

Disruption in the DSMAC Positioning System in Cruise Missiles

R. Fatemi Mofrad *, N. Jangi

Abstract

In this paper, the cruise missile's DSMAC positioning system is simulated based on correlation. Then, in order to create a disturbance and analyze the effects of each disturbance in the performance of this positioning system, items such as changing image resolution, brightness, ambient coverage, viewing angle and other random variables such as artificial changes (smoke) were used. In order to determine the area of defense operation against this system, considering the missile inertial navigation system error and the possibility of circular error (CEP), it has been proved that the DSMAC location is within a radius of three to five kilometers from the target. By analyzing the obtained results, it has been shown that the areas with more black pixels, such as forest areas, are undesirable areas for DSMAC. In addition, by using jamming in the cruise missile altimeter system, the accuracy of the missile altimeter process can be reduced so that the image positioning system is completely disrupted. Also, the larger the size and area of the total artificial changes (smoke) and the color of the changes, in proportion to the background of the image, the disruption and defense against the DSMAC system will be possible. Finally, by providing operational scenarios, the defense against the cruise missile DSMAC positioning system has been realized.

Key Words: *Passive Defense, Image Matching, DSMAC Positioning System, Cruise Missile*

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. (Fatemi@mut.ac.ir) - Writer-in-Charge

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهاردهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، پیاپی (۵۲): صص ۲۵-۳۶

علمی - پژوهشی

ایجاد اختلال در سیستم موقعیت‌یابی DSMAC در موشک‌های کروز

رضا فاطمی مفرد^{۱*}، ناصر جنگی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

چکیده

در این مقاله، سیستم موقعیت‌یابی DSMAC موشک کروز بر پایه همبستگی شبیه‌سازی شده است. سپس به منظور ایجاد اختلال و تحلیل میزان اثرات هر اختلال در عملکرد این سیستم موقعیت‌یابی، از مواردی همچون تغییر قدرت تفکیک تصاویر، روشنایی، پوشش محیطی، زاویه دید و متغیرهای تصادفی دیگر مانند تغییرات مصنوعی (دود) بهره گرفته شد. جهت مشخص شدن منطقه اجرای عملیات پدافند علیه این سیستم، با در نظر گرفتن خطای سیستم ناوبری اینرسی موشک و احتمال خطای دایره‌ای (CEP)، اثبات شده است که محل انجام DSMAC به شعاع سه تا پنج کیلومتری از هدف می‌باشد. با تحلیل نتایج به دست آمده، نشان داده شده است که نواحی با تعداد پیکسل‌های مشکی بیشتر مانند مناطق جنگلی، مناطق نامطلوب برای انجام DSMAC می‌باشد. علاوه بر این، با استفاده از جمینگ در سیستم ارتفاع‌سنج موشک کروز، می‌توان دقت فرآیند ارتفاع‌سنجی موشک را پایین آورد تا سیستم موقعیت‌یابی تصویری به کلی دچار اختلال شود. همچنین هر چه اندازه و مساحت کل تغییرات مصنوعی (دود) بزرگ‌تر باشد و رنگ تغییرات، متناسب با پس‌زمینه تصویر باشد، ایجاد اختلال و پدافند در مقابل سیستم DSMAC امکان‌پذیر خواهد بود. در نهایت، با ارایه سناریوهای عملیاتی، پدافند در برابر سیستم موقعیت‌یابی DSMAC موشک کروز تحقق بخشیده شده است.

کلیدواژه‌ها: پدافند غیرعامل، تطبیق تصویر، سیستم موقعیت‌یابی DSMAC، موشک کروز

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors

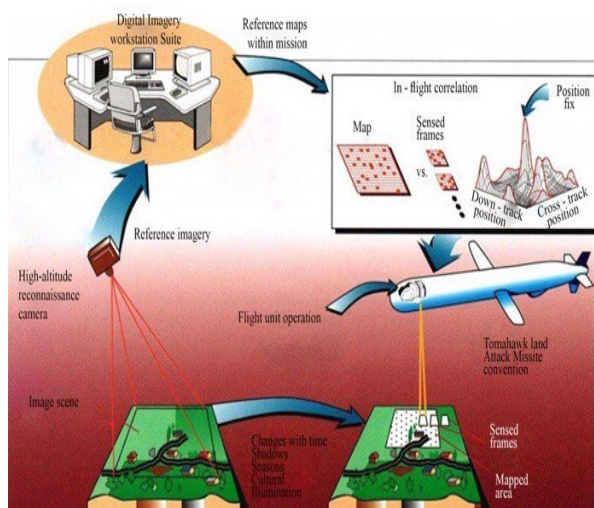


^۱ استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران - (Fatemi@mut.ac.ir) - نویسنده مسئول

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۱- مقدمه

توجه نسبت به فضای بیرون، با بهترین دقت مکانی به هدف اصابت کند [۶]. طرح کلی نحوه عملکرد سیستم موقعیت‌یابی DSMAC در شکل آورده شده است.



