد فریب است، دیگر نمی‌تواند حلقه ردگیری را حفظ نماید و حتی از آستانه CFAR رد نخواهد شد. سیگنال قرمز که معرف سیگنال کانال تفاضل است با دامنه زیاد در تصمیم‌گیری‌های موشک، ترجمه به انحراف زاویه‌ای ۰/۱ درجه در جهت سمت برای ردگیری هدف می‌شود و همین موضوع موجب انحراف موشک به سمت جمر راداری در شناور سطحی بدون سرنشین خواهد شد. البته در عمل با توجه به لختی حرکت موشک در مقایسه با زمان پردازش سیکر این عمل در چند پردازش پشت سر هم اتفاق خواهد افتاد.

در ادامه، این بار آزمایش قبلی را به‌ازای RGPO برابر با۳۰۰ متری انجام و فرض شد سیکر بر روی ناو اصلی قفل بوده است (شکل ۱۸).



شکل (۱۸): خروجی فشرده‌سازی پالس در ابتدای درگیری با توان کافی و به‌ازای اختلاف برد ۳۰۰ متر

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت سیگنال برگشتی ناو و سیگنال فریب قابل تفکیک در برد در خروجی پردازش هستند و هر دو از آستانه CFAR رد خواهند شد. در این حالت موفق بودن فریب بسته به الگوریتم پردازش ردگیری در سیکر دارد. بعضی الگوریتم‌ها، سیگنال قوی‌تر را ردگیری می‌نمایند و بعضی‌ها اولویت را به سیگنالی که با مشخصات هدف (مانند سرعت و شتاب) هم‌خوانی بیشتری دارد خواهند داد. لذا بهتر است در شروع عمل فریب به یک‌باره برد یا زاویه یا سرعت نسبت به مرکز پنجره ردگیری تغییر داده نشود. در ادامه فرآیند فریب، با اطمینان از موفق بودن منحرف‌سازی حلقه ردگیری می‌توان با افزایش برد RGPO فرآیند فریب را تکمیل کرد تا از شناور بدون سرنشین نیز بتوان محافظت نمود.

در مدیریت نبرد بر اساس مشخصات سیگنال سیکر در مورد نحوه فریب برد تصمیم‌گیری می‌شود. اگر سیکر از پرش پالس به پالس استفاده ننماید با توجه به ذخیره شدن پالس‌های قبلی و PRF تشخیص داده شده توسط سامانه ESM، از تأخیر پالس‌های قبلی برای فریب برد استفاده خواهد شد که در تنظیم تأخیر، میزان تأخیر گروهی فرستنده و گیرنده دکوی (که در زمان کالیبراسیون سامانه استخراج شده و در حافظه دستگاه بارگذاری شده است) جبران خواهد شد و امکان RGPI نیز بر اساس تنظیم تأخیر فراهم خواهد بود. در حالتی که سیگنال سیکر از پرش فرکانسی پالس به پالس برخوردار است و یا مدولاسیون درون پالسی آن پالس به پالس تغییر می‌کند از حالت تکرارگری (repeater) برای فریب استفاده خواهد شد و شناور دکوی با

[1] Constant False Alarm Rate

www.SID.ir

Archive of SID

حرکت مورب به سمت جهت موشک به‌جای حرکت عمود بر خط واصل موشک به ناو، عملیات فریب زاویه‌ای و RGPI را انجام خواهد داد. البته هدف اصلی این است که در شروع عملیات سیگنال فریب و سیگنال بازگشتی ناو در یک گیت برد بیافتند و در ادامه به‌دلیل قوی‌تر بودن سیگنال فریب خود به خود مرکز پنجره ردگیری برد در سیکر دنبال سیگنال فریب به راه می‌افتد. وقتی‌که در ابتدای عملیات، سیگنال فریب سیگنال بازگشتی ناو را در یک گیت برد mask نماید با تغییر تأخیر سیگنال فریب، معمولاً تا چندین گیت سیگنال بازگشتی ناو در الگوریتم CFAR توسط سیگنال فریب mask باقی می‌ماند و وقتی سیگنال فریب به اندازه کافی از بازگشتی ناو دور شد معمولاً مرکز پنجره ردگیری برد روی سیگنال فریب قفل شده است و در الگوریتم انتخاب اهداف، نزدیک‌ترین هدف به مرکز پنجره ردگیری انتخاب خواهد شد که همان سیگنال فریب است. تحقق این موضوع در شکل‌های (۱۷ و ۱۸) قابل مشاهده است.

۸. نتیجه‌گیری

ارزیابی جمر راداری در شناور سطحی بدون سرنشین برای فریب سیکر رادیویی موشک ضدکشتی نشان داد که در این مد، قابلیت درگیری با طیف گسترده‌ای از سیکرهای رادیویی و رادارهای ردگیر می‌تواند وجود داشته باشد. همچنین نشان داده شد که ملاحظات جایابی شناور بدون سرنشین در اطراف ناو خودی و تنظیم پارامترهای جمر راداری در عملکرد فریب حائز اهمیت است. این ارزیابی بر اساس قابلیت درگیری با تهدیدات، سینماتیک حرکت مانورینگ ناو و شناور بدون سرنشین و تأثیر آن در انحراف موشک نسبت به ناو و انحراف حلقه ردگیری با توجه به نتایج پردازش سیگنال ارائه گردید. نتایج پردازش سیگنال تائید می‌نماید که فریب حلقه‌های ردگیری رادار (سیکر) ردگیر امکان‌پذیر است.

