مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال هشتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶؛ ص ۱۸-۹

طراحی مفهومی یک آزمونگر فریب فلری برای جستجوگرهای مادون‌قرمز

سیاوش پادگانه[۱]، صفا خزائی[۲*]، محمدرضا عاروان[۳]

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۰۹/۲۵، پذیرش: ۹۵/۰۵/۰۱)

چکیده

انجام آزمون‌های ارزیابی اقدامات متقابل در مقابل تهدیدات واقعی در حالت پرواز و با سرعت و ارتفاع واقعی به آسانی امکان‌پذیر نیست. منشأ تهدیدات همواره در دسترس نیستند و همچنین هزینه انجام آزمون و خطر تخریب و انهدام اهداف در آزمون‌های میدانی بسیار زیاد است. بنابراین همواره طراحی و ساخت آزمون‌گرهای جستجوگر مادون‌قرمز از موضوعات قابل توجه در جهت توسعه و پیشرفت اقدامات متقابل است. یکی از اصلی‌ترین اقدامات متقابل علیه موشک‌های مادون‌قرمز، پرتاب فلر (اهداف کاذب) از اهداف هوایی تعقیب شونده است. در این تحقیق شبیه‌سازی آزمایشگاهی اقدامات فریب فلری توسط آزمون‌گر موجود انجام شده است و بررسی اجمالی نیز بر این نتایج صورت گرفته است. در ادامه پیشنهاد طراحی و ساخت آزمون‌گر تکمیلی جستجوگرهای مادون‌قرمز ارائه شده است. همچنین مقایسه آزمون‌گر موجود با آزمون‌گر پیشنهادی بر اساس طراحی مفهومی آن‌ها انجام شده است. آزمون‌گر پیشنهادی، انجام شبیه‌سازی کامل‌تر و دقیق‌تر اقدامات فریب و همچنین ارزیابی عملکرد جستجوگرهای مادون‌قرمز در شرایط مختلف را ممکن می سازد. بررسی و تحلیل نتایج این شبیه‌سازی‌ها علاوه بر ارتقای اقدامات فریب، سبب توسعه و ارتقاء در عملکرد جستجوگرهای مادون‌قرمز نیز است.

کلیدواژه‌ها: جستجوگر مادون‌قرمز، فریب فلری، آزمون‌گر، طراحی مفهومی

Conceptual Design of a Flare Deception Tester for Infrared Seekers

S. Padeganeh, S. Khazaei*, M. R. Arvan
Imam Hossein University

(Received: 16/12/2015; Accepted: 22/07/2016)

Abstract

It is not so easy to do evaluation tests for countermeasures against real threats that are flying in a real speed and altitude. The causes of the threats are not always accesible and if we want to make a test, it will be costly. Moreover, it is very dangerous to destroy and explode a target in the field tests. Thus, countermeasures proceedings, design and manufacturing of infrared seeker testers have been considered as a serious topic. One of the main countermeasures activities against infrared missiles is usually throw a flare (false target) by aerial targets being tracked. In this paper, laboratorial simulation of flare deception countermeasures has been accompolished on current tester and design and manufacturing of a complementary tester for infrared seekers has been proposed. A comparison is also made between the current tester and the proposed tester based on their conceptual designs. The proposed tester presents a more accurate and perfect simulation for deception countermeasures and provide a performance evaluation for infrared seekers in various conditions. Study and analysis of the simulation results can not only promote deception countermeasures but also will improve the performance of infrared seekers.

Keywords: Infrared Seekers, Flare Deception, Tester, Concepual Design

* Corresponding Author E-mail: skhazai@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

گسترش و توسعه روزافزون کاربرد جستجوگرهای مادون‌قرمز در تسلیحات نظامی، و موفقیت چشمگیر این جستجوگرها در ردیابی اهداف، سبب افزایش توسعه و تحقیق در خصوص اقدامات متقابل مادون‌قرمز (IRCM)[1] نیز شده است. یک روش ساده مقابله با جستجوگرهای مادون‌قرمز پرتاب فلر[2] (اهداف کاذب) از اهداف هوایی تعقیب شونده است. یک فلر مادون‌قرمز به طور معمول از اهداف هوایی تعقیب شونده پرتاب می‌شود و دارای تشعشعی چندین برابر تشعشع هدف است. با توجه به اینکه جستجوگرهای مادون‌قرمز موشک، منابع با شدت بیشتر را ردیابی می‌نمایند، بنابراین جستجوگر، هدف کاذب (فلر) را ردیابی می‌کند و در ردیابی هدف واقعی دچار اختلال می‌شود. استفاده از فلرها در برابر موشک‌های مادون‌قرمز بسیار مؤثر، ساده و کم هزینه است [۱].

آزمون کارایی فریب فلری جستجوگرهای مادون‌قرمز در سرعت و ارتفاع واقعی کار آسانی نیست و علاوه بر هزینه زیاد، احتمال تخریب اهداف نیز بسیار زیاد است. همچنین در عمل برای هر موشک تنها یک سناریو تهدید می‌تواند مورد آزمون قرار گیرد. بنابراین شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی در جهت توسعه و پیشرفت اقدامات متقابل و ارزیابی راه‌های مقابله با جستجوگرهای مادون‌قرمز بسیار مؤثر و کارآمد خواهند بود. علاوه بر این، بررسی و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی اقدامات متقابل، در جهت ارزیابی عملکرد جستجوگرهای مادون‌قرمز و توسعه و ارتقای عملکرد آن‌ها نیز قابل استفاده می‌باشند. تا کنون تحقیقات زیادی در خصوص اقدامات متقابل مادون‌قرمز و بررسی تأثیر اینگونه اقدامات بر عملکرد جستجوگرهای مادون‌قرمز انجام شده است. در اغلب این تحقیقات با شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، تأثیر اقدامات متقابل بر جستجوگرها بررسی شده است. در ادامه به طور خلاصه به برخی از این تحقیقات و نتایج آن‌ها اشاره می‌شود.

توکلی [۲] با کمک مدل‌سازی نرم‌افزاری، اثرات جمر و فلر را بر انحراف جستجوگرهای رتیکلی[3] بررسی کرده و با تغییر پارامترهای مختلفی مانند دامنه، فرکانس و فاز این تأثیرات بر عملکرد جستجوگر بررسی شده است.

آریامنش [۳] در تحقیق دیگری به بررسی اهداف کاذب و تأثیرات آن‌ها بر جستجوگرهای مادون‌قرمز پرداخته است. در این تحقیق با شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار متلب، تأثیر حضور فلر در میدان دید جستجوگر مادون‌قرمز با الگوی پویش روزت[4] بررسی شده است و در نهایت روش مقابله جستجوگر مادون‌قرمز با فلر بر مبنای تقسیم سیگنال آشکارساز در دو باند طیفی مادون‌قرمز و ماوراءبنفش ارائه شده است.

یی‌فان و بی‌فنگ [۴] تأثیرات پرتاب فلرها با روش متوالی را ارزیابی کردند و بر اساس نتایج این تحقیق اثبات نمودند، که اگر فلرها به صورت متوالی پرتاب شوند و زمان بین پرتاب بزرگ‌تر از زمان سوختن باشد، فلر نمی‌تواند به طور دائمی در محدوده پرواز باشد. بنابراین بهترین زمان توالی پرتاب، کمی کوچک‌تر از زمان سوختن فلر است.

در تحقیقی دیگر، یانگ‌کیم [۵] با شبیه‌سازی نرم‌افزاری متلب برای دو نوع رتیکل نشان داد که فرکانس جمر تأثیر بیشتری در کارایی آن نسبت به سایر پارامترها در انحراف جستجوگر مادون‌قرمز دارد. همچنین در یک مطالعه، هان و همکارانش [۶] تأثیر شرایط جوی را بر طیف مادون قرمز یک فلر مدل‌سازی کردند. نتایج تجربی این مطالعه نشان می‌دهد که دی‌اکسید کربن و بخار آب دارای بیشترین تأثیر در جذب اتمسفری طیف فلر می‌باشند. آل شیخ یاسین و همکارانش [۷] نیز آشکارسازی فلر را در جستجوگرهای مادون قرمز با آرایه‌های متقاطع دو رنگ (کانال) بررسی نمودند.

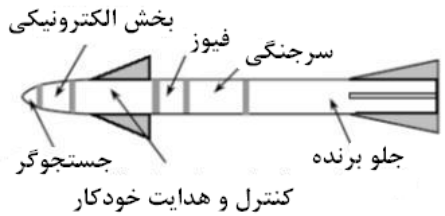
از آنجا که موضوع فریب فلری جستجوگرهای مادون قرمز در صنایع دفاع هوایی حائز اهمیت زیادی است و در این خصوص آزمونگرهای[5] موجود دارای نواقصی هستند، بنابراین در این تحقیق برای نخستین بار در سطح کشور با بررسی و تحلیل عملکرد یک آزمونگر موجود و با الهام از تحقیق انجام شده توسط ماینی و آگروال [۸] یک طرح پیشنهادی برای انجام آزمون‌های جامع و کسب نتایج دقیق‌تر ارائه شده است.

۲. جستجوگرهای مادون قرمز و فریب فلری آن‌ها

۲-۱. جستجوگرهای مادون‌قرمز

موشک‌های آشیانه‌یاب مادون‌قرمز برای یافتن و دنبال کردن اهداف هوایی مانند هواپیما و بالگردها از تشعشع حرارتی آن‌ها استفاده می‌کنند. فرآیند هدف‌یابی در این موشک‌ها به کمک ابزاری که به طور معمول در نوک آن نصب شده و جستجوگر نام دارد، صورت می‌پذیرد. شکل (۱) ساختار کلی یک موشک هدایت شونده مادون‌قرمز را نشان می‌دهد [۹].

[1] Infrared Countermeasuer Management (IRCM)
[2] Flare
[3] Reticle
[4] Rosette-Scan
[5] Testers

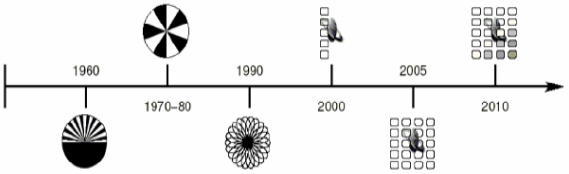


شکل ۱. مؤلفه‌های اصلی یک موشک آشیانه‌یاب [۹]

انرژی حرارتی ساطع شده از اهداف که در باند الکترومغناطیس و در محدوده امواج مادون‌قرمز قرار دارند، امکان شناسایی و ردیابی اهداف را توسط جستجوگرهای مادون‌قرمز فراهم می‌کنند. جستجوگرهای مادون‌قرمز انرژی حرارتی رها شده از هدف را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل کرده و از اطلاعات این سیگنال‌ها مانند فرکانس، دامنه، عرض پالس و فاز، موقعیت هدف را تعیین کرده و سیگنال‌های کنترلی مناسب را جهت ردگیری هدف، به قسمت هدایت و کنترل ارسال می‌کنند.

اولین موشک‌هایی که ساخته شدند از جستجوگرهایی با رتیکل چرخشی استفاده می‌کردند. بعدها استفاده از جستجوگر اسکن مخروطی که دارای آشکارسازهایی بهبود یافته با نسبت سیگنال به نویز بالاتری بودند، جانشین روش اسکن چرخشی شد. اولین نسل از جستجوگرهای مادون‌قرمز، فقط توانایی آشکارسازی اهداف پرنده را در حالت دورشونده داشتند. برای جبران نقص سامانه‌های نسل اول، نسل دوم از جستجوگرهای مادون‌قرمز ساخته شد. با پیشرفت فناوری آشکارسازها و با استفاده از خنک‌سازی آشکارسازهای موشک‌هایی با قابلیت مقابله با اهداف هوایی در تمام جهات ساخته شدند [۱۰].

با جدی شدن تهدیدات موشک‌های مادون‌قرمز، اقدامات متقابل مادون‌قرمز به منظور مقابله با این نوع از موشک‌ها مورد توجه قرار گرفت. بنابراین نسل سوم از موشک‌های مادون‌قرمز با رویکرد مقابله با اهداف کاذب ساخته شد. در سال‌های بعد استفاده از فناوری چند آشکارسازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شد [۱۱]. روند تقریبی پیشرفت فناوری در جستجوگرهای مادون‌قرمز در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲. روند پیشرفت جستجوگرهای مادون‌قرمز [۱۲]

در ادامه به طور خلاصه در خصوص انواع جستجوگرهای اشاره شده در شکل (۲) مطالبی بیان می‌شود.

در حالت کلی جستجوگرهای مادون‌قرمز بر حسب عملکرد و فناوری آشکارسازی، شامل جستجوگرهای رتیکلی اسکن چرخشی[1]، رتیکلی اسکن مخروطی[2]، اسکن روزت[3]، اسکن آرایه صفحه‌کانونی[4] و اسکن چهارتایی[5] می‌باشند.

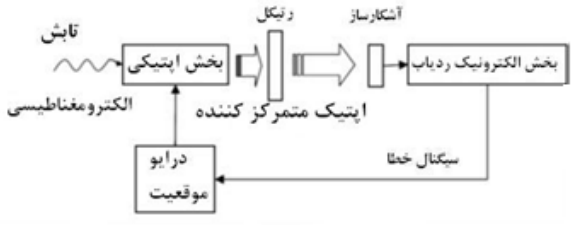
در جستجوگرهای رتیکلی اسکن چرخشی و اسکن مخروطی برای مدولاسیون سیگنال، از رتیکل‌ها استفاده می‌شود. در حالی که یک جستجوگر اسکن رُز، میدان دید آنی (IFOV)[6] کوچک را که به وسیله یک آشکارساز در یک الگوی رُز دربر گرفته شده را اسکن می‌نماید [۱۰]. اوزلر و همکارانش [۱۳] در یک مطالعه جستجوگر مادون قرمز اسکن رُز را بررسی و مقایسه نموده‌اند.

رتیکل وسیله نازک اپتیکی است که با الگوی خاصی از نواحی گذرده و ناگذرده لایه نشانی می‌شود. تابش هدف که روی رتیکل تصویر می‌شود از آن عبور کرده و به آشکارساز می‌رسد. در این نوع جستجوگرها اطلاعات مربوط به موقعیت هدف بسته به نوع رتیکل می‌تواند از دامنه، فرکانس، فاز و یا پهنای پالس و سیگنال خروجی آشکارساز به‌دست آید [۵].

در حالت کلی از معایب سامانه‌های رتیکلی می‌توان به عدم کارایی آن‌ها در تعیین موقعیت هدف به هنگام بزرگ بودن هدف یا وجود چندین هدف در میدان دید اشاره کرد. به علاوه اینکه در حضور اقدامات متقابلی چون منورها و فلرها که سعی در فریب آشکارساز جستجوگر دارند، تعیین موقعیت هدف مشکل‌تر می‌شود. جستجوگرهای مادون‌قرمز رتیکلی بر حسب نوع حرکت نسبی ایجاد شده بین رتیکل و تصویر میدان دید به دو دسته کلی جستجوگرهای اسکن چرخشی و اسکن مخروطی تقسیم می‌شوند [۱۰].

جستجوگرهای رتیکلی به دلیل سادگی مفهوم و کاربرد وسیع آن‌ها، مهم‌ترین نوع جستجوگرهای مادون‌قرمز غیرتصویری هستند. عملکرد کلی این جستجوگر بدین شکل است که انرژی حرارتی رها شده از هدف توسط قسمت اپتیک جستجوگر جمع‌آوری شده و آن را روی یک دیسک گردان یا ایستا به نام رتیکل متمرکز می‌کند. انرژی مادون‌قرمز عبوری از رتیکل با توجه به نوع آن به صورت سیگنال‌های بریده شده است. طیف مادون‌قرمز هدف پس از عبور از رتیکل با برخورد به آشکارساز، سیگنال تولید می‌کند. پس از پردازش این سیگنال، موقعیت فضایی هدف نسبت به محور جستجوگر، مشخص شده و جستجوگر توسط سامانه کنترل به سمت هدف هدایت می‌شود [۱۰]. در شکل (۳) دیاگرام بلوکی یک جستجوگر رتیکلی نشان داده شده است.

[1] Spin-Scan Seeker
[2] Cons Can Seeker
[3] Rosette
[4] Focal-Plane Array (FPA)
[5] Quadrant Scan
[6] Instantaneous Field of View (IFOV)



شکل ۳. دیاگرام بلوکی یک جستجوگر رتیکلی [۱۰]

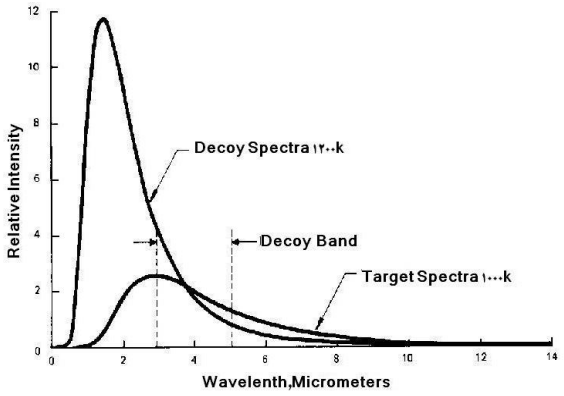
۲-۲. پرتاب فلر

اقدامات متقابل مادون‌قرمز به طور کلی به دو نوع "فعال" و "غیرفعال" تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرفعال شامل تغییرات در طراحی و یا اضافه کردن تجهیزات جانبی به منظور کاهش مشخصات طیفی، پوشش‌دهی و استتار قسمت‌های داغ هدف است. اما در حوزه اقدامات فعال، سه نوع اساسی هدف دروغین پرتاب شونده از هواپیما وجود دارد که عبارت‌اند از: چف[1]، دکوی حرارتی[2] و فلر [۱].

متداول‌ترین روش برای انحراف موشک‌های مادون‌قرمز، استفاده از فلر است (شکل (۴)). به طور معمول اهداف کاذبی که هدف در فواصل زمانی مختلف و منقطع پرتاب می‌کند، فلر نامیده می‌شود. سرعت و زاویه جدا شدن فلر از هواپیما از مؤلفه‌های اصلی است که در استفاده از فلرها مهم است. اگر این مؤلفه زیاد باشد به دلیل اینکه فلر به سرعت از میدان دید جستجوگر خارج می‌شود تأثیر چندانی روی ردیابی جستجوگر نخواهد داشت. بنابراین برای گمراه کردن سامانه هدایت موشک این مؤلفه حتی‌الامکان باید کوچک انتخاب شود [۱۱].

شکل ۴. پرتاب فلر از هواپیمای هرکولس C-130 [۱۱]

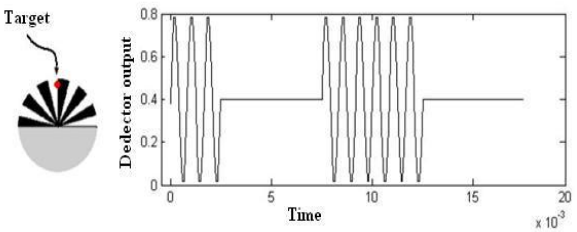
قدرت تشعشع فلرها چندین برابر هدف است (شکل (۵)). تغییرات چگالی فلرها متغیر با زمان است. در بازه‌هایی از زمان، میزان چگالی فلر در حدود چگالی هدف است و در سایر زمان‌ها چگالی فلر تا چندین برابر اندازه چگالی هدف واقعی افزایش می‌یابد [۱۰].



شکل ۵. شدت تشعشع نسبی فلر و هدف [۱۰]

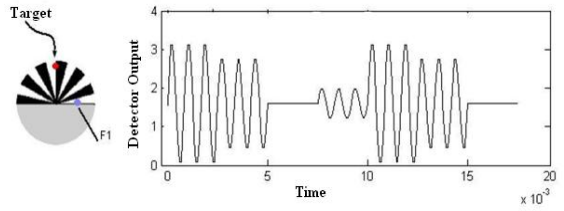
در ادامه، نتایج یک نمونه شبیه‌سازی نرم‌افزاری فریب فلری جستجوگرهای مادون‌قرمز رتیکلی و تأثیر این اقدام بر عملکرد جستجوگرهای مادون‌قرمز در ردیابی هدف واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیقی که توسط توکلی [۲] انجام شد، اثرات پرتاب فلر در میدان دید جستجوگرهای رتیکلی به‌صورت نرم‌افزاری شبیه‌سازی شده است. در شکل (۶) سیگنال خروجی آشکارساز با توجه به موقعیت هدف در میدان دید جستجوگر رتیکلی طلوع خورشیدی نشان داده شده است.



شکل ۶. سیگنال خروجی آشکارساز برای هدف [۲]

در شکل (۷) نیز سیگنال خروجی آشکارساز با توجه به موقعیت هدف و پرتاب فلر در میدان دید جستجوگر رتیکلی طلوع خورشیدی نشان داده شده است.



شکل ۷. سیگنال خروجی آشکارساز برای هدف در حضور فلر [۲]

همان‌طور که با مقایسه این دو شکل مشخص است، به دلیل حضور فلر تغییرات در دامنه و فاز سیگنال خروجی آشکارساز مشاهده می‌شود که منجر به اختلال در عملیات ردیابی هدف توسط جستجوگر شده است [۳].

[1] Chaff
[2] Thermal Decoys

۳. شبیه‌سازی آزمایشگاهی فریب فلری

در ادامه با مطالعه موردی آزمون‌گر جستجوگرهای مادون‌قرمز، شبیه‌سازی آزمایشگاهی اقدامات فریب فلری توسط این آزمون‌گر انجام می‌شود و تأثیر پرتاب فلر در میدان دید جستجوگر مادون‌قرمز بر عملکرد جستجوگر در ردیابی هدف واقعی بررسی می‌شود. جستجوگر استفاده شده در این شبیه‌سازی از نوع جستجوگرهای رتیکلی است.

۳-۱. طرح کلی آزمون‌گر

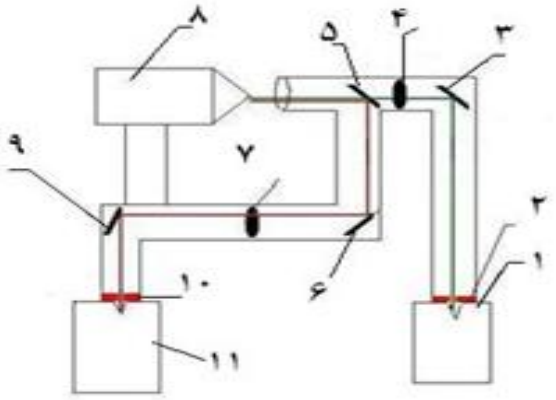
آزمون‌گر مورد مطالعه قابلیت شبیه‌سازی شرایط واقعی را برای بسیاری از عملکردهای جستجوگر مادون‌قرمز، در شرایط آزمایشگاهی فراهم می‌نماید. البته در این تحقیق تنها به تشریح اجزاء و عملکردهای آزمون‌گر که مرتبط با موضوع تحقیق می‌باشند، پرداخته خواهد شد.

آزمون‌گر مورد مطالعه جهت ارزیابی عملکرد نوعی از جستجوگرهای مادون‌قرمز، در شرایط مختلف پروازی و همچنین ارزیابی عملکرد جستجوگر در مقابل اقدامات فریب فلری اهداف طراحی و ساخته شده است. مطالعه موردی آزمون‌گر موجود با هدف آشنایی با عملکرد آزمون‌گر و همچنین طراحی به‌کار رفته در آن انجام می‌شود. این مطالعه امکان بازنگری در طراحی و همچنین ایده طراحی آزمون‌گری کامل‌تر و جامع‌تر را فراهم خواهد نمود.

شبیه‌سازی انجام‌شده در این تحقیق، شبیه‌سازی سخت‌افزاری و آزمایشگاهی است. به وسیله آزمون‌گر مورد مطالعه شرایط واقعی فریب فلری شبیه‌سازی می‌گردد. در آزمون‌گر مورد مطالعه از دو فرستنده مادون‌قرمز برای ایجاد مشخصات هدف و فلر استفاده شده است. فرستنده مادون‌قرمز هدف تا دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد گرم شده و مشخصات طیفی هدف را در محدوده طول موج (۵-۳) میکرومتر شبیه‌سازی می‌کند. فرستنده مادون‌قرمز فلر نیز با گرم شدن تا دمای ۱۳۵۰°C مشخصات طیفی فلر را در محدوده طول موج (۳-۱) میکرومتر شبیه‌سازی می‌کند. تشعشعات هدف و فلر پس از تولید در فرستنده‌های مادون‌قرمز و عبور از روزنه‌هایی با قطرهای مختلف جهت شبیه‌سازی موقعیت‌های مختلف هدف و فلر، از دو کانال اپتیکی مجزا به سمت جستجوگر ارسال می‌شوند. پرتوهای خروجی از دو کانال اپتیکی، در یک ترکیب کننده پرتو ترکیب و به سمت جستجوگر ارسال می‌شود.

شکل (۸) طرح کلی از آزمون‌گر مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. در مجموعه اپتیکی این آزمون‌گر از سه عنصر مستقل اپتیکی شامل لنز، آینه و آینه نیمه عبوری استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، آینه نیمه عبوری شماره ۵ با سطح پوشش‌دهی شده مخصوص، تقریباً تمامی تشعشع فرستنده هدف با طول موج (۵-۳) میکرومتر از خود عبور می‌دهد و تشعشعات فرستنده فلر را در محدوده طیفی (۳-۱) میکرومتر تا ۹۵ درصد انعکاس می‌دهد. این آینه همچنین با چرخش خود با سرعت زاویه‌ای مشخص، شبیه‌سازی عبور فلر از مقابل هدف در میدان دید جستجوگر را ایجاد می‌کند. تشعشع حرارتی هر یک از فرستنده‌ها پس از کنترل ابعادی و گذر از روزنه با قطر مشخص، از طریق یک مجموعه اپتیکی به جستجوگر منتقل می‌شوند. جستجوگر باید بتواند در موقعیت‌های مختلف و تعریف شده مطابق با دستورالعمل‌های آزمون‌گر برای جستجوگر، هدف را ردیابی نماید. اجزای اصلی آزمون‌گر به شرح زیر می‌باشند:

۱- فرستنده مادون‌قرمز هدف
۲- روزنه فرستنده هدف
۳- روزنه فرستنده هدف
۴- عدسی
۵- آینه نیمه عبوری و متحرک
۶- آینه انتقال دهنده
۷- عدسی
۸- جستجوگر مادون‌قرمز
۹- آینه انتقال دهنده
۱۰- روزنه فرستنده فلر
۱۱- فرستنده مادون‌قرمز فلر



شکل ۸. طرح کلی آزمون‌گر مورد مطالعه

۳-۲. شبیه‌سازی قابلیت ردیابی هدف[1] توسط جستجوگر

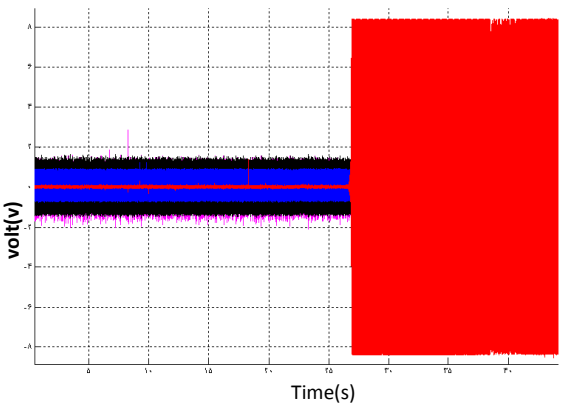
این شبیه‌سازی جهت ارزیابی قابلیت ردگیری هدف توسط جستجوگر انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی با گرم شدن فرستنده مادون‌قرمز هدف تا دمای ۳۵۰°C مشخصات هدف در میدان دید جستجوگر شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از مجموعه اپتیکی این مشخصات در میدان دید جستجوگر قرار می‌گیرد. پس از پردازش سیگنال‌های ارسالی از آشکارسازها در مجموعه

[1] Tracking Ability Test

الکترونیک جستجوگر، سیگنال خطا ایجاد می‌گردد، سپس در سایر مدارات الکترونیک جستجوگر، بر اساس پردازش سیگنال خطا، سیگنال ردیابی هدف ایجاد می‌گردد که این سیگنال جهت تصحیح حرکت جستجوگر به سمت هدف به مجموعه هدایت جستجوگر ارسال می‌شود. با بررسی مقطعی از سیگنال خروجی جستجوگر مشاهده می‌شود که با ورود هدف به میدان دید جستجوگر دامنه ولتاژ در سیگنال خروجی آشکارساز افزایش می‌یابد. پردازش این سیگنال و اطلاعات آن باعث تشخیص موقعیت هدف و ردیابی آن توسط جستجوگر است.

۳-۳. شبیه‌سازی فریب فلری جستجوگر

این شبیه‌سازی جهت ارزیابی عملکرد فریب فلری جستجوگر انجام می‌شود. در این آزمون حضور فلر در میدان دید جستجوگر شبیه‌سازی می‌گردد. مشخصات هدف از طریق فرستنده مادون‌قرمز مربوطه و با دمای ۳۵۰°C ایجاد می‌شود و جستجوگر به ردیابی هدف می‌پردازد. با ایجاد مشخصات فلر از طریق فرستنده مادون‌قرمز و با دمای ۱۳۵۰°C مشخصات فلر شبیه‌سازی می‌شود. سپس با عبور تشعشعات ایجاد شده فلر از مقابل میدان دید جستجوگر توسط مجموعه اپتیکی و آینه متحرک با سرعت زاویه‌ای مشخص، اقدامات فریب فلری و عبور فلر از میدان دید جستجوگر شبیه‌سازی می‌شود. سیگنال‌های خروجی آشکارساز پس از قرار گرفتن هدف و فلر در میدان دید جستجوگر در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹. نمای کلی از سیگنال خروجی در شبیه‌سازی فریب فلری

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود با ورود فلر به میدان دید جستجوگر، دامنه ولتاژ سیگنال آشکارساز به شدت افزایش پیدا کرده است و با توجه به اینکه موقعیت هدف از پردازش اطلاعات سیگنال خروجی آشکارساز توسط مجموعه الکترونیک جستجوگر تعین می‌گردد، در نتیجه جستجوگر در ردیابی هدف واقعی دچار اختلال شده و به سمت فلر منحرف شده و اقدام فریب فلری مؤثر بوده است.

در نمای مقطعی از سیگنال خروجی آشکارساز نیز مشاهده می‌شود که سیگنال ردیابی به جای هدف روی فلر تشکیل شده است و این به منزله تعقیب فلر به جای هدف واقعی توسط جستجوگر و خطا در ردیابی هدف واقعی است.

۴-۳. محدودیت‌های آزمون‌گر مورد مطالعه

با مطالعه موردی آزمون‌گر موجود، محدودیت‌های آزمون‌گر جهت انجام آزمون‌های شبیه‌سازی جامع، در موارد زیر مشاهده شد:

- در آزمون‌گر مورد مطالعه تشعشعات پس‌زمینه و تأثیر این تشعشعات بر جستجوگر در نظر گرفته نشده است.

- در آزمون‌گر مورد مطالعه تعویض دستی روزنه‌ها، ثابت بودن توان منابع تشعشع مادون‌قرمز و محدودیت در ایجاد مشخصات طیفی و فضایی فلر و هدف، از محدودیت‌های مهم آزمون‌گر در شبیه‌سازی‌های جامع است.

- در آزمون‌گر مورد مطالعه تشعشعات هدف در محدوده (۱۲-۸) میکرومتر که ناشی از تشعشعات بدنه و... است، در نظر گرفته نشده است.

۴. طرح پیشنهادی آزمون‌گر جستجوگر مادون‌قرمز

در این بخش طرح پیشنهادی و تکمیلی آزمون‌گر جستجوگر مادون‌قرمز بر اساس نتایج بررسی و تحلیل آزمون‌گر موجود، مصاحبه با کارشناسان و صاحب‌نظران مربوطه، و همچنین الهام از تحقیق [۸] ارائه می‌شود.

در این طراحی علاوه بر مشخصات هدف و فلر در آزمون‌گر مورد مطالعه در فصل سوم، پیشنهادات دیگری نیز در طرح پیشنهادی در نظر گرفته شده است که توجه به این موضوعات سبب انجام شبیه‌سازی‌های جامع‌تر و کامل‌تر می‌گردد. این موضوعات عبارتند از:

- در نظر گرفتن مشخصات باندهای طیفی ۳ تا ۱۲ میکرومتر جهت پس‌زمینه و ۸ تا ۱۲ میکرومتر تشعشعات ناشی از بدنه اهداف و....

- به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار جهت تغییرات در ابعاد لکه هدف و فلر در طول آزمون، که نشان‌گر موقعیت‌های مختلف پرواز خواهد بود.

- به‌کارگیری سامانه‌های کنترل جهت تغییرات در شدت تشعشع فرستنده‌های مادون‌قرمز هدف و فلر و همچنین ابعاد دریچه‌ها در طول آزمون، که نشان‌گر موقعیت‌های مختلف پرواز است.

تطابق طیفی اساس عملکرد یک جستجوگر است. بنابراین لازم است مشخصات مادون‌قرمز هدف در باند ۳ تا ۵ میکرومتر برای شبیه‌سازی جهت جستجوگرهایی که از آشکارسازهای تک رنگ استفاده می‌کنند و همچنین در باندهای ۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۲ میکرومتر برای جستجوگرهایی که از آشکارسازهای چند طیفی استفاده می‌کنند، به‌کار گرفته شود.

برای شبیه‌سازی علاوه بر مشخصات هدف، نیاز به ایجاد مشخصات مادون‌قرمز پس‌زمینه و فلر در هنگام انجام آزمون جامع نیز خواهیم داشت. همان‌طور که جستجوگر به هدف نزدیک می‌شود، مشخصات هدف آشکارتر و قوی‌تر می‌شود و مشخصات فلر ضعیف‌تر می‌شوند. بنابراین مهم است که سامانه آزمون‌گر بتواند مشخصات هدف متحرک و مشخصات فلر را در تمامی زمان‌ها شبیه‌سازی کند.

برای تولید مشخصات مادون‌قرمز فلر، نیاز به دانستن مشخصات مهم فلر که شامل زمان صعود فلر، زمان سوزش و دمای شعله‌ور شدن فلر است. هر چند مشخصات پس‌زمینه در طبیعت متغیر و با شرایط آب و هوایی، طول مسیر و ارتفاع متفاوت است ولی به منظور شبیه‌سازی مورد نظر، پس‌زمینه از ۳ تا ۱۲ میکرومتر یک تقریب منطقی و خوب است [۶].

۴-۱. طراحی مفهومی آزمون‌گر پیشنهادی

طرح مفهومی پیشنهادی، در سه کانال مستقل با نام‌های "کانال هدف" برای تولید مشخصات هدف، "کانال پس‌زمینه" برای تولید مشخصات پس‌زمینه و "کانال فلر" برای تولید مشخصات فلر، پیکربندی شده است.

کانال هدف مشخصات هدف را در باندهای۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۲ میکرومتر با توجه به حالت عملیاتی انتخاب شده توسط کاربر تولید می‌کند. کانال پس‌زمینه تابش یکنواخت پس‌زمینه را در باند ۳ تا ۱۲ میکرومتر با توان مورد نظر کاربر تولید می‌کند.

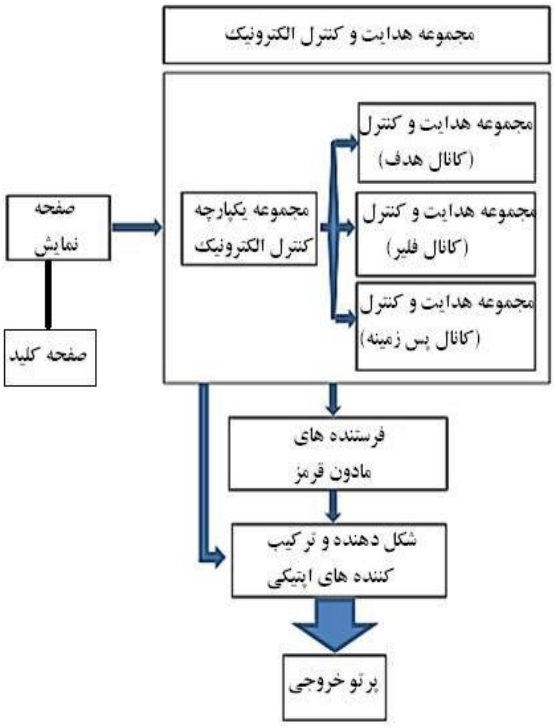
کانال فلر مشخصات فلر را در باند ۱ تا ۳ میکرومتر با خصوصیات دمایی و فضایی طراحی شده در هر حالت عملیاتی توسط کاربر تولید می‌کند. پروفایل‌های طیفی با استفاده از به‌کارگیری عناصر اپتیکی در مسیرها از سه پرتو به‌دست آمده طراحی می‌شوند.

طراحی طیفی و فضایی برای کانال هدف به وسیله دریچه‌های موتوردار ایجاد می‌شود. در حالی که برای کانال فلرها، به وسیله استفاده از یک موتور ترکیبی با دریچه‌ای در روی محور x-y تولید می‌شود.

هر سه کانال به وسیله یک مدار هدایت اختصاصی هدایت می‌شوند. همه مدارهای هدایت و کنترل به یک مدار کنترل اصلی وصل و کنترل می‌شود. خروجی اپتیکی از سه کانال با استفاده از ترکیب‌گر پرتو برای دریافت خروجی نهایی تشکیل شده است.

۴-۲. دیاگرام بلوکی آزمون‌گر پیشنهادی

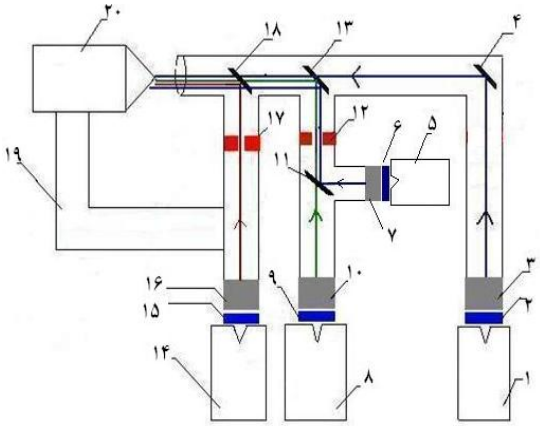
شکل (۱۰) دیاگرام بلوکی مفهومی از طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد. سامانه آزمون‌گر دارای پنج جزء اصلی است: کانال هدف، کانال فلر، کانال پس‌زمینه، درایوهای کنترل و الکترونیک و ترکیب کننده پرتو نوری. همان‌طور که از بلوک شکل (۱۰) مشهود است، مجموعه درایو و کنترل الکترونیک شامل مدارهای درایو و کنترل برای هدف، پس‌زمینه‌ها و کانال‌های فلر است. این مدار درایو و کنترل توسط یک کنترل کننده، کنترل می‌شود. بلوک فرستنده مادون‌قرمز از فرستنده مادون‌قرمز برای هر سه کانال تشکیل شده است. مجموعه تشکیل دهنده پرتو اپتیکی شامل، شکل دهنده پرتو برای هر سه کانال و همچنین ترکیب کننده پرتو برای تولید پرتو ترکیبی خروجی است.



شکل ۱۰. دیاگرام بلوکی مفهومی از طرح آزمونگر پیشنهادی

۴-۳. پیاده‌سازی سخت‌افزار

برای آزمونگر پیشنهادی، شکل (۱۱) طراحی اولیه یک سخت‌افزار تجربی را با کانال هدف، کانال فلر و کانال پس‌زمینه نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. طراحی سخت‌افزار آزمون‌گر پیشنهادی

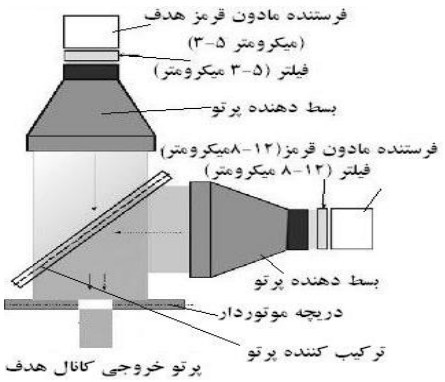
اجزای اصلی آزمون‌گر پیشنهادی به شرح زیر است:

۱- فرستنده مادون‌قرمز [۱] پس‌زمینه ۳ تا ۱۲ میکرومتر
۲– فیلتر گذرا [۲] پس‌زمینه ۳ تا ۱۲ میکرومتر
۳- بسط دهنده پرتو [۳] پس‌زمینه
۴- آینه انتقال دهنده
۵- فرستنده مادون‌قرمز هدف ۸ تا ۱۲ میکرومتر
۶- فیلتر گذرا هدف ۸ تا ۱۲میکرومتر
۷- بسط دهنده پرتو هدف
۸- فرستنده مادون‌قرمز هدف ۳ تا ۵میکرومتر
۹- فیلتر گذرا هدف ۳ تا ۵ میکرومتر
۱۰- بسط دهنده پرتو هدف
۱۱- ترکیب کننده پرتو [۴] (۱)
۱۲- دریچه موتوردار کانال هدف
۱۳- ترکیب کننده پرتو (۲)
۱۴- فرستنده مادون‌قرمز فلر
۱۵- فیلتر گذرا فلر ۱ تا ۳ میکرومتر
۱۶- بسط دهنده پرتو فلر
۱۷- دریچه موتوردار و متحرک روی محور X-Y [۵]
۱۸- ترکیب کننده پرتو (۳)
۱۹- پایه نگهدارنده جستجوگر
۲۰- جستجوگر مادون‌قرمز

کانال هدف: طرح یک کانال پس‌زمینه در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. کانال هدف شامل دو فرستنده مادون‌قرمز و مجهز به فیلترهای گذرا برای تولید طیف در باندهای ۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۲ میکرومتر است. فرستنده‌های مادون‌قرمز برای تولید مشخصات هدف در باندهای ۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۲ میکرومتر، فرستنده‌های نیمه‌هادی هستند. فرستنده به صورتی گرم می‌شود که دما در طول زمان شبیه‌سازی، به صورت مشخص و مورد نظر کاربر افزایش می‌یابد. در این روش با افزایش شدت مشخصات هدف، نزدیک شدن تدریجی جستجوگر به هدف شبیه‌سازی می‌شود.

بسط‌دهنده‌های پرتو در جلوی فیلترها برای ایجاد سایز و واگرایی پرتو مورد نظر استفاده می‌شوند. پرتو خروجی از دو بسط دهنده، ترکیب شده و پرتو ترکیب شده از میان یک دریچه موتوردار عبور می‌کند. دریچه به‌کار رفته اندازه لکه هدف را به طوری که برای جستجوگر دیده می‌شود، کنترل می‌کند. اندازه هدف در طول زمان شبیه‌سازی و نزدیک شدن جستجوگر به هدف افزایش می‌یابد. اندازه لکه با فاصله موشک تا هدف رابطه معکوس دارد.

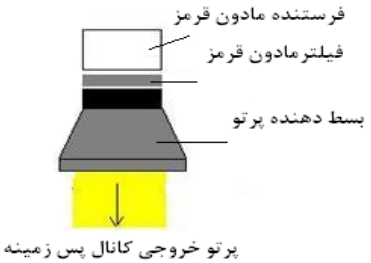
ترکیب کننده پرتو، پرتوهای کانال هدف را در باندهای ۳ تا ۵ و ۸ تا ۱۲ میکرومتر ترکیب می‌کند و دو پرتو روی آن با زاویه ۴۵ درجه برخورد می‌کنند. پوشش سطح در ترکیب کننده پرتو، پوشش ضد انعکاس با انعکاس کمتر از ۵ درصد در باند ۳ تا ۵ میکرومتر است و یک پوشش بسیار انعکاس دهنده برای باند ۸ تا ۱۲ میکرومتر است. دریچه موتوردار برای ایجاد روزنه‌های مختلف در مسیر پرتو مادون‌قرمز از کانال هدف به‌کار می‌رود. این موضوع برای تغییر اندازه لکه هدف و شبیه‌سازی وضعیت نزدیک شدن جستجوگر به هدف استفاده می‌شود. در اینجا لازم به ذکر است که شعاع روزنه به طور مداوم کنترل می‌شود و اندازه و شدت تشعشع لکه هدف با کاهش فاصله جستجوگر به هدف افزایش می‌یابد. دریچه به وسیله یک موتور دقیق DC هدایت می‌شود. رابط کاربری موتور به یک کنترل کننده و یا از طریق یک پروتکل ارتباطی RS-232 به یک رایانه متصل است.



شکل ۱۲. طرح کانال هدف [۸]

[1] IR Source
[2] IR Filter
[3] Beam Expander
[4] Beam Combiner
[5] Motorise Iris Mounted on X-Y Linear Stages

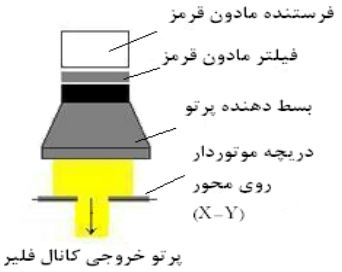
کانال پس‌زمینه: طرح یک کانال پس‌زمینه در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. بسط دهنده پرتو استفاده شده، یک پرتو با سایز و واگرایی مناسب را تولید می‌کند. کانال پس‌زمینه برای تولید طیف پس‌زمینه در باند ۳ تا ۱۲میکرومتر استفاده می‌شود که شامل یک فرستنده مادون‌قرمز، یک فیلتر باند گذرا، یک بسط دهنده پرتو و یک درایو و کنترل الکترونیکی برای ایجاد یک پرتو با اندازه و واگرایی مورد نظر است. مشخصات پس‌زمینه با تغیر دمای آن تولید می‌شود. بسط دهنده پرتو استفاده شده در کانال پس‌زمینه در باند ۳ تا ۱۲ میکرومتر کار می‌کند.



شکل ۱۳. طرح کانال پس‌زمینه [۸]

کانال فلر :کانال فلر همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، مشخصات فلر را با شدت، دما و مشخصات فضایی مورد نظر کاربر شبیه‌سازی می‌کند. کانال فلر از یک فرستنده مادون‌قرمز، یک فیلتر انتقال دهنده در باند ۱ تا ۳ میکرومتر و یک بسط دهنده پرتو تشکیل شده است. پرتو خروجی از بسط دهنده، از میان یک دریچه موتوردار متحرک عبور می‌کند که روی محور x-y نصب شده است. اندازه و موقعیت دریچه روی محور x-y کنترل شده است به شکلی که ماژول الکترونیکی، شبیه‌سازی دمایی و فضایی مشخصات فلر را انجام دهد. کانال فلر نه تنها شبیه‌سازی مشخصات فلر از نظر مشخصات شدت و مشخصات طیفی است، بلکه از نظر مشخصات زمانی و مکانی آن نیز است. مشخصات سیگنال فلر به طور عمده در باند ۱ تا ۳ میکرومتر است. شدت فلر با زمان کاهش می‌یابد و اندازه و فاصله آن از هواپیما نیز با زمان افزایش می‌یابد.

دمای فرستنده مادون‌قرمز با توجه به مشخصات فلر به‌صورت تابع نمایی تا دمای مورد نظر در زمان مشخص افزایش می‌یابد. سپس دمای آن به دمای محیط کاهش می‌یابد. طراحی بسط دهنده پرتو نیز همانند کانال هدف است. این بسط دهنده یک لکه با قطر و واگرایی مشخص تولید می‌کند. دریچه موتوردار استفاده شده در اینجا، همان دریچه استفاده شده در کانال هدف است. اندازه فلرها متناسب با زمان دور شدن از هدف زیاد می‌شوند. حرکت فلرها در صفحه x-y با استفاده از دریچه‌ها در محور x-y شبیه‌سازی شده است. این حرکت توسط یک کنترل‌کننده، کنترل می‌شود.



شکل ۱۴. طرح کانال فلر [۸]

پرتو خروجی: پرتو خروجی نهایی با استفاده از دو ترکیب کننده پرتو تولید شده است. ترکیب کننده پرتو (۲) برای ترکیب کانال پس‌زمینه و هدف استفاده می‌شود. خروجی ترکیب پس از آن به خروجی کانال فلر در ترکیب کننده پرتو (۳) اضافه شده است. دو ترکیب کننده پرتو برای به‌دست آوردن پرتو ترکیبی مناسب در نظر گرفته شده و دارای پوشش مناسب در سطوح مربوطه می باشند. دریچه به وسیله یک موتور دقیق DC هدایت می شود. رابط کاربری موتور به یک کنترل کننده و یا از طریق یک پروتکل ارتباطی RS-۲۳۲ به یک رایانه متصل است.

۴-۴. مقایسه آزمون‌گر مورد مطالعه و آزمون‌گر پیشنهادی بر اساس طرح مفهومی آن‌ها

در ادامه به مقایسه تحلیلی آزمون‌گر مورد مطالعه با آزمون‌گر پیشنهادی بر اساس طراحی مفهومی آن‌ها پرداخته می‌شود.

- آزمون‌گر مورد مطالعه جهت انجام آزمون عملکرد جستجوگر یک محصول خاص طراحی شده است. در حالی که آزمون‌گر پیشنهادی قابلیت انجام آزمون برای جستجوگرهای مختلف را دارد.

- در آزمون‌گر مورد مطالعه مشخصات هدف و فلر شبیه‌سازی شده است، اما شبیه‌سازی مشخصات پس‌زمینه پیش‌بینی نشده است. این موضوع با توجه به تأثیرات پس‌زمینه بر جستجوگر و بر تشعشعات هدف و فلر می‌تواند سبب نقص در شبیه‌سازی کامل و دقیق و در ارزیابی عملکرد جستجوگر و اقدامات فریب فلری شود.

- در آزمون‌گر مورد مطالعه مشخصات هدف تنها در باند ۳ تا ۵ میکرومتر شبیه‌سازی می‌شود در حالی که در طرح ارائه شده مشخصات هدف علاوه بر باند ۳ تا ۵ میکرومتر، در باند ۸ تا ۱۲ میکرومتر نیز شبیه‌سازی می‌شود.

- در آزمون‌گر مورد مطالعه، برای شبیه‌سازی فازهای مختلف پروازی، روزنه‌ها به صورت دستی تعویض می‌شوند که این موضوع می‌تواند باعث محدودیت در ارزیابی و همچنین عدم شبیه‌سازی کامل فازهای مختلف عملیاتی باشد. در صورتی که در طرح پیشنهادی، با در نظر گرفتن دریچه‌های موتوردار و با کنترل ابعاد روزنه‌ها می‌توان شرایط و زمان‌های مختلف پرواز را برای هدف و فلر به صورت کامل شبیه‌سازی نمود.

- درآزمون‌گر پیشنهادی با تغییر توان فرستنده‌های مادون‌قرمز هدف و فلر و همچنین کنترل قطر دریچه‌ها می‌توان نزدیک‌شدن تدریجی جستجوگر به هدف و پرتاب فلر را به طور کامل در تمامی زمان‌ها شبیه‌سازی نمود.
- با توجه به امکان ایجاد مشخصات اهداف و فلرهای مختلف می‌توان این آزمون‌گر را برای شبیه‌سازی و همچنین ارزیابی عملکرد جستجوگرها، اهداف و فلرهای مختلف استفاده کرد.
- در آزمون‌گر پیشنهادی روش ایجاد مشخصات مکانی و طیفی کامل‌تر و با محدودیت کمتری نسبت به آزمون‌گر مورد مطالعه طراحی شده است.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از اصلی‌ترین اقدامات متقابل علیه موشک‌های مادون‌قرمز پرتاب فلر از اهداف هوایی تعقیب شونده است. در این تحقیق شبیه‌سازی آزمایشگاهی اقدامات فریب فلری توسط آزمون‌گر موجود انجام شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در آزمون‌گر مورد مطالعه، تشعشعات پس‌زمینه و تأثیر این تشعشعات بر جستجوگر در نظر گرفته نشده است، امکان تغییر اندازه روزنه‌ها، تغییر در توان منابع تشعشع مادون‌قرمز و همچنین امکان ایجاد مشخصات طیفی و فضایی مختلف جهت فلر و هدف وجود ندارد که این محدودیت‌ها سبب نقص در شبیه‌سازی‌های جامع و مورد نظر کاربر است. با توجه به پیشرفت سریع فناوری جستجوگرهای مادون‌قرمز، لازم است با تکمیل و ارتقاء آزمون‌گر جستجوگرهای مادون‌قرمز و امکان‌پذیر کردن شبیه‌سازی عملیات مختلف و ترکیبی اقدامات فریب، قابلیت شبیه‌سازی کامل و جامع مطابق با شرایط واقعی را فراهم نمود، تا نتایج واقعی‌تر و کامل‌تر باشند. در نسل جدید جستجوگرهای مادون‌قرمز با توجه به توسعه فناوری جستجوگرهای مادون‌قرمز، امکان شناسایی اهداف کاذب از اهداف واقعی امکان‌پذیر است. به همین دلیل باید در جهت توسعه و ارتقاء اقدامات فریب تلاش گردد. به عنوان نمونه باید از ترکیب انواع مختلف اقدامات فریب مادون‌قرمز، برای به حداقل رساندن ردیابی اهداف واقعی استفاده کرد.

۶. مراجع

[1] Arvan, M. R. “Electronic WareFare in Infrared Missiles”; Proc. of the Electronic Ware Fare and Information Security-Tehran 2003, 89-104 (In Persian).

[2] Tavakoli, M. “Modeling of Jammer Effects on Reticle Infrared Seeker”; M.Sc. Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2013 (In Persian).

[3] Aryamanesh, S. “Target Detection in Rosette Tracking with Dual Spectrum of UV&IR”; M.Sc. Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2007 (In Persian).

[4] Yifan, H.; Bifeng, S. “Evaluation the Effectiveness of the Infrared Flare with a Tactic of Dispensing in Burst”; Proc. of Int. Symposium on Syst. and Control in Aeronautics and Astronautics, 2010, 131-136.

[5] Kim, G. “Implementation of a Reticle Seeker Missile Simulator for Jamming Effect Analysis”; Proc. of IEEE Int. Conf. on IPTA, 2010, 539-542.

[6] Han, K.; Wondong L.; Hahn J. W. “Effect of Spectral Line Broadening and Instrument Function on the Spectrum of a Mid-Infrared Flare in a Realistic Environment”; Combust. Sci. Tech. 2016, 188, 1152–1164.

[7] AlchekhYasin, S. Y.; Erfanian, A. R.; Mosavi, M. R.; Mohammadi A. “The Flare Detection in the Two Color Crossed Array Detectors Infrared Seeker”; Int. J. Comput. Appl. 2013, 8, 34-42.

[8] Maini, A.; Agrawal, V. “Test System for Comprehensive Evaluation of Infrared-Guided Missiles”; IET Optoelectron 2012, 3, 255 – 262.

[9] Missile Flight Simulation “Surface to Air Missiles: Part 1”; Military Handbook, DOD United States of America, 1995.

[10] Accetta, S.; Shumaker, D. “The Infrared and Electro-optical Systems Handbook”; Int. Society for Optical Engine SPIE, 1993.

[11] Shaban B. “Modeling of Detection Algorithm in the Dual Channel Infrared Seekers”; M.Sc. Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2007 (In Persian).

[12] Legg, M. “Spatial Resolution of Reticle Sensors”; M.Sc. Thesis, University of South Australia, 2005.

[13] Uzeler, H.; Cakir, S.; Aytaç, T. “Compressive Sensing Applications for Single Detector Rosette Scanning Infrared Seekers”; Proc. of SPIE, Electro-Optical and Infrared Syst.: Tech. and Applications XII, 2015.