شکل (۱): طرح کلی نحوه عملکرد DSMAC [۶]

آقای ودات اکوتکین [۱] در رساله دکتری خود، به مطالعه سیستم‌های کنترل و هدایت موشک کروز پرداخته است. سیستم‌های اصلی و فرعی ناوبری موشک کروز، بسیار حایز اهمیت می‌باشد؛ زیرا موقعیت، سرعت، ارتفاع و مدت زمان تصمیم‌گیری موشک را مشخص می‌کند. در این مطالعه، ابتدا سیستم‌های ناوبری موشک کروز را به صورت جداگانه تحلیل و سپس الگوریتم‌های ارتباطی مدرن راداری را طراحی و پیاده‌سازی کرده است. آقایان ژیاو و لی [۷] فناوری DSMAC بر مبنای الگوریتم SURF را بر پایه ویژگی‌های متنوع در تطبیق تصویر دو بعدی، معرفی کرده‌اند. تصاویر دیجیتال ماهواره‌ای ذخیره‌شده در موشک با تصاویری که توسط موشک گرفته‌شده است تطبیق داده می‌شود تا خطای سیستم اینرسی را به حداقل برساند. با ترکیب INS/TERCOM/DSMAC احتمال موشک کروز تمام‌هاوک ۳۰ متر بوده است و امروزه با ترکیب INS/TERCOM/DSMAC به ۹ متر رسیده است. آقایان لیجوانگ و ژانرنگ [۸] به منظور تجزیه و تحلیل تاثیر جیمینگ بر موشک کروز، یک مدل از جمر رادار ردیابی با تضعیف محدود، با لحاظ کردن سطح مقطع راداری موشک کروز طراحی کرده‌اند. در بدترین شرایط که آنتن جمر مستقیماً به سمت موشک کروز باشد و همچنین با شبیه‌سازی زاویه بین آنتن رادار و آنتن گیرنده در موشک و فرکانس جمر و همچنین سطح مقطع راداری موشک، شبیه‌سازی شده است تا توانایی جیمینگ در شرایط مختلف پروازی را ارزیابی کنند. آقای لیو [۹] در ادامه تحقیقات

موشک کروز، نوعی موشک هدایت‌پذیر است که با بهره‌گیری از سیستم جلوبرندگی که معمولاً توربوفن است، می‌تواند یک پرواز ممتد را انجام دهد. موشک‌های کروز در اصل، پرنده‌های بدون سرنشین جهت حمل یک کلاهک جنگی متعارف یا غیرمتعارف در یک مسافت طولانی و با دقت عالی می‌باشند که مسیر آن تا رسیدن به هدف، قابل تغییر و هدایت است [۱]. تاماهاوک یک موشک کروز ارتفاع پایین و مادون صوت است و بیشینه سرعت آن ۸۸۰ کیلومتر بر ساعت است [۲].

چهار سیستمی که در هدایت موشک کروز کاربرد دارند عبارت‌اند از: سیستم ناوبری اینرسی (INS)^۱، سیستم تطابق عوارض زمینی در نقشه (TERCOM)^۲، سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۳، سیستم تطابق دیجیتالی تصاویر در محیط (DSMAC)^۴ [۳].

یکی از دقیق‌ترین سیستم‌های موقعیت‌یابی در موشک‌های کروز، سیستم موقعیت‌یابی تطبیق دیجیتالی تصویر است که اساس کار آن، همسان کردن تصاویر اپتیکی گرفته‌شده توسط دوربین موشک از صحنه نبرد با نقشه‌های مرجع که توسط ماهواره‌ها عکس‌برداری شده‌اند، می‌باشد [۴].

نقشه‌های DSMAC که در مرکز تصویرسازی دیجیتالی (DIWS)^۵ تهیه‌شده است؛ دقیقاً قبل از پرتاب، در موشک تاماهاوک بارگزاری می‌شود. در مرکز تصویرسازی دیجیتالی، ویژگی‌های تصاویر مرجع برجسته‌نمایی شده و خصوصیات ویژگی‌هایی که در مدل نیاز می‌باشد را اندازه‌گیری می‌کند. سپس قابلیت اطمینان این تصاویر دوره و بازبینی می‌شود و شرایطی را تنظیم می‌کند تا نقشه باینری مرجع به گسترده‌ترین استفاده دست پیدا کند [۵]. در نزدیک هدف و در یک ارتفاع مشخص، سیستم DSMAC به وسیله دوربین مرئی، یک سلسله از فریم‌های با قاب کوچک می‌گیرد. هر فریم در این سلسله، در ویژگی‌های باینری پردازش شده و روی نقشه DSMAC همبسته می‌شود تا شبیه‌ترین موقعیت را از بهترین فریم، مکان‌یابی کند. بعد از یک یا چندین به‌روزرسانی موفق، سیستم موقعیت‌یابی DSMAC که از اطلاعات سیستم تعیین موقعیت جهانی و سیستم موقعیت‌یابی تطابق عوارض زمینی نیز پیروی می‌کند، خطای سیستم ناوبری اینرسی را اصلاح می‌کند تا موشک با