در کنار این موارد مهم‌ترین مشخصه سیکرها و رادارهای جدید که کار فریب را سخت خواهد کرد به‌کارگیری سیگنال‌های راداری پیچیده و با مشخصات متغیر با زمان است. رادارهای جدید پالس به پالس مشخصات سیگنال مانند فرکانس حامل، عرض پالس، PRF و ... را تغییر می‌دهند که کار رهگیری سیگنال در ESM را بسیار سخت خواهد کرد. موفقیت سامانه فریب شدیداً به اطلاعات به‌روز و دقیق از سیگنال‌های سیکر که در این طرح از طریق سامانه ESM مهیا می‌شود وابسته است. با توجه به تأخیر ESM و پیوند ارتباطی بین ناو و شناور بدون سرنشین (حدود ۱ میلی‌ثانیه) امکان فریب سیکرهایی که مشخصات سیگنال خود را پالس به پالس تغییر می‌دهند وجود نخواهد داشت. اما دسته‌ای از سیکرهای راداری که از پردازش همدوس چندین پالس متوالی با مشخصات یکسان استفاده می‌نمایند قابل فریب دادن هستند. محاسبات نشان داد این دسته از سیکرها هم در حوزه برد (هم در حوزه داپلر که البته معمولاً سیکرها و رادارهای دریایی به‌دلیل سرعت پایین ناوها رهگیری برد انجام می‌دهند) و هم در حوزه زاویه (موقعیت) با توجه به مشخصات طراحی‌شده برای سامانه جمر راداری و شناور بدون سرنشین، فریب خواهند خورد و شناور آنها را به اندازه کافی تا قبل از رسیدن به برد سیکر IR منحرف خواهد کرد تا ناو بعد از روشن شدن دوربین IR در میدان دید آن قرار نداشته باشد. در طراحی و استخراج پارامترهای سامانه جمر راداری برای شناور سطحی بدون سرنشین سبک، محدودیت‌های حجمی، وزنی، مانور و دریامانی شناور باید به‌دقت مورد توجه قرار گیرد.

۹. مراجع

[1] Schleher, C., "Electronic Warfare in the Information Age, Norwood", MA: Artech House,1999.

[2] Andrea De Martino,"Introduction to modern EW systems", Artech House, 2012.

[3] https://www.localxpress.ca/local-news/navy-to-use-surface-drones-to-jam-incoming-missiles-569298

[4] http://dailycaller.com/2017/03/25/canadian-navy-wants-to-use-drone-boats-to-stop-iranian-swarm-attacks

[5] "Unmanned surface vehicle electronic warfare", NRL Report, 2007

[6] A. E. Spezio, "Electronic Warfare Systems", IEEE Trans. on microwave theory and techniques, Vol. 50, No. 3, March 2002.

[7] Grant P.M., Collins J.H., "Introduction to electronic warfare", IEE Proc., Vol.129, Pt. F, No.3, June 1982.

[8] Skolnik, Merrill I., "Radar Handbook", 2nd ed., McGraw-Hill Inc., 1995.

[9] https://www.docdroid.net/8taeFy0/agm-84a-harpoon-sac-august-1974.pdf

[10] http://www.zerkalospb.ru/arhiv/2013/herald_01_13.pdf

[11] https://defence.pk/pdf/threads/complete-information-analysis-on-complex-p-800-3k55-onyx-yakhont-ss-n-26-strobile.369205/

[12] https://weaponsystems.net/weaponsystem/HH10-Exocet.html

[13] F. Lotfi, M. Bighash, A. Sheikhi,: "Using Multiple Auxiliary Antennas for Sidelobe Blanking to Counter Deception Jamming in Search Radars", Journal of Radar, Vol. 5, No. 1, 2017 (Serial No. 15), pp. 21-28, (in Persian).

[14] https://www.ausairpower.net/TE-Harpoon.html

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of "Radar"
Vol. 7, No. 2, 2020 (Serial No. 22)

Deception of an anti-ship cruise missile by an unmanned surface vehicle equipped with a radar jammer

R. Hadipour Goudarzi, S. M. Hosseini Andargoli*

* Babol Noshirvani University of Technology, babol, Iran

(Received: 09/04/2019, Accepted: 30/07/2020)

Abstract

In this study, the design and simulation of a DRFM jammer system as an active radar decoy carried by an unmanned surface vessel (USV) for the protection of a ship from an anti-ship cruise missile equipped with radar seeker are presented. In this operational scenario, it is assumed that some critical parameters of the threat (missile radar) signals, are extracted by the ship ESM on time and are transmitted by a data link to the USV and jammer. By recording and altering the received signals of the threat in the radar jammer and pre-determined maneuvering schemes of the USV, the missile is prevented from hitting the target. The result shows that separating the jammer location from the target ship and mounting it on USV, can increase the effectiveness of the warfare techniques and decrease the chances of the missile hitting the target ship, through angle deception of the angle tracking radar antenna of the missile so that the target ship would be out of the missile field of view (FOV). In spite of the USV limitations, in volume, weight and maneuvering capability, outfitting it with a radar jammer can be effective for the deceiving some types of anti-ship cruise missiles equipped with tracking radar.

Keywords: Repeater jammer, radar deception, radio seeker, cruise missile, unmanned surface vehicle

* Corresponding author E-mail: smh_andargoli@nit.ac.ir

www.SID.ir