

تحلیل و بررسی تکنیک‌های حمله الکترونیکی علیه رادارهای مونوپالس

جعفر خلیل‌پور^۱ *

بیژن ساعدی^۲

یاسر غفاری لشکناری^۳

چکیده

سامانه‌های راداری مدرن با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته راداری و به‌کارگیری همزمان مقدرات دفاع الکترونیکی مؤثر و مدرن، تهدیدی جدی علیه سامانه‌های تهاجمی هواپایه گردیده است. اثرگذارترین و پرکاربردترین تکنیک ردیابی، تکنیک ردیابی مونوپالس است که در حال حاضر اکثر سامانه‌های راداری از جمله S-300، S-400، پاتریوت و... از این روش استفاده می‌کنند. خواص ذاتی این نوع تکنیک ردیابی در کنار تکنیک‌های دفاع الکترونیکی از جمله ARGPO، آرایه فازی، چابکی فرکانس و... آن را به چالشی اساسی برای سامانه‌های اخلاک‌گر تبدیل کرده است. این موضوع سبب گردید در بسیاری از کتب و مقالات جنگ الکترونیک انواع تکنیک‌های حمله الکترونیکی مؤثر بر رادارهای ردیاب مونوپالس بررسی و تحلیل‌های گوناگونی نیز انجام گردد. هر یک از این تکنیک‌های حمله الکترونیکی بر پایه ضعف‌های ساختاری رادار و یا با الهام گرفتن از پدیده‌های فیزیکی از جمله گلینت و چند مسیری ایجاد شده‌اند. در این مقاله ضمن تشریح عملکرد رادارهای مونوپالس و شیوه‌های فریب آن، مرور کاملی بر انواع تکنیک‌های حمله الکترونیکی علیه رادارهای مونوپالس انجام شده است. همچنین سه نوع تکنیک حمله الکترونیکی اخلاک‌گر متقاطع، دکوی و اختلال دوبینی که اهمیت و تأثیر بیشتری داشته به طور کامل‌تری بیان و مزایا و معایب آنها نیز مطرح شده است.

واژگان کلیدی:

ردیابی، مونوپالس، حمله الکترونیکی، دفاع الکترونیکی، اختلال دوبینی، دکوی

^۱ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه هوایی شهید ستاری

^۲ رئیس دانشگاه خاتم الانبیاء (ص) آجا

^۳ دانشجوی کارشناس ارشد دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

* رایانامه نویسنده مسئول: j_khalilpour@yahoo.com

مقدمه

پیشرفت تکنولوژی و به کارگیری تکنیک‌های نوین منجر به ساخت سامانه‌های راداری مدرن با استفاده از تکنیک‌های راداری پیشرفته از جمله فشرده‌سازی پالس^۱، چابکی^۲ و گوناگونی^۳ فرکانس، ردیابی زاویه‌ای مونوپالس و... گردید از طرفی مقدرات دفاع الکترونیکی مؤثر از جمله ARGPO^۴، دروازه حفاظت شده^۵ و... کاهش قابل توجهی بر عملکرد سامانه‌های حمله الکترونیکی ایجاد کرده است. حتی اگر تکنولوژی‌های پیشرفته حمله الکترونیکی از جمله DRFM^۶ و یا پردازش دیجیتال خیلی سریع را برای رادارهای دارای پالس کد شده و پالس داپلر استفاده نماییم باز هم ترکیب تکنیک‌های راداری گفته شده و مقدرات دفاع الکترونیکی یک چالش بزرگ در عملکرد سامانه‌های حمله الکترونیکی خواهد بود.

یک رادار ردیاب مونوپالس که دارای قابلیت چابکی فرکانس بوده و از تکنیک دفاع الکترونیکی ARGPO بهره می‌برد تهدیدی بسیار مشکل برای اختلال است (Neri,2001). در حقیقت چابکی فرکانس (در پهنای باندهای مناسب و کافی) اختلالگر را وادار می‌کند تا تکنیک‌های فریب راداری را انتخاب کند از طرفی تکنیک دفاع الکترونیکی ARGPO و نحوه عملکرد ردیابی زاویه‌ای در مونوپالس حملات فریب الکترونیکی را خنثی می‌کند.

تکنیک‌های اختلال علیه رادارهای مونوپالس بر اساس دو روش کلی عمل می‌نمایند (Adamy,2001). در روش اول از بعضی ضعف‌های فنی رادار استفاده می‌شود. در این روش‌ها داشتن مشخصات فنی رادار برای اختلال مؤثر اهمیت بالایی دارد. این روش‌ها مبتنی بر سلول تفکیک رادار، فرکانس میانی و سایر مشخصات فنی می‌باشند. در روش دوم از نقاط ضعف ذاتی رادار استفاده می‌گردد. بر این اساس، پدیده‌های فیزیکی چون گلینت^۷، چند مسیری^۸، اهداف چندنقطه‌ای و ... مبنای کار قرار می‌گیرند. این پدیده‌های فیزیکی بر کلیه رادارها اثر می‌گذارند (S.M.Sherman,2011) و به مشخصات فنی رادار وابستگی ندارند لذا تکنیک‌های حمله الکترونیکی از جمله دوبینی که بر این اساس پیاده‌سازی می‌گردند نیز بر همه انواع رادارها مؤثر بوده و بر سایر تکنیک‌ها مزیت دارند.

¹ Pulse Compression

² Frequency Agility

³ Frequency Diversity

⁴ Anti Range Gate Pull Off

⁵ Guard Gates

⁶ Digital Radio Frequency Memory

⁷ Glint

⁸ Multi-Path

با توجه به منابع مختلف، ما در این مقاله ابتدا معرفی اجمالی از رادار مونوپالس بیان می‌نماییم در ادامه انواع تکنیک‌های اخلاص الکترونیکی که مؤثر بر رادارهای مونوپالس می‌باشند تشریح می‌گردند.

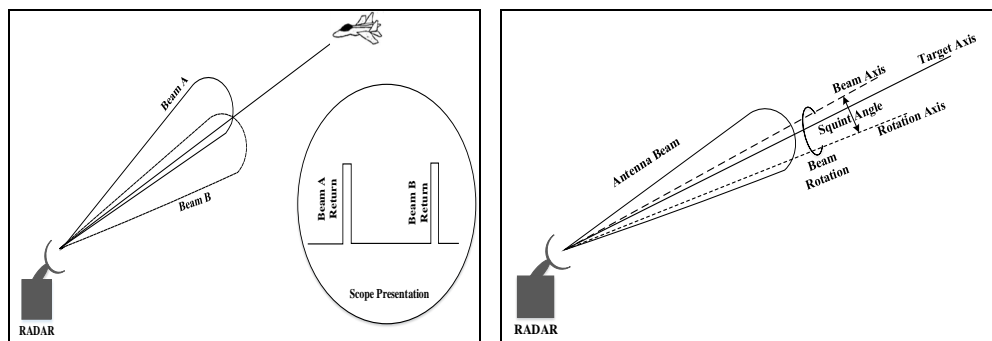
مبانی نظری و پیشینه پژوهش

رادارهای ردیاب

یک رادار ردیاب، راداری است که برای ردیابی یک هدف با حداکثر دقت ممکن طراحی شده است. ردیابی یک هدف در زاویه به تعدادی روش از جمله اینکه آیا رادار به طرف هدف اشاره دارد یا خیر و تعیین جهت و اندازه خطای زاویه‌ای مواجه شده، نیاز دارد. رادارهای ردیاب اولیه، با سوئیچ دو پرتو آنتن که نسبت به محور آنتن^۱ همزمان بود، کار می‌کردند (M.Skolnic, 1991). وقتی که یک هدف به طور کامل بر روی محور رادار است، بازگشتی از دو پرتو آنتن دامنه یکسان خواهند داشت (شکل ۱-ب). تفاوت بین دامنه‌های سیگنال‌های دریافت شده به وسیله دو پرتو، علامت خطای ردیابی زاویه‌ای را وقتی که هدف بر روی محور آنتن نیست، نشان می‌دهد. یک توسعه ساده برای این لوب‌های متوالی به کارگیری یک پرتو آنتن لوچ است که به دور جهت محور رادار می‌چرخد و پیکربندی شناخته شده رادارهای اسکن مخروطی^۲ را نشان می‌دهد (شکل ۱-الف). به این معنی که یک هدف که دقیقاً بر روی محور رادار وجود داشته باشد هیچ تغییری بر روی پرتو چرخیده ایجاد نمی‌کند اما وقتی که هدف بر روی محور رادار قرار ندارد تغییراتی وجود خواهد داشت. اندازه خطای زاویه‌ای از دامنه تغییرات سیگنال دریافت شده در طول زمان به دست می‌آید و جهت هدف از تغییرات فاز سیگنال دریافت شده در طول زمان تعیین می‌شود (اسکولنیک، ۱۳۹۲).

^۱ Boresight

^۲ Conical Scan



ب- ردیابی با تکنیک لوبینگ

الف- ردیابی اسکن مخروطی

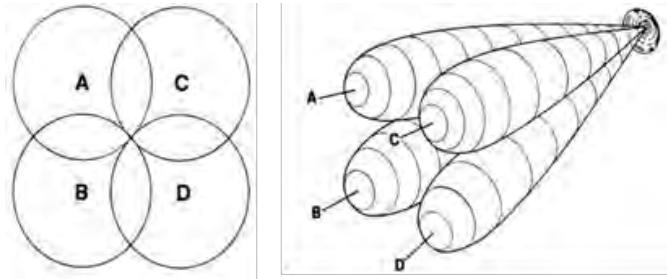
شکل (۱) ردیابی با پرتوهای لوچ

بزرگ‌ترین اشکال رادارهای لوب متوالی و اسکن مخروطی این است که خطای زاویه‌ای اندازه‌گیری شده تحت تأثیر تغییرات در سیگنال دریافت شده در طول زمان خواهد بود. همچنین این سیگنال‌ها می‌توانند به وسیله تغییرات طبیعی در دامنه هدف (درخشش دامنه) یا ناشی از اختلال تحت تأثیر قرار گیرند؛ بنابراین رادارهای اسکن مخروطی و لوب متوالی در مقابل اختلال آسیب‌پذیر هستند، تکنیک‌های چاره‌ساز این بود که پرتو آنتن ارسالی ثابت بوده و فقط جستجو در گیرنده انجام شود مانند 'LORO' و 'COSRO' توسعه یافتند تا این آسیب‌پذیری کاهش یابد (Neri, 2001).

آسیب‌پذیری فوق منجر به توسعه رادارهای مونوپالس گردید، رادار مونوپالس جهت هدف را فقط با یک اندازه‌گیری تنها تعیین می‌کند (Adamy, 2004). به این صورت که پرتوهای چندگانه به طور همزمان تشکیل می‌شوند، در نتیجه خطاهای ناشی از تغییرات سیگنال‌های دریافت شده در طول زمان برطرف می‌گردد به بیان دیگر قابلیت حذف و مقابله با سیگنال‌های اختلال مدوله شده دامنه به صورت ذاتی در ردیابی مونوپالس وجود دارد (Rong Hua & etc. 2015). به طور معمول حداقل چهار پرتو آنتن باید تشکیل شود تا ردیابی هم در سمت و هم در ارتفاع را فراهم کنند. این پرتوها به یک پرتو کانال جمع و دو پرتو کانال تفاضل (یکی برای سمت و دیگری برای ارتفاع) ترکیب می‌شوند (S.M.Sherman, 2011). (شکل ۲).

¹ Lobbing On Receive Only

² Conical Scan On Receive Only



شکل (۲) پرتوهای مونوپالس

روش معمول برای شکل دهی کانال جمع و کانال های تفاضل ارتفاع و سمت به حالت زیر است:

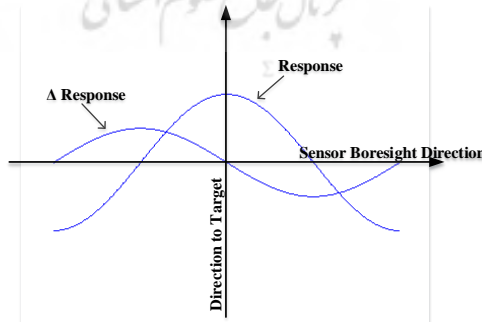
$$\text{Sum } s = \frac{1}{2}(A + B + C + D) \quad (۱)$$

$$\text{Azimuth difference } d_{az} = \frac{1}{2}[(C + D) - (A + B)] \quad (۲)$$

$$\text{Elevation difference } d_{el} = \frac{1}{2}[(A + C) - (B + D)] \quad (۳)$$

کانال جمع برای ارسال و نرمالیزه کردن سیگنال دریافتی استفاده می شود درحالی که بازگشتی های کانال تفاضل نرمالیزه شده برای تعیین خطای زاویه ای استفاده می شوند.

شکل ۳ مجموع و تفاضل پاسخ ها را به عنوان تابعی از زاویه مابین محور مبنای ردیاب و جهت هدف نشان می دهد (محور مبنا مجموعه ای از حسگرها، عمود بر خطی است که دو حسگر را به هم متصل می کند). سیگنال مجموع با علامت Σ و سیگنال تفاضل با علامت Δ نشان داده می شود. سیگنال ردیابی به وسیله مقدار $\Delta - \Sigma$ ایجاد می شود. هرچه این مقدار بیشتر باشد، مقدار تصحیحی که ردیاب باید برای حرکت محور مبنا به سمت هدف انجام دهد بیشتر است. البته علامت Δ جهت تصحیح را نشان می دهد.



شکل (۳) سیگنال جمع و تفاضل به عنوان تابعی از زاویه در رادار مونوپالس

دو دسته‌بندی اصلی رادارهای مونوپالس، مقایسه فاز و مقایسه دامنه وجود دارد هر چند که پیاده‌سازی هایبرید و آرایه فاز نیز انجام می‌گردد. تفاوت‌ها عمدتاً در پیاده‌سازی پرتوهای همزمان وجود دارد در حالی که هیچ تفاوت بنیادی در نگرش وجود ندارد.

چالش اصلی وابسته با اختلال رادارهای مونوپالس از این حقیقت نشأت می‌گیرد که تغییرات دامنه در طول زمان هیچ تأثیری بر روی دقت ردیابی نخواهد داشت. این موضوع حاصل این حقیقت است که پرتوهای آنتن به جای حالت متوالی به طور همزمان تشکیل شده‌اند. در نتیجه اغلب روش‌های مرسوم حمله الکترونیکی بی‌تأثیر و یا کم‌تأثیر می‌باشد.

از طرفی یک قابلیت اضافی در رادارهای مونوپالس این است که اگر یک رادار مونوپالسی با اختلال مواجه شود می‌تواند به حالت جستجو در حالت اختلال^۱ سوئیچ کند و رادار ارسال را متوقف کرده و فقط از گیرنده‌هایش استفاده می‌کند. واقعیت این است که پرتوهای آنتن تشکیل شده به طور همزمان به این معنی است که حتی سیگنال نویز نیز می‌تواند با دقت بسیار بالایی ردیابی شود.

در حال حاضر اکثر رادارهای ردگیر بکار گرفته شده در سامانه‌های پدافندی، سیکر موشک، جنگنده‌ها و... از تکنیک مونوپالس استفاده می‌کنند و چالش بزرگی را در عملکرد حمله الکترونیکی ایجاد کرده‌اند. مشکلات وابسته با اختلال رادارهای مونوپالس منجر به گسترش تکنیک‌های اختلال دیگری شده است که در بخش بعد مطرح می‌گردد.

شیوه‌های فریب رادارهای مونوپالس

اختلال رادارهای مونوپالس مسائل مشکلی را پیش رو می‌آورد. شیوه‌های فریب مرسوم در مقابل آنها عمل نمی‌کند، مخصوصاً در اختلال خود محافظ^۲ و برخی شیوه‌های اختلال، نتیجه عکس داشته و ردیابی رادار مونوپالس بهبود نیز می‌یابد. اگر اخلاگر از راه دور J/S کافی ایجاد کند، در مقابل رادارهای مونوپالس تا حدی مؤثر است همین‌طور هدف‌های مصنوعی و خاشاک اگر درست ایجاد شده باشد و سطح مقطع راداری مناسب داشته باشد نیز مؤثرند. در این بخش توجه ما بر روی شیوه‌های فریبی است که ممکن است بسته به موقعیت تاکتیکی بهترین و یا تنها راه‌حل باشند. یک رادار مونوپالس به سختی اختلال می‌شود زیرا که تمام اطلاعات لازم برای ردیابی یک هدف (زاویه سمت و یا ارتفاع) را از هر پالسی که دریافت می‌کند اندازه می‌گیرد و عمل مقایسه خصوصیات یک سری از پالس‌های دریافتی را انجام نمی‌دهد (قربانی،

^۱ home-on-jamming

^۲ Self-Protection Jamming

۱۳۹۳). اختلال خودمحافظ رادارهای مونوپالس از این هم مشکل تر است زیرا در این حالت، اختلالگر در محل هدف قرار دارد که این کار ردیابی را آسان تر می کند. اگر یک اختلالگر خودمحافظ از اطلاعات برد رادار مونوپالس احتراز کند رادار همچنان ردیابی در زاویه را انجام می دهد که ممکن است اطلاعات لازم برای هدایت یک سلاح به سمت هدف را فراهم کند.

دو روش عمده برای فریب رادارهای مونوپالس وجود دارد. روش اول، استفاده از بعضی کمبودها در نحوه عملکرد رادارها است. از جمله تکنیک های این روش اختلال قطبش متقاطع، اختلال دویینی و... می باشند. روش دوم استفاده از شیوه ای است که رادارهای مونوپالس اطلاعات زاویه ای را در یک سلول تفکیک راداری ایجاد می کنند. تکنیک های مرتبط با این روش عبارت از اختلال آرایش، اختلال چشمک زن، انعکاس از زمین و... می باشند. برای درک بهتر، ابتدا سلول تفکیک راداری معرفی می گردد. در ادامه، با توجه به شدت اثربخشی و کارایی شناخته شده ترین تکنیک های مرتبط با اختلال رادارهای مونوپالس بررسی می گردد (Adamy, 2001).

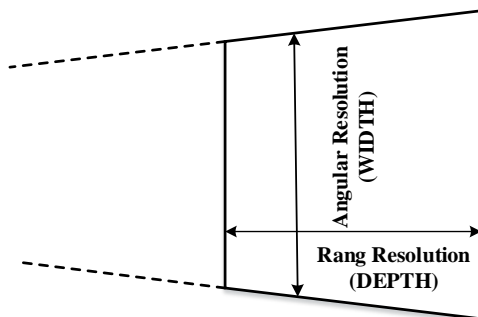
سلول تفکیک راداری^۱

سلول تفکیک به وسیله پهنای اشعه^۲ و پهنای پالس^۳ رادار مطابق شکل ۴ بیان می شود. پهنای سلول تفکیک به وسیله سطحی که در باریکه آنتن قرار می گیرد تعریف می شود که به پهنای اشعه و فاصله رادار تا هدف بستگی دارد. پهنای اشعه عمدتاً پهنای اشعه 3dB در نظر گرفته می شود لذا در یک برد n کیلومتر، پرتو سینوس نصف زاویه پهنای پرتو 3dB ضربدر $2n$ کیلومتر را پوشش می دهد. قابلیت رادار در جداسازی میان هدف ها از نظر زاویه سمت و ارتفاع به قدرت نسبی برگشت های راداری از دو هدف، هنگامی که پرتو آنتن دو هدف را می رود، بستگی دارد. مشخصاً هنگامی که اهداف آنقدر از هم دور باشند که در یک زمان در پرتو آنتن قرار نگیرند، رادار می تواند مابین آنها تفاوت قائل شود. از آنجا که معمولاً می توان فرض کرد که رادار دارای الگوی آنتن های فرستنده و گیرنده مشابهی است، برگشت از هدفی که در زاویه 3dB از محور مبنای آنتن قرار گرفته است، مطابق شکل ۵ با قدرت 6dB کمتر از هدفی که بر روی محور آنتن قرار گرفته است دریافت می شود

¹ Radar Resolution Cell

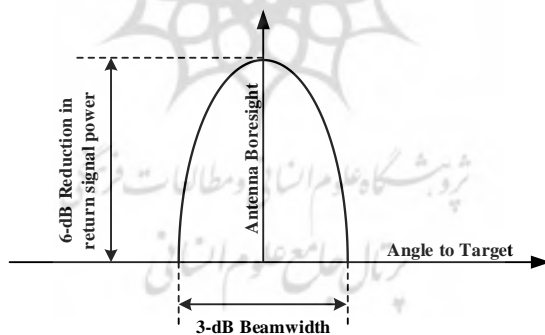
² Beam Width

³ Pulse Width



شکل (۴) سلول تفکیک راداری

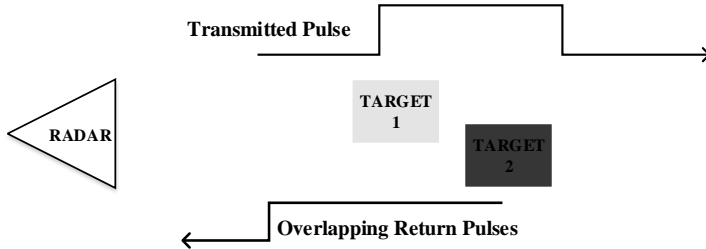
حال در نظر بگیرید برای همه توان سیگنال دریافتی از دو هدفی که توانشان هنگام حرکت آنتن رادار از یکی به دیگری به اندازه نصف پهنای پرتو از هم جدا شده‌اند چه اتفاقی می‌افتد. توان هدف اول خیلی آرام‌تر از افزایش توان هدف دومی کاهش می‌یابد لذا رادار برآمدگی توان برگشتی یکنواختی را می‌بیند. در کمتر از نصف پهنای پرتو جدایی، این مسئله بیشتر خود را نشان می‌دهد. هنگامی که دو هدف بیشتر از نصف پهنای پرتو از هم جدا باشند، جواب دارای دو برآمدگی است؛ اما این دو برآمدگی تا زمانی که دو هدف به اندازه یک پهنای پرتو کامل از هم جدا نشده‌اند به خوبی آشکار نیست. لذا پهنای سلول تفکیک را می‌توان به اندازه یک پهنای پرتو کامل گرفت اما در نظر گرفتن آن به صورت نصف پهنای پرتو محافظه کارانه‌تر است.



شکل (۵) پهنای باند 3dB

سازوکاری که سبب ایجاد عمق سلول تفکیک می‌شود (محدودیت قدرت تفکیک برد) در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل یک رادار و دو هدف را نشان می‌دهد (که فاصله تا اهداف مشخصاً بسیار کوچک‌تر از پهنای پالس PW است). هنگامی که فاصله دو هدف کمتر از نصف طول پالس است، روشن ساختن هدف دوم قبل از تکمیل روشن‌سازی هدف اول شروع می‌شود. با وجود این، ورود پالس برگشتی از هدف دوم به اندازه دو برابر فاصله دو هدف تقسیم

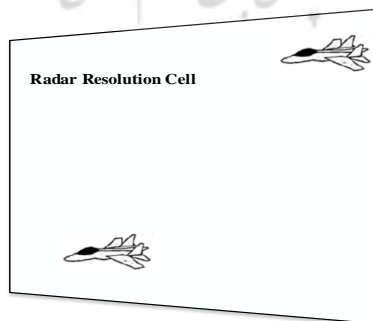
بر سرعت نور تأخیر می‌یابد زیرا زمان رفت و برگشت از برد یک هدف تا برد هدف دیگر با هم جمع می‌شود. لذا با کاهش فاصله برد دو هدف، پالس‌های برگشتی تا زمان کاهش فاصله برد به اندازه نصف طول پالس، شروع به روی هم افتادن نمی‌کنند و عمق سلول تفکیک را تا نصف PW در فاصله محدود می‌کنند.



شکل (۶) محدودیت قدرت تفکیک برد

اختلال آرایش^۱

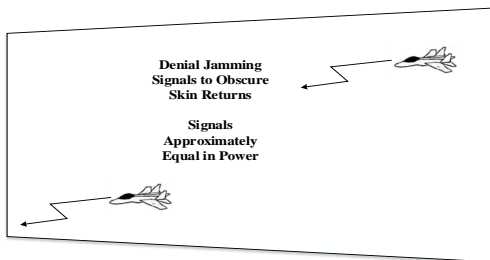
حال که سلول تفکیک را بررسی کردیم، کافی است بگوییم اگر اهداف چندگانه در یک سلول تفکیک راداری قرار گیرند زاویه دریافتی می‌تواند خطای بسیار بزرگی داشته باشد زیرا رادار مونوپالس سیگنال برگشتی مجموع را دریافت می‌کند (S. Ph. Lee & etc. 2015). در اینجا اگر دو هواپیما در یک سلول تفکیک قرار بگیرند، مشابه شکل ۷ رادار مونوپالس قادر به جداسازی آنها نیست و مرکز آنها را ردیابی می‌کند. با در نظر گرفتن سلول تفکیک به صورت نصف پهنای پرتو ضربدر نصف PW، دو هواپیما باید برد نزدیک به همی را در صورت کوتاه بودن PW حفظ کند (مثلاً ۱۵m برای ۱۰۰nsec عرض پالس) دقت تشکیل برد تقاطعی قابل اغماض تر می‌شود (مثلاً ۲۶۱m در برد ۳۰km برای پهنای پرتو ۱°). البته با کاهش فاصله، سلول به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچک می‌شود.



¹ Formation Jamming

شکل (۷) قرار گرفتن دو هدف در یک سلول راداری

مطابق شکل ۸ اخلاص آرایش می‌تواند در فواصل بزرگتر برد هدف نیز در صورت استفاده از پالس‌های پوششی یا اخلاص نویز به منظور از کار انداختن اطلاعات برد رادار انجام پذیرد. J/S مورد نیاز برای این نوع اخلاص نوعاً خیلی زیاد نیست (۰ تا ۱۰dB).



شکل (۸) پیکربندی اخلاص آرایش

اختلال چشمک‌زن^۱

اختلال چشمک‌زن نیز شامل دو هدف در یک سلول تفکیک رادار است. با وجود این، در آنها از اخلاص‌گرهای که با هم کار می‌کنند استفاده می‌شود. دو اخلاص‌گر با آهنگ هماهنگ شده چشمک‌زن به صورت متناوب فعال می‌شوند که این آهنگ به پهنای باند سروو هدایت رادار نزدیک است (نوعاً ۰/۱Hz تا ۱۰Hz). اگر تشدید در پاسخ ردیابی پیدا شود، اضافه جهش‌های بزرگی در جهت‌گیری آنتن نتیجه می‌شود (Adamy, 2015). یک موشک هدایت شده به سمت دو اخلاص‌گری که به صورت مناسبی چشمک می‌زنند به صورت متناوب میان یک هدف و هدف دیگر هدایت می‌شود و این حرکت نوسانی با نزدیک شدن به اهداف شدیدتر می‌شود و هدایت نهایی صحیح را با مشکل مواجه می‌کند.

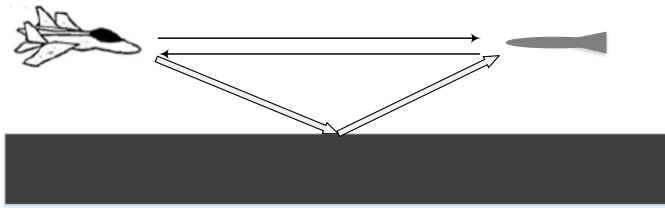
انعکاس از زمین^۲

روش انعکاس از زمین (شکل ۹) در مقابل سیستم‌های هدایت موشک فعال یا نیمه‌فعال مشخصاً روش قدرتمندی است (adamy 2004). یک سیگنال برگشتی مصنوعی راداری تولید شده و با زاویه‌ای که سبب ایجاد انعکاس از زمین می‌شود ارسال می‌شود. ارسال اخلاص‌گر باید دارای قدرت مؤثر تشعشعی کافی (ERP) باشد تا سیگنال برگشتی انعکاسی از سطح زمین که به آنتن ردیاب موشک می‌رسد دارای قدرت بیشتری نسبت به سیگنال پوستی برگشتی از

^۱ Blinking Jamming

^۲ Terrain Bounce

هواپیمای مورد حمله باشد. اگر این مطلب به درستی انجام گردد، باعث هدایت موشک به زیر هواپیمای حفاظت شده می شود.

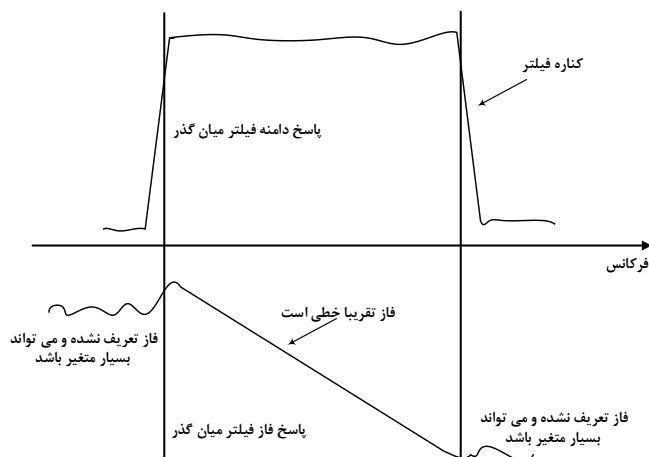


شکل (۹) انعکاس از زمین

اختلال کناره^۱

شکل ۱۰ دامنه باند گذر یک فیلتر میان گذر را نشان می دهد (منحنی بالا). فیلترها طوری طراحی شده اند که تمام بسامدهای داخل باند گذر را با کمترین تضعیف ممکن عبور دهند، در حالی که بیشترین تضعیف ممکن را برای سیگنال های خارج از باند گذر داشته باشند. فیلتر ایده آل تضعیف بی نهایتی را بر روی سیگنال هایی که حتی مقدار بسیار جزئی خارج از باند گذر هستند ایجاد می کند. با وجود این، فیلترها در دنیای واقعی کناره هایی دارند که در آنها سیگنال های ورودی با مقداری متناسب با مقداری که این سیگنال ها از باند گذر دورند تضعیف می شوند. شیب کناره ها برای هر مرحله فیلتر کردن 6dB بر اکتاو است یعنی تضعیف برای هر دو برابر شدن فاصله فرکانس از مرکز باند گذر فیلتر، با یک ضریب ۴ اضافه می شود. فیلترها همچنین دارای یک سطح رد کردن نهایی اند که دارای ماکزیمم تضعیف اعمالی به سیگنال های اندک دور از پهنای باند هستند. این حد نهایی معمولاً حدود 60dB است. این مطلب به این معنی است که یک سیگنال بسیار قوی خارج باند می تواند با مقداری تضعیف از فیلتر عبور کند، در صورتی که نزدیک باند گذر باشد و در صورت دور بودن از باند گذر این تضعیف بیشتر است.

¹ Skirt Jamming



شکل (۱۰) اخلاص کناره و پاسخ فاز فیلتر

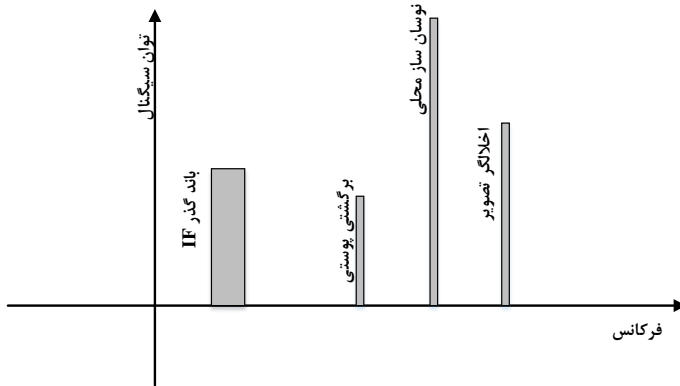
منحنی پایین در شکل ۱۰ پاسخ فاز فیلتر را نشان می‌دهد. در باند گذر فیلتری که خوب طراحی شده باشد دارای پاسخ فازی نسبتاً خطی است. با وجود این، در ماورای لبه‌ها، پاسخ فاز تعریف نشده است و می‌تواند کاملاً غیرخطی باشد. این مطلب به این معناست که اگر یک سیگنال اخلاص قوی در محدوده فرکانسی کناره‌ای دریافت شود فاز نادرستی دارد و سبب می‌شود مدارهای ردیابی رادار اشتباه کار کنند. البته نسبت J/S باید خیلی بالا باشد زیرا اخلاصگر باید علاوه بر غلبه بر تضعیف فیلتر نسبت به سیگنال پوستی برگشتی واقعی توان بیشتری داشته باشد.

اختلاص تصویر^۱

شکل ۱۱ یک نمودار طیف فرکانسی است. همان‌طور که می‌دانیم یک گیرنده سوپرهتروداین از یک نوسان‌ساز محلی (LO) برای تبدیل فرکانس ورودی RF به فرکانس میانی IF استفاده می‌کند. این تبدیل فرکانسی در یک مخلوط‌کن انجام می‌گیرد که هارمونیک‌ها و مجموع و تفاضل تمام سیگنال‌های ورودی به آن را تولید می‌کند. خروجی مخلوط‌کن فیلتر می‌شود و به تقویت‌کننده IF اعمال می‌شود. فرکانس LO نسبت به فرکانس تنظیم شده گیرنده مورد نظر به اندازه فرکانس IF بالاتر یا پایین‌تر است. برای مثال در یک گیرنده AM تنظیم شده بر روی ۸۰۰kHz، فرکانس LO، ۱۲۵۵kHz است (زیرا فرکانس IF، ۴۵۵kHz است). در این حالت فرکانس تصویر ۱۷۱۰kHz است و سیگنالی که با این فرکانس به مخلوط‌کن وارد می‌شود نیز

^۱ Image Jamming

در تقویت کننده IF ظاهر می شود و سبب کاهش شدید کارایی گیرنده می شود. برای جلوگیری از چنین پاسخهای تصویری ای گیرنده همواره دارای فیلتری برای دور نگه داشتن فرکانس تصویر از مخلوط کن است.



شکل (۱۱) نمودار طیف فرکانسی در گیرنده سوپرهتروداین

در واقع دلیل اینکه گیرنده های شناسایی با محدوده فرکانسی وسیع، تبدیل فرکانس چندگانه دارند، جلوگیری از مشکل فرکانس های تصویر است.

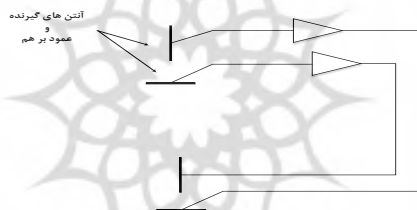
لحظه ای فرض کنید گیرنده رادار مشخصی مشابه شکل ۱۱ از یک LO استفاده می کند که فرکانس آن بالاتر از فرکانسی است که گیرنده بر روی آن تنظیم شده است. البته گیرنده بر روی فرکانس مناسب جهت دریافت برگشت پوستی تنظیم شده است. فرکانس IF برابر است با تفاوت میان فرکانس برگشت پوستی و فرکانس LO. اگر سیگنالی که شبیه برگشت پوستی باشد در فرکانس تصویر با قدرت کافی برای مقابله با فیلتر ورودی دریافت شود، به وسیله تقویت کننده IF رادار تقویت و به همراه برگشت پوستی پردازش می شود. با وجود این، فاز آن برعکس سیگنال برگشت پوستی صحیح است و سبب می شود سیگنال خطای ردیابی رادار تغییر علامت دهد (رادار را به جای نزدیک کردن به هدف از آن دور کند).

متأسفانه این شیوه در رابطه با طراحی رادار نیازمند اطلاعات بسیار بیشتری علاوه بر فرکانس ارسال است از جمله این که آیا رادار از تبدیل سمت بالا یا سمت پایین استفاده می کند (LO بالا یا پایین فرکانس برگشت پوستی است). اگر در رادار فیلتر اولیه ناچیزی انجام شود این روش نیازمند نسبت های J/S متوسطی است اما اگر در ورودی فیلترهای تنظیم شده قابل ملاحظه ای انجام شود، نسبت J/S با قدرت ۶۰ dB بالاتر لازم است.

اختلال قطبش متقاطع^۱

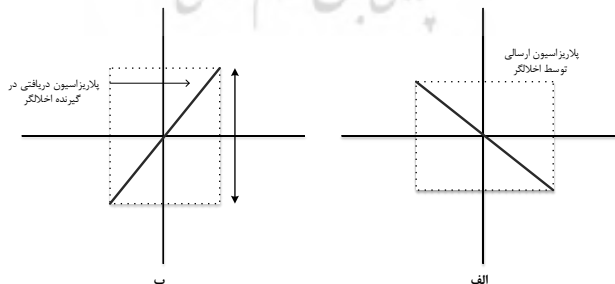
تکنیک اختلال قطبش متقاطع به عنوان یکی از مهمترین تکنیک‌های فریب در برابر رادارهای مونوپالس معرفی شده است که علیه تمام سیستم‌های ردگیری مؤثر است. در بیان ساده در این تکنیک سیگنال قطبی شده افقی دریافتی از رادار به عمودی و سیگنال قطبی شده عمودی دریافتی از رادار به افقی تبدیل و به سمت رادار ارسال می‌گردد. این موضوع باعث اعوجاج در اطلاعات سیگنال رادار می‌گردد (Imran Kalinbacak & etc. 2017). روش اختلال قطبش متقاطع از این حقیقت استفاده می‌کند که در سیگنالی با قطبش عمود بر قطبش ذاتی آنتن، در نقطه بیشینه در الگوی قطبش ذاتی آنتن صفر ایجاد شده و بر عکس در صفر الگوی قطبش ذاتی، بیشینه‌ای در الگوی با قطبش عمود، به وجود می‌آید.

برای تولید یک سیگنال با قطبش متقاطع، اختلالگر دارای دو کانال تکرار کننده با آنتن‌های عمود بر هم مشابه شکل ۱۲ است (هر کدام قطبش خطی دارند اما با زاویه 90° نسبت به هم قرار دارند). اگرچه هر مجموعه‌ای از قطبش متقاطع می‌تواند استفاده شود، اما در شکل آن‌ها به صورت افقی و عمودی نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۲) پیکربندی آنتن‌ها در اختلال با قطبش متقاطع

اگر جزء با قطبش عمودی سیگنال دریافتی مجدداً با قطبش افقی ارسال شود و جزء افقی با قطبش عمودی ارسال شود، سیگنال دریافتی به صورت قطبش متقاطع نسبت به سیگنال دریافتی ارسال می‌شود که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

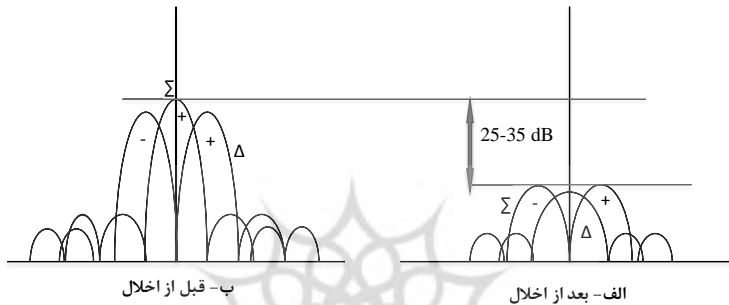


شکل (۱۳) عملکرد اختلال قطبش متقاطع

^۱ Cross Polarization Jamming

در حالت کلی، مفهوم پایه‌ای تکنیک حمله الکترونیکی قطبش متقاطع این است که آنتن رادار ردیاب، برای سیگنال قطبی شده متقاطع، مشخصات زاویه‌ای آفست را با توجه به سیگنال قطبی شده اسمی ارائه می‌دهد بنابراین نقطه ردیابی در یک نقطه متفاوت با توجه به محور دید رادار به دست می‌آید.

اگر آنتن از نوع مونوپالس باشد الگوهای جمع و تفاضل به صورت شکل ۱۴ خواهد بود. به همین خاطر نقطه تعادل ردگیری تقریباً به مقدار عرض بیم جابجا می‌شود (شکل ۱۴ الف). لازم به ذکر است که صفر الگوی تفاضل همواره باید طوری قرار گیرد که هدف در آن نقطه باشد (شکل ۱۴ ب).

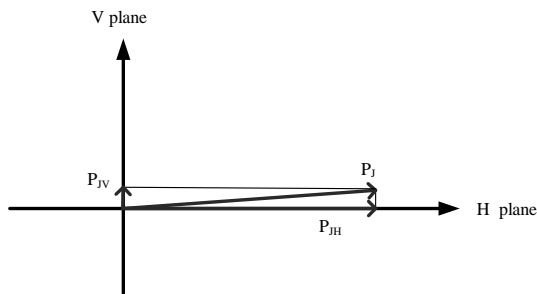


شکل (۱۴) الگوهای جمع و تفاضل در رادار مونوپالس قبل و بعد از اخلال قطبش متقاطع

مهم‌ترین نکته در عملکرد مناسب اخلال با قطبش متقاطع، توانایی اخلالگر برای تعیین قطبش رادار قربانی است. در مرحله بعد توانایی اخلالگر برای تولید و ارسال سیگنال با قطبش عمود بر قطبش رادار است. البته سیگنال قطبی شده به شدت توسط فاکتور خلوص^۱ (PF) قطبش آنتن کاهش می‌یابد. اگر سیستم حمله الکترونیکی یک سیگنال قطبی شده با قدرت کافی تشعشع کند رادار ردیاب، هدف را با یک انحراف زاویه‌ای (خطای زاویه‌ای) ردیابی می‌کند.

برای مثال فرض کنیم راداری با قطبش عمودی را بخواهیم مختل کنیم در این حالت اختلال با قطبش افقی باید ارسال گردد (شکل ۱۵). اگر در تولید این سیگنال دو درجه خطا وجود داشته باشد، می‌توان توان مؤلفه قطبش عمودی آن را تعیین کرد.

¹ Purity Factor



شکل (۱۵) تعیین اثر خطا در اختلال قطبش متقاطع

$$V_{jv} = V_{jh} \sin(2^\circ) = 0.035 V_{jh} \quad (۴)$$

در رابطه بالا V دامنه سیگنال اختلال و اندیس‌های v و h به ترتیب نشان دهنده قطبش‌های عمودی و افقی هستند. نسبت توانی مؤلفه‌های افقی و عمودی توان اختلالگر عبارت است از:

$$P_{jv} = 1.2 \times 10^{-3} P_{jh} \quad (۵)$$

$$\frac{P_{jv}}{P_{jh}} = -29 \text{ dB} \quad (۶)$$

مؤلفه عمودی سیگنال اختلال (V_{jv}) در حالی که حدود 30dB زیر مؤلفه افقی (V_{jh}) آن است، می‌تواند به رادار در ردگیری صحیح هدف بسیار کمک کند، چرا که آنتن حداقل 30dB سیگنال‌های با قطبش عمود بر خود را تضعیف می‌کند. این مقدار باقیمانده باید از اکوی هدف و همین مؤلفه عمودی قوی‌تر باشد. معمولاً سیستم اختلالگر باید بتواند قطبش رادار را با دقتی بهتر از یک درجه تعیین و ارسال کند.

مزیت این روش این است که خطای زاویه‌ای می‌تواند به اندازه کافی بزرگ باشد تا خارج از محدوده پهنای بیم رادار باشد و از طرفی می‌تواند به راحتی روشن و خاموش شود تا یک نوسان قابل توجه بر روی خط دید مستقیم سیستم سلاح ایجاد کند. معایب این روش عبارتند از:

- با توجه به رادارهای ردیابی که طراحی شده‌اند تا سیگنال‌های قطبی شده متقاطع را حذف یا خنثی کنند، قطبش متقاطع به نسبت جمینگ به سیگنال بالایی نیاز دارد.
- قطبش متقاطع یک خطای زاویه‌ای فراهم می‌کند در نتیجه مناسب علیه تهدیدات موشکی نیست در حقیقت فاصله خطا محصولی از فاصله ضربدر تانژانت خطای زاویه‌ای است، وقتی که فاصله خیلی کوتاه شود (موشک نزدیک شونده) فاصله خطا ناچیز می‌شود.

- با توجه به حرکات و مانورهای سکو، اخلاص قطبش متقاطع نیازمند اندازه گیری دقیق قطبش ارسالی می باشد در نتیجه پیاده سازی این تکنیک نیازمند تجهیزات پیشرفته بوده و سخت می باشد.
- اثر دی پلاریزاسیون دریا و خشکی می تواند خلوص سیگنال اخلاص قطبی شده را تغییر دهد و اثر بیکنی ناخواسته ایجاد کند.

دکوی

الف- دکوی کششی^۱

اهداف راداری دکوی برای خنثی کردن تهدیدات رادار در شناسایی، هدایت و تشخیص هدف می باشد (Sergi A. Vakin & etc. 2001, 313). ایده پایه این نوع تکنیک اختلال کاملاً ساده است؛ استفاده از یک سیستم بیکن کوچک که در یک پاد نصب شده است و به وسیله سکو برای دفاع کشیده می شود. این تکنیک برای حفاظت از کشتی و هواپیما استفاده می شود و محصولات عمده فقط برای یک بار در دسترس هستند. مزیت این تکنیک این است که کاملاً قابل قبول است. در واقع فهم این تکنیک بسیار ساده است زیرا رادارهای ردیاب یک سیستم بیکنی را خیلی راحت تر ردیابی می کنند همانطور که در تست و ارزیابی رادارها از سیستم بیکنی استفاده می شود.

دکوی ها به عنوان اهداف واقعی (نه مجازی) مورد استفاده قرار می گیرند. واقعیت این است که یک دکوی مشخصات کامل یک هدف را می تواند دارا باشد. در جنگ اول خلیج فارس نیروهای ائتلاف با بکارگیری تعداد زیادی دکوی به عنوان اهداف کاذب، شبکه پدافندی عراق را اشغال نموده و سامانه های موشکی را مجبور به واکنش و درگیر شدن نمودند سپس با بکارگیری موشک های ضد تشعشعی^۲ به سرکوب پدافند هوایی عراق مبادرت نمودند (عملیات SEAD^۳). این نوع عملیات بیانگر سادگی در عین کارایی دکوی را نشان می دهد (غفاری، ۱۳۸۸). از طرفی این تکنیک دارای معایبی به شرح ذیل می باشد:

- قابلیت گمراه سازی^۴: حتی اگر این روش بتواند رادار ردیاب را گمراه کند اما تضمین نمی کند که یک رادار با قابلیت های پیشرفته، هواپیمای هدف را نیز ردیابی نکند. اگر سکو بخواید از جمینگ همزمان نیز استفاده کند باز هم ممکن است که رادار به حالت جستجو در حالت اخلاص سوئیچ کند و بر روی هدف اصلی ردیابی نماید.

¹ Towed Decoy

² Anti-Radiation missile

³ Suppressions of Enemy Air Defense

⁴ Seduction Capability

- مخروط کور^۱: بر اساس مباحث هندسی دو بخش مخروطی در جلو و عقب سکو وجود دارد که محافظت دکوی کششی کامل و مطمئن نیست و متأسفانه این دو بخش بیشترین سهم تهدید وارده را دارند. هر چند تعدادی از سازندگان دکوی کششی پیشنهاد می‌کنند که همزمان از مانور سکو نیز استفاده گردد ولی مانور مباحث و مشکلات خاص خود را داشته و در بسیاری موارد کاربرد لازم را ندارد (F.Nerri, 2001).
- حملات چندگانه: طبیعت و ماهیت دکوی کششی یکبار مصرف بودن آن است در حالی که در حال حاضر تهدیدات چندگانه است و در صورتی که موشک اول دکوی را منهدم کند دیگر محافظتی از سکو وجود ندارد.

ب- دکوی مصرفی^۲

در سکوه‌های هواپایه دکوی مصرفی، وسیله‌های پروازی خیلی کوچکی هستند که از پخش‌کننده چف و فلیر پرتاب می‌شوند و قابلیت ارسال سیگنال را دارند. به علت کوچک بودن سائز توان آنها محدود بوده و مناسب برای تهدیدات خاص می‌باشند. مزیت دکوی مصرفی هزینه پایین آن و داشتن تعداد بالا در سکو می‌باشد. ایراد اصلی آن نیز این است که فقط به تهدیدات خاص پاسخگو بوده و حالت جامع و کلی ندارد.

اختلال دوبینی^۳:

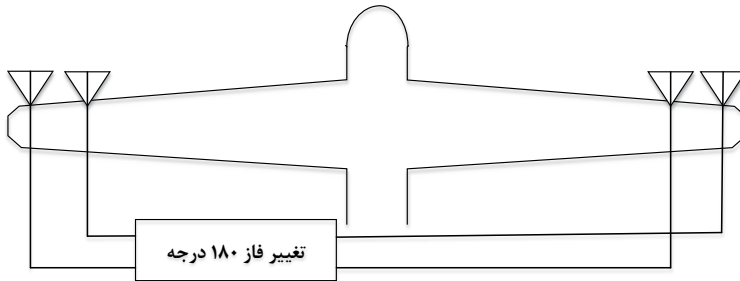
اختلال دوبینی بر اساس پدیده فیزیکی گلینت تحلیل می‌گردد. پدیده گلینت بر تمام انواع رادارها اثرگذار می‌باشد. اختلال دوبینی شامل یک جفت حلقه تکرارکننده است که به صورت همدوس به هم مرتبط هستند. هر یک از آنها سیگنال دریافتی را از محلی که دیگری آن را دریافت کرده است ارسال می‌کند^۴. فاصله دو مکان باید تا حد ممکن زیاد باشد تا حداکثر خطای زاویه ایجاد شود. شکل ۱۶ نشان می‌دهد چگونه یک اختلالگر دوبینی می‌تواند بر روی لبه‌های دو بال هواپیما نصب شود. توجه کنید که دو مسیر الکتریکی باید هم طول باشند و باید یکی از آنها تغییر فاز 180° داشته باشد.

¹ Obscuration Cone

² Expendable Decoy

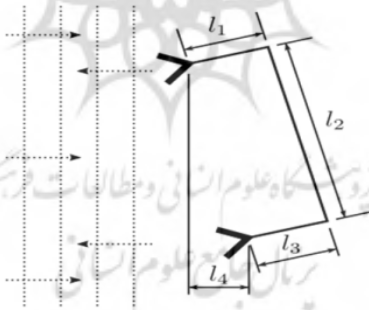
³ Cross-Eye Jamming

^۴ به این نوع پیاده‌سازی، پیاده‌سازی رترودایرکتیو (Retrodirective) نیز گفته می‌شود.



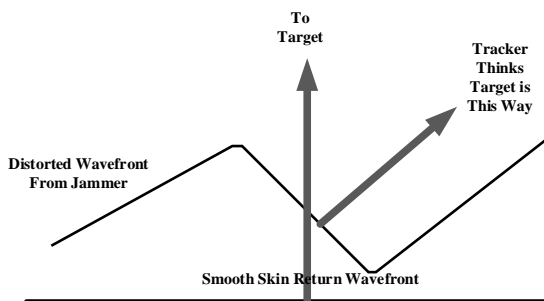
شکل (۱۶) محل نصب آنتن در اخلاص دوبینی

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که طول کامل مسیر از رادار تا تکرارکننده و برگشتی به رادار برای دو تکرارکننده با تغییر جهت به رادار یکسان می‌ماند (تا زمانی که حلقه‌های تکرارکننده دارای طول یکسانی باشند). سیگنال‌های تکرارکننده با 180° اختلاف فاز به آنتن‌های ردیاب رادار می‌رسند و این مطلب مستقل از جهت رادار است. این مسئله سبب ایجاد یک صفر در پاسخ ترکیبی حسگرهای رادار درست در نقطه‌ای که مدار ردیاب رادار انتظار یک اوج را دارد می‌شود. با نگاه مجدد به پاسخ‌های مجموع و تفاضل در شکل ۳ مشاهده می‌کنیم اگر در نقطه‌ای که باید در پاسخ مجموع یک اوج دیده شود، یک صفر ظاهر گردد، سیگنال ردیابی به میزان زیادی دچار اعوجاج می‌شود.



شکل (۱۷) طول مسیر اخلاصگر دوبینی تا رادار

این اثر اغلب به صورت اعوجاج جبهه موج سیگنال برگشتی پوستی مطابق شکل ۱۸ نشان داده می‌شود. این اعوجاج جبهه موج هرچند با درجه کم، تکرار می‌شود. توجه کنید که مرکز ناپیوستگی تیز مستقیماً در رادار ایجاد می‌شود که این مسئله به خاطر اثر نشان داده شده در شکل ۱۷ است.



شکل (۱۸) پیچیدگی جبهه موج سیگنال در اخلاخل دوبینی

دو محدودیت عمده در مقابل کاربرد روش اخلاخل دوبینی وجود دارد. محدودیت اول نیاز به یکی بودن بسیار دقیق طول الکتریکی دو مسیر تکرارکننده است (پنج درجه الکتریکی مقدار معمولی است). رعایت این نکته بسیار دشوار است زیرا فاصله الکتریکی در هر مداری، کابلی یا موجبری، با دما و قدرت سیگنال تغییر می کند (به یاد داشته باشید 5° کمتر از ۱ میلی متر در فرکانس های معمول رادار است). دومین محدودیت این روش نیازمند بودن آن به نسبت J/S بسیار بالایی است (۲۰dB یا بیشتر) زیرا باید صفر بر سیگنال مجموع غالب شود (W.P.du Plessis, et. al, 2009).

نتیجه گیری و پیشنهادها

در بخش نخست این مقاله، توانمندی رادارهای مونوپالس و علت ذاتی مقاومت این نوع ردیابی در مقابل اختلال بیان شد از طرفی به کارگیری این نوع تکنیک ردیابی در کنار تکنیک آرایه فازی قابلیت ردیابی چندین هدف را با اشتراک زمانی فراهم می نماید. این موارد در کنار سایر تکنیک های محافظت الکترونیکی، کاربرد رادارهای ردیاب مونوپالس را گسترش داده است به نحوی که در حال حاضر به جرأت می توان گفت تمام رادارهای ردیاب در سامانه های پدافندی، موشک های هدایت شونده راداری و... از تکنیک ردیابی مونوپالس استفاده می کنند. این موضوع به چالش اصلی سکوهای مهاجم تبدیل شده است. هرچند که به کارگیری این نوع رادار در موشک ها، بحث مقابله با این نوع جستجوگرها را به عنوان یک نیاز برای انواع سکوهای دریاپایه، هواپایه و حتی زمین پایه نیز مطرح کرده است.

در بخش دوم انواع تکنیک های جنگ الکترونیک مرسوم علیه رادارهای مونوپالس بیان گردید. این تکنیک ها بر پایه ضعف های ساختاری و یا ضعف های ذاتی رادار طراحی گردیده اند.

تکنیک‌هایی از جمله اختلال آرایش، اختلال تصویر، اختلال کناره و... براساس ضعف‌های ساختاری رادار در نوع طراحی از جمله سلول تفکیک راداری، فیلتر میان‌گذر و ضعف‌های بخش پردازشگر رادار تحلیل می‌گردند. در این نوع تکنیک‌ها داشتن اطلاعات کافی از مشخصات فنی رادار ضروری است. از طرفی پدیده‌های فیزیکی از جمله گلینت، چند مسیری، اهداف چندنقطه‌ای و... باعث اختلال‌های شدید در ردیابی زاویه‌ای می‌گردند. تکنیک‌های اختلالی که براساس این پدیده‌ها تحلیل می‌گردند از جمله دوبینی، بر همه انواع رادارها تأثیرگذار هستند و به مشخصات فنی رادار بستگی ندارند. هر کدام از این روش‌ها بر اساس تاکتیک مورد نظر می‌تواند اجرا شود. در متون و مراجع جنگ الکترونیک هیچ‌گاه به صراحت روشی را برتر یا غالب ندانسته‌اند که این موضوع به علت پیچیدگی‌های خاص در مبحث جنگ الکترونیک می‌باشد.

با توجه به مباحث و تحلیل‌های انجام شده می‌توان دو دیدگاه را بررسی نمود. نخست تولید و طراحی سامانه‌های راداری مبتنی بر تکنیک ردیابی مونوپالس که به طور ذاتی در مقابل اختلال مقاوم بوده و در زمان بحران بسیار کاربردی و حیاتی می‌باشد. در دیدگاه دوم که هدف اصلی مقاله نیز می‌باشد با توجه به نقاط ضعف رادارهای ردیاب مونوپالس سعی در اختلال مناسب و فریب سامانه‌های متخاصم با بکارگیری بهترین نوع تکنیک بر اساس شرایط تاکتیکی دارد. لازم به ذکر است که حمله و دفاع الکترونیکی یک چالش دوطرفه است بدین معنی که با طراحی یک حمله الکترونیکی مناسب می‌توان بر سامانه‌های دفاعی غالب شد و یا با بکارگیری دفاع الکترونیکی مناسب حمله الکترونیکی را بی‌اثر و بر سامانه مهاجم غالب شد.

در انتها با توجه به موضوع بحث که بر حمله الکترونیکی و تکنیک‌های آن تأکید دارد می‌توان گفت که نکته اصلی در تکنیک‌های حمله الکترونیکی مبتنی بر فریب، گمراهی رادار بوده به نحوی که در اکثر موارد رادار متوجه فریب نمی‌گردد. در واقع رادار با یک هدف مجازی درگیر می‌گردد. از طرفی این نوع تکنیک‌ها در سامانه اخلاگر منصوب بر سکو قرار دارند و قابلیت بکارگیری چندباره و علیه سامانه‌های مختلف تهدید در مسیر را دارا می‌باشند. مزایا و معایب تکنیک‌های اختلال بیان شده نیز بیانگر این است که اختلال قطبش متقاطع و اختلال دوبینی از کارایی بهتر برخوردار می‌باشند هر چند همانطور که ذکر گردید در نحوه پیاده‌سازی و بکارگیری آن‌ها باید دقت لازم را نمود.

منابع

- قربانی، ایاز. چاپ سوم ۱۳۹۳. *اصول سیستم‌های راداری*. انتشارات نهر دانش. تهران.
- Merill I. Skolnik. *مقدمه‌ای بر سیستم رادار (ویرایش سوم)*. ترجمه سهیلی فر، محمدرضا و آقابابایی، مجید. ناشر ادبستان، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره).
- غفاری، یاسر. (۱۳۸۸). *دکوهای هواپرتاب تاکتیکی TALD*. فصلنامه جنگ الکترونیک، شماره ۱۰.
- Samuel M. Sherman, David K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques", 2nd edition, Artech House, 2011
- Merill M. Skolnik, "Radar Handbook", 2nd edition, McGraw Hill, 1991
- Filipo Neri, "Introduction to Electronic Defence System", 2nd edition, Artech House, 2001
- Sergei A. Vakin, Lev N. Shustov, Robert H. Dunwell, "Fundamentals of Electronic Warfare", Artech House, 2001
- D. Adamy, "EW101: a first course in electronic warfare", Artech House, 2001.
- D. Adamy, "EW102: a second course in electronic warfare", Artech House, 2004.
- D. Adamy, "EW104: Electronic Warfare Against a New Generation of Threats", Artech House, 2015.
- Filipo Neri, "Anti-Monopulse Jamming Techniques", 2001 *SBMO/IEEE MTT-S Microw. optoelectron Conf*, 2001, vol2, pp.45-50
- Rong Hua, Chen Qiu, "Research on Jamming Efficiency and Measures against Monopulse Radar", 978-1-4799-1980-2/15/\$31.00©2015 IEEE pp.883-886
- Imran Kalinbacak, Mustafa Pehlivan, Korkut Yegin, "Cross polarization Monopulse Jammer Located on UAV", 978-1-5386-1605-5/17/\$31.00©2017 IEEE, pp. 337-341
- Seung Phil Lee, Byung Lae Cho, Seng Min Lee, "Unambiguous Angle Estimation of Unresolved Target in Monopulse Radar", IEEE, Trans. Aero. And electro. System, vol.51, no.2, April 2015
- W.P. du plessis, I.W. Odendaal, I. Joubert, "Extended Analysis of Retrodirective Cross-Eye Jamming", IEEE Antennas Prpag. vol.57, no.9, pp.2803-2806, Sep, 2009