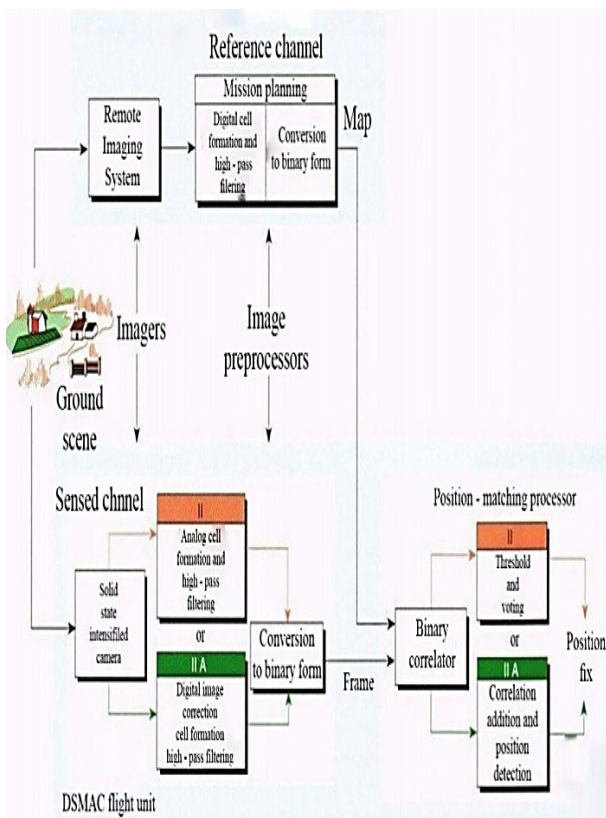
¹ Inertial Navigation Systems

² Terrain Contour Matching

³ Global Positioning System

⁴ Digital Scene Matching Area Correlation

⁵ Digital Imagery Workstation Suite



شکل (۲): واحد پردازشگر موشک‌های کروز تاماهاوک [۶]

پس از انتخاب منطقه مناسب برای DSMAC، تصاویر ماهواره‌ای موجود به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. در ابتدا تصاویر از یک فیلتر پایین‌گذر به‌منظور حذف نویز تصویربرداری عبور داده می‌شوند و برخی پردازش‌ها به‌منظور بهبود کیفیت تصویر انجام می‌شود. سپس از فیلترهای بالا‌گذر به‌منظور حذف مقدار میانگین روشنایی عبور داده می‌شود و در مرحله آخر تصاویر خاکستری به تصاویر باینری تبدیل می‌شوند. عملیات باینری شدن به دلیل کاهش حجم موردنیاز ذخیره‌سازی تصاویر، کاهش حجم محاسباتی و همچنین کاهش تأثیر تغییرات میزان روشنایی محیط انجام می‌شود [۳].

نمونه‌ای از تصویر مرجع، از وب‌سایت www.satimagingcorp.com که با ماهواره QuickBird تصویربرداری شده، در شکل نشان داده می‌شود. تصویر مرجع پس از عبور از فیلتر پایین‌گذر، بالا‌گذر و تبدیل به تصویر باینری نیز در این شکل نمایش داده شده است.

کشور چین در مورد ارزیابی کارایی موشک در حضور جمر، تحقیقاتی انجام داده است. به‌منظور بهبود تأثیر نفوذ در موشک کروز، از یک جمر ثابت استفاده کرده‌اند. جمر می‌تواند برد کشف موشک را کاهش دهد؛ بنابراین فرکانس رهگیری کاهش می‌یابد. در این مقاله، به این نتیجه رسیده است که جمینگ می‌تواند تأثیر زیادی روی موشک بگذارد و این نتایج، پارامترهای طراحی جمر را فراهم آورده است.

نکته حایز اهمیت که کاملاً مشهود است، عدم ارایه راهکارهای پدافند غیرعاملی درمقابل با سیستم موقعیت‌یابی DSMAC موشک کروز تا به امروز می‌باشد. علاوه بر این، تاکنون تخمین محل انجام DSMAC و شبیه‌سازی این سیستم موقعیت‌یابی بر اساس محاسبه همبستگی تصاویر مرجع و موشک، انجام نشده است [۱۰].

اهداف این مقاله، شامل یک زنجیره می‌باشد که برای حصول نتیجه نهایی، بررسی موشک‌فانه هر یک از حلقه‌های این زنجیره، ما را در رسیدن به بهترین سناریوی پدافندی یاری می‌کند. تحلیل رفتار موشک کروز و شناخت سیستم موقعیت‌یابی DSMAC به‌منظور پیش‌بینی اقدامات پدافندی یک نیاز اساسی است. سپس شبیه‌سازی عملکرد سیستم موقعیت‌یابی DSMAC بر اساس تطبیق دیجیتالی تصویر انجام می‌شود. از نقاط ضعف سیستم موقعیت‌یابی DSMAC برای ایجاد اختلال در تشخیص هدف موشک کروز بهره می‌بریم و در نهایت، مجموعه اقدامات پدافندی علیه سیستم موقعیت‌یابی DSMAC را ارایه می‌کنیم. بر اساس نتایج این مقاله و بسط و گسترش آن، تمامی مسیرهای محتمل موشک کروز در فاز نهایی در نزدیکی اهداف مهم و حساس و حیاتی شناسایی می‌شود تا بتوان با استقرار سامانه‌های دفاع موشکی و همچنین انجام اقدامات پدافندی در مکان‌های محتمل به‌دست آمده، موشک‌های کروز مهاجم به داخل کشور را کشف، شناسایی، ردگیری و انهدام نمود.

۲- شرح پردازشی و عملکردی سیستم DSMAC

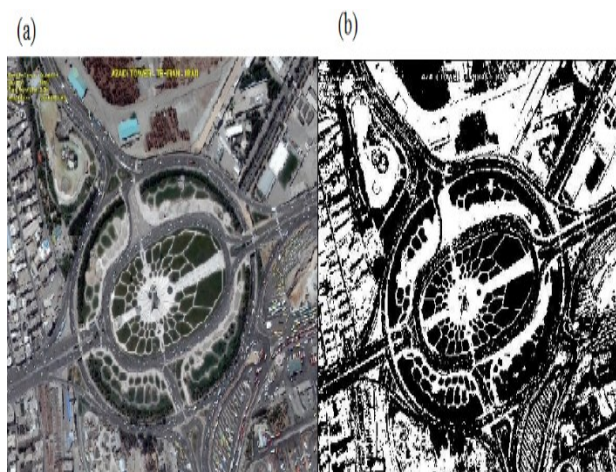
در سیستم DSMAC موشک‌های کروز به‌طور کلی دو کانال پردازشی وجود دارد؛ پردازش تصاویر مرجع و پردازش تصاویر گرفته‌شده توسط موشک که به‌صورت شماتیک در شکل آورده شده است و در ادامه به بررسی هر کدام پرداخته می‌شود.



شکل (۵): تصویر گرفته شده توسط موشک (a) تصویر خاکستری، (b) تصویر پس از تبدیل باینری [۶]

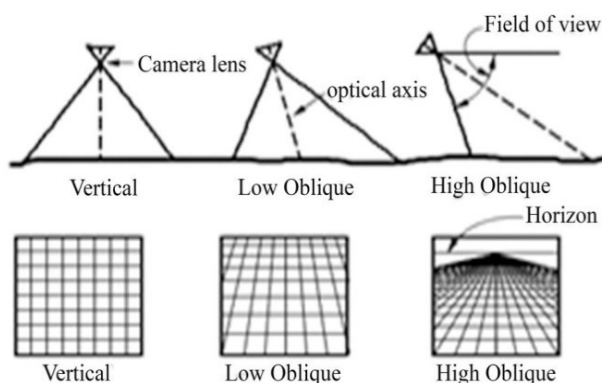
عملیات تایید موقعیت و به روزرسانی‌های موقعیت در موشک‌های کروز بلوک II و بلوک IIA متفاوت می‌باشد. عملیات در بلوک II به صورت رأی‌گیری می‌باشد؛ بدین صورت که همبستگی برای سه فریم از ویدیو متناسب با موقعیت موشک و با دانستن سرعت موشک محاسبه می‌شود. در صورتی که در دو فریم، بیشینه مقدار همبستگی از سطح آستانه بیشتر بود و بیانگر یک موقعیت یکسان بودند؛ عملیات DSMAC موفق بوده است و موقعیت یابی به منظور صفر کردن سایر خطاها با توجه به تصویری که بیشترین مقدار همبستگی را داشته است انجام می‌شود. در موشک‌های کروز بلوک IIA برای سه فریم همبستگی محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از سرعت موشک، موقعیت ماتریس همبستگی محاسبه شده در سه فریم از لحاظ مکانی یکسان شده و سپس با هم جمع می‌شوند و یک میانگین‌گیری روی آن‌ها انجام می‌شود. پس از میانگین‌گیری، به دلیل عدم همبستگی لوب‌های فرعی در هر سه فریم، سطح لوب‌های فرعی کاهش پیدا می‌کند و موقعیت اصلی، بیشینه بیشتری نسبت به مابقی مکان‌های تصویر مرجع دارا است [۱۳، ۱۴].

تصویر گرفته شده توسط موشک از تصویر ذخیره شده در داخل حافظه موشک، کوچک‌تر است. همبستگی تصویر موشک با تمام حالات ممکن تصویر مرجع محاسبه می‌شود. نحوه انجام این کار به این صورت خواهد بود که تصویر گرفته شده توسط موشک بر روی تصویر مرجع با دقت یک پیکسل، در هر دو جهت افقی^۴ و عمودی^۵ چرخانده می‌شود و میزان همبستگی در هر مرحله محاسبه می‌گردد و پس از نرمالیز شدن در یک آرایه ذخیره می‌شود [۱۵]. در شکل نمونه‌ای از نمودار همبستگی محاسبه شده بین تصویر گرفته شده توسط دوربین موشک و تصویر ذخیره شده مرجع آورده شده است. بیشینه این نمودار، نشان‌دهنده ارتباط یا وابستگی بیشتر بین دو تصویر است؛ بدین معنا که موقعیت صحیح مشخص شده توسط سیستم موقعیت‌یابی DSMAC جهت ناوبری موشک، این محل از صحنه



شکل (۳): نمونه‌ای از تصاویر مرجع DSMAC، (a) تصویر اصلی، (b) تصویر پس از عبور فیلتر پایین‌گذر، بالاگذر و تبدیل تصویر به باینری

تصاویر مرجع توسط ماهواره‌های با قابلیت تفکیک بالا، گرفته می‌شود. به دلیل اینکه تصاویر ماهواره‌ای به صورت مورب^۱ گرفته می‌شوند، با الگوریتم‌های پردازش تصویر به حالت تصویربرداری به صورت عمود^۲ انتقال پیدا می‌کنند [۱۱]. در شکل نحوه تغییر تصاویر مورب به حالت عمود را می‌توانید مشاهده کنید.



شکل (۴): تبدیل تصاویر مورب به عمودی [۱۱]

عملیات پردازش تصاویر گرفته شده توسط موشک نیز همانند پردازش تصاویر مرجع می‌باشد. تنها تفاوتی که می‌توان قایل بود، تکنیک‌های پردازش تصویری تحت عنوان کاهش لرزش تصویر^۳، جهت از بین بردن تاثیر لرزش‌های ناشی از حرکت موشک در تصویر دوربین DSMAC است [۱۲]. در شکل نمونه‌ای از تصویر گرفته شده توسط موشک و تبدیل آن به تصویر باینری آورده شده است که این تصویر بزرگ‌ترین تصویر قابل دست‌یابی در موشک‌های کروز است [۶].

⁴ Cross Track

⁵ Down Track

¹ Oblique

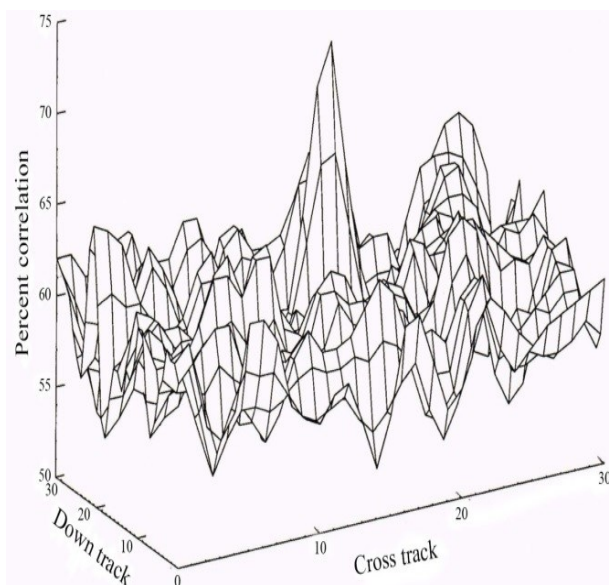
² Nadir

³ Image Shake Reduction

تصویر مرجع در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱): معیارهای مختلف میزان صحت عملکردی [۱۹]

معیارهای قابلیت اطمینان	تعریف	فرمول	احتمال
DRMS	جذر مجموع مربعات خطاهای موقعیت افقی	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	۶۵%
2DRMS	دو برابر خطاهای موقعیت افقی	$\sqrt{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$	۹۵%
CEP	شعاع دایره به مرکزیت موقعیت اصلی و شامل تخمین موقعیت با احتمال ۵۰٪	$R(0.67\sigma_y, 0.56\sigma_x)$ Accurate when $\frac{\sigma_y}{\sigma_x} > 0.3$	۵۰%
R95	شعاع دایره به مرکزیت موقعیت اصلی و شامل تخمین موقعیت با احتمال ۹۵٪	$R(0.67\sigma_y, 0.56\sigma_x)$ ($R=2.08$, when $\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 1$)	۹۵%



شکل (۶): نمودار همبستگی محاسبه‌شده در سیستم DSMAC [۱۵]

همبستگی دو بعدی تصاویر، به صورت زیر بیان می‌شود:

[۱۶]:

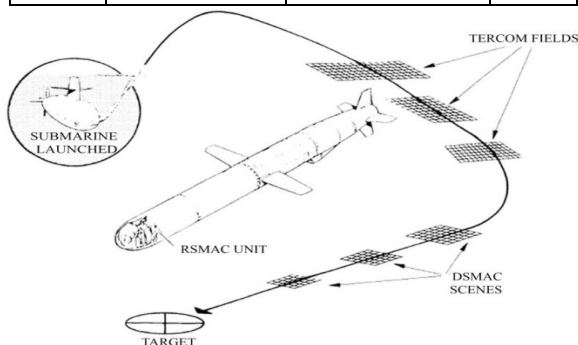
(۱)

$$R_{(u,v)} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{j+u,k+v} Y_{j,k}}{[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n X_{j+u,k+v}^2]^{1/2} [\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n Y_{j,k}^2]^{1/2}}$$

در این رابطه X ، تصویر گرفته‌شده توسط موشک در اندازه $m \times n$ و Y ، تصویر مرجع در اندازه $M \times N$ و R مقدار همبستگی بین دو تصویر است. عبارت اضافه‌شده در مخرج کسر به منظور نرمالیزه کردن مقدار همبستگی اضافه‌شده است. در بهترین حالت در صورتی که دو تصویر کاملاً بر یکدیگر منطبق باشند، مقدار همبستگی برابر ۱ خواهد بود.

در فاصله‌های نزدیک به هدف که در برنامه‌ریزی‌های قبل از پرواز مشخص شده است، یک یا چند بار فرآیند DSMAC انجام می‌شود و پس از به‌روزرسانی و اصلاح خطای سیستم ناوبری اینرسی، موشک ادامه مسیر خود را با استفاده از سیستم ناوبری اینرسی و سیستم تعیین موقعیت جهانی ادامه می‌دهد و به هدف برخورد می‌کند [۱۷].

در شکل (۷) نحوه عملیات یک نمونه موشک کروز آورده شده است. همان‌طور که گفته شد، مشاهده می‌شود که سیستم DSMAC در فاز نهایی بعد از آخرین سیستم موقعیت‌یابی تطابق عوارض زمینی و قبل از برخورد موشک به هدف انجام می‌شود.



شکل (۷): نحوه عملیات موشک کروز [۱۵]

محل انجام ناوبری توسط سیستم DSMAC، در فرآیندهای قبل پرواز مشخص می‌شود. با توجه به اطلاعات در دسترس از مشخصات سیستم ناوبری اینرسی و احتمال خطای دایره‌ای موشک و با فرض اینکه در فاز نهایی پس از DSMAC، تنها با استفاده از سیستم ناوبری اینرسی، ناوبری موشک تا برخورد به هدف انجام شود [۱۸]، می‌توان حداکثر فاصله مطلوب تا هدف را به منظور انجام DSMAC مشخص کرد. بدین منظور در ابتدا در جدول (۱) معیارهای مختلف سنجش میزان صحت، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

برای تبدیل میزان CEP به DRMS می‌توان از ضرایب حاصل‌شده در جدول (۱) استفاده کرد. با توجه به اینکه در مراجع مختلف CEP برای موشک کروز بین ۳ تا ۵ متر بیان شده است [۱۷]، برای CEP=۳:

(۲)

$$2DRMS = 2.4 \times CEP$$

$$2DRMS = 2.4 \times 3 = 7.2$$

جدول (۲): ضرایب تبدیل معیارهای مختلف صحت سنجی [۱۹]

معیارها	SEP	RMS (3D)	2DRMS	R95	RMS (H)	CEP	RMS (Ver)
RMS (Ver)	۰/۸۸	۱/۱	۱/۱	۰/۹۱	۰/۵۳	۰/۴۴	۱
CEP	۲	۲/۵	۲/۴	۲/۱	۱/۲	۱	
RMS (H)	۱/۷	۲/۱	۲	۱/۷	۱		
R95	۰/۹۶	۱/۲	۱/۲	۱			
2DRMS	۰/۸۵	۱/۱	۱				
RMS (3D)	۰/۷۹	۱					

و میزان DRMS برابر
 حداکثر شعاع دایره (مرکز دایره هدف می باشد) برای انجام
 عملیات DSMAC برابر است با:

(۶)

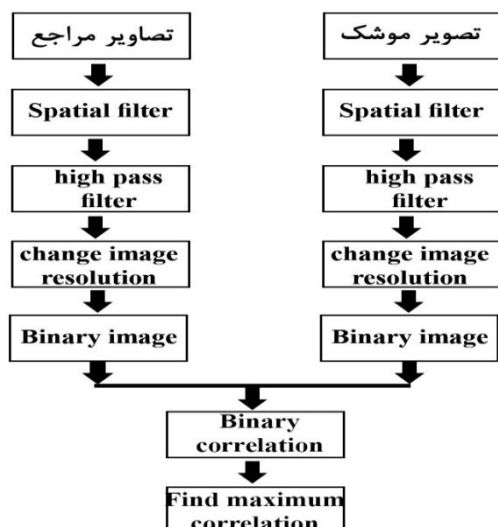
$$CEP = 3 \Rightarrow DRMS = 3.6 \Rightarrow t = 11.68s \Rightarrow R_{max} = 2855m$$

$$CEP = 5 \Rightarrow DRMS = 6 \Rightarrow t = 19.48s \Rightarrow R_{max} = 4760m$$

به منظور انجام DSMAC با فرض $CEP = 3$ مشاهده شد که
 حداکثر در شعاع $2/855$ متر و با فرض $CEP = 5$ در حداکثر
 شعاع 4760 متری قبل از هدف باید فرآیند DSMAC انجام شود.

۲-۱- شبیه سازی سیستم DSMAC

شبیه سازی سیستم DSMAC براساس منابع موثق، با نرم
 افزار MATLAB طراحی و آرایه شده است [۶] تا محدودیت های
 سیستم DSMAC را بر روی یک نمونه واقعی اعمال کنیم. طبق
 شکل بلوک دیاگرام پردازش تصاویر سیستم DSMAC، در شکل
 ترسیم شده است.



شکل (۸): بلوک دیاگرام پردازش تصویر سیستم DSMAC

$$DRMS = \frac{1}{2} 2DRMS$$

$$DRMS = \frac{1}{2} 7.2 = 3.6$$

است و به همین ترتیب برای $CEP = 5$ مقدار DRMS برابر

(۴)

$$2DRMS = 2.4 \times CEP$$

$$2DRMS = 2.4 \times 5 = 12$$

$$DRMS = \frac{1}{2} \times 12 = 6$$

با توجه به خطای سیستم ناوبری اینرسی ذکر شده برای
 موشک کروزر تاماهاوک بلوک ۴ که برابر $0.6 \frac{nmile}{h}$ است
 [۲۰] و تقریب این خطا با DRMS، داریم: (هر ناتی کال مایل برابر
 ۱۸۵۲ متر فرض شده است)

(۵)

$$DRMS = 0.6 \frac{nmile}{h} \Rightarrow 0.308 \frac{m}{s}$$

با فرض $DRMS = 3/6m$ در موشک باید خطای سیستم

ناوبری اینرسی حداکثر در $t = \frac{3.6}{0.308} = 11.68s$ قبل از

برخورد به هدف توسط DSMAC صفر شود و با فرض $6m$

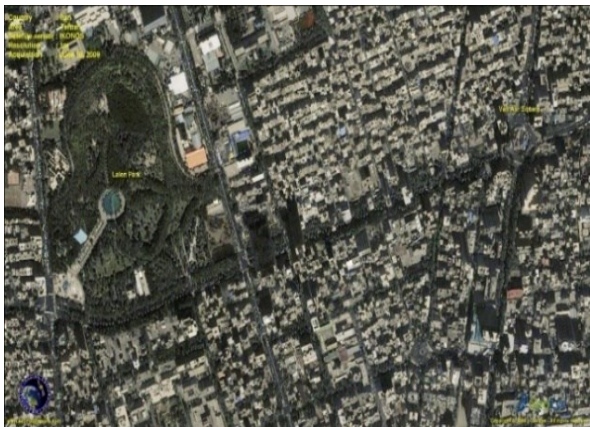
$DRMS =$ خطای سیستم ناوبری اینرسی باید در
 $t = \frac{6}{0.308} = 19.48s$ توسط DSMAC صفر شود. اگر در مدت

زمانی بیشتر از این مقدار قبل از هدف، عملیات DSMAC انجام
 شود؛ دیگر به دقت مطلوب نمی توان دست یافت و همچنین فرض
 شده است که فرآیند DSAMC بدون هیچ خطایی انجام شده
 است.

با در نظر گرفتن سرعت 880 کیلومتر بر ساعت برای موشک،

عملیات در فرمول (۱) بیان شد. در مرحله آخر، بیشینه مقدار ماتریس همبستگی محاسبه شده به عنوان موقعیت صحیح موشک انتخاب شده و موقعیت موشک بر اساس آن تخمین زده می‌شود.

نحوه شبیه‌سازی بدین صورت است که در ابتدا یک تصویر مرجع از وبسایت www.satimagingcorp.com که توسط ماهواره IKONOS تصویربرداری شده است انتخاب می‌شود. به طور مثال، یکی از تصاویر مرجع انتخاب شده در شکل (۹) آورده شده است که مربوط به منطقه میدان ولی عصر و پارک لاله تهران است.



شکل (۹): تصویر مرجع، تهران، محدوده میدان ولی عصر - پارک لاله

در مرحله بعد، تصویر مرجع از فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر با ابعاد 3×3 عبور داده شده است. فیلتر پایین‌گذر یک فیلتر میانگین‌گیر با پاسخ ضربه:

$$w_{av} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

و فیلتر بالاگذر فیلتر گوسی با واریانس ۱ و تابع تبدیل:

$$w_h = \begin{bmatrix} 0.9249 & 0.8762 & 0.9249 \\ 0.8762 & 0.7958 & 0.8762 \\ 0.9249 & 0.8762 & 0.9249 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در نظر گرفته شده است. در شکل تصویر پس از تبدیل به تصویر خاکستری (سیاه‌وسفید) و در شکل (۱۱) تصویر پس از پردازش و عبور از فیلترها آورده شده است. بعد از اعمال پردازش‌ها، عملیات باینری کردن تصویر انجام می‌شود. در شکل تصویر باینری نمایش داده شده است.

فیلترهای spatial averaging در خانواده فیلترهای پایین‌گذر قرار می‌گیرند و به فیلترهای میانگین‌گیر نیز معروف می‌باشند. تابع تبدیل این فیلترها در ابعاد مختلف وجود دارد. در بیشتر موارد از این نوع فیلترها به منظور از بین بردن تغییرات ناگهانی و نویزهای ضربه به وجود آمده در تصاویر، استفاده می‌شود [۲۱]. از فیلترهای بالاگذر به منظور حذف روشنایی‌های محلی (ناحیه‌ای) استفاده شده است. معمولاً برای ساخت فیلترهای بالاگذر در ابتدا فیلترهای پایین‌گذر را ساخته و سپس با یک عملیات ساده ریاضی طبق رابطه زیر تابع تبدیل فیلتر بالاگذر به دست می‌آید:

(۷)

$$H_h = 1 - H_L$$

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از فیلتر پایین‌گذر گوسی استفاده شده است. تابع تبدیل فیلتر گوسی، فیلتر پایین‌گذر و خطی می‌باشد که برای کاهش نویز در تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد و رابطه این فیلتر به صورت زیر است [۲۲].

(۸)

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

قسمت بعدی به منظور تغییر قدرت تفکیک تصاویر، به شبیه‌سازی اضافه شده است تا بتوان عدم یکسانی قدرت تفکیک تصاویر مرجع و موشک را مدل کرد. همچنین میزان صحت خروجی و دقت DSMAC را در تصاویری با قدرت تفکیک‌های متفاوت، بررسی کرد.

در بخش بعدی، تصاویر سیاه‌وسفید چند سطحی به تصاویر سیاه‌وسفید دوسطحی (باینری) تبدیل می‌شود. استفاده از الگوریتم‌هایی که با استفاده از هیستوگرام تصویر، پس‌زمینه را از هدف جدا می‌کند در این شبیه‌سازی کاربردی ندارد؛ زیرا در این پردازش به دنبال جداسازی هدف خاصی از پس‌زمینه نیستیم [۲۳]. روش انجام کار به این صورت خواهد بود که یک مقدار سطح آستانه انتخاب می‌شود و سپس میزان روشنایی هر پیکسل تصویر با آن سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار آن بزرگ‌تر از سطح آستانه بود به آن پیکسل عدد ۱ اختصاص داده می‌شود و در غیر این صورت عدد صفر و بدین صورت تصویر باینری تولید می‌شود. در شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور انتخاب سطح آستانه از الگوریتم اوتسا استفاده شده است؛ که الگوریتم رایجی در کاربردهای پردازش تصویر به منظور باینری کردن تصاویر می‌باشد [۲۴].

محاسبه همبستگی بین تصویر مرجع و تصویر گرفته شده توسط موشک، در این قسمت انجام می‌شود. نحوه محاسبه این



شکل (۱۳): برش تصویر موشک از تصویر اصلی



شکل (۱۰): تبدیل تصویر مرجع به تصویر سیاه و سفید

در شکل (۱۳) تصویر گرفته شده توسط موشک که در کادر آبی قرار دارد، تصویر پس از پردازش و تصویر باینری شده، آورده شده است.



شکل (۱۴): تصویر گرفته شده توسط موشک، تصویر پس از پردازش تصویر، تصویر باینری شده (به ترتیب از چپ به راست)

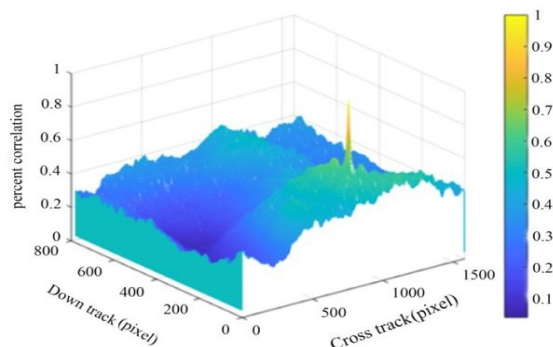


شکل (۱۱): تصویر سیاه و سفید پس از عبور فیلتر میانگین گیر و فیلتر بالاگذر

پس از انجام فرآیند پردازش تصویر بر روی تصاویر مرجع و تصاویر گرفته شده توسط موشک، فرآیند محاسبه همبستگی بین تصویر مرجع و تصویر موشک انجام می شود. در شکل (۱۵) ماتریس همبستگی نرمالیزه شده محاسبه و ترسیم شده است. مشاهده می شود که در یک نقطه دارای بیشینه است که بیان کننده نقطه ای است که بیشترین شباهت را به تصویر موشک دارد. در شکل (۱۶) سه منطقه انتخاب شده بر اساس بیشترین میزان همبستگی و میزان خطای ایجاد شده آورده شده است. نحوه انتخاب بدین صورت خواهد بود که بیشینه مقدار همبستگی به عنوان منطقه تطبیق یافته، انتخاب شده می شود.

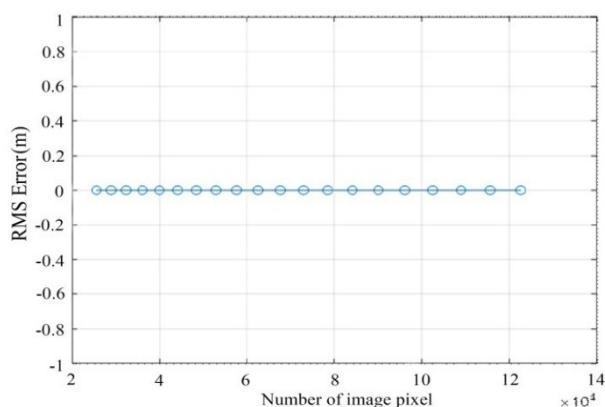


شکل (۱۲): تبدیل تصویر خاکستری چند سطحی به تصویر دوسطحی (باینری)



شکل (۱۵): ماتریس همبستگی نرمالیزه شده، همبستگی بین تصویر موشک و تصویر مرجع

در مرحله بعد، یک قسمت از تصویر مرجع به عنوان تصویر موشک برش داده می شود و در کانال پردازش تصویر موشک قرار می گیرد. در شکل پنجره انتخاب شده به عنوان تصویر گرفته شده توسط موشک مشخص شده است. در قسمت بالایی عکس، موقعیت تصویر موشک در تصویر مرجع و اندازه آن قابل مشاهده است. اندازه تصویر موشک 316×316 در نظر گرفته شده است که تقریباً برابر بزرگترین اندازه قابل دسترس برای موشک های کروز است [۴].



شکل (۱۷): بررسی تغییر اندازه تصویر موشک در فرآیند DSMAC

۲-۳- شبیه‌سازی با قدرت تفکیک‌های متفاوت بین

تصویر مرجع و تصویر موشک

در این قسمت از شبیه‌سازی‌ها، تأثیر خطای استخراج ارتفاع در فرآیند DSMAC مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. ارتفاع موشک در قدرت تفکیک تصویر گرفته‌شده توسط موشک تأثیرگذار است. به منظور دستیابی به دقت بالا، قدرت تفکیک مکانی پیکسل‌های تصاویر باید کم باشند. به طور مثال فرض کنید یک پیکسل دچار خطا شود؛ در صورتی که قدرت تفکیک پیکسل بزرگ باشد نسبت به حالتی که قدرت تفکیک پیکسل کوچک باشد، خطا بیشتر می‌شود. به دلیل نیاز به تصاویر با قدرت تفکیک بالا، باید فرآیند DSMAC و عملیات تصویربرداری در ارتفاع‌های پایین و به صورت عمودی گرفته شود. نکته دیگر، برابری قدرت تفکیک مکانی تصویر گرفته‌شده توسط موشک با تصویر ذخیره‌شده مرجع است تا به دقت مطلوب بتوان دست‌یافت. بدین منظور دو رویکرد زیر وجود دارد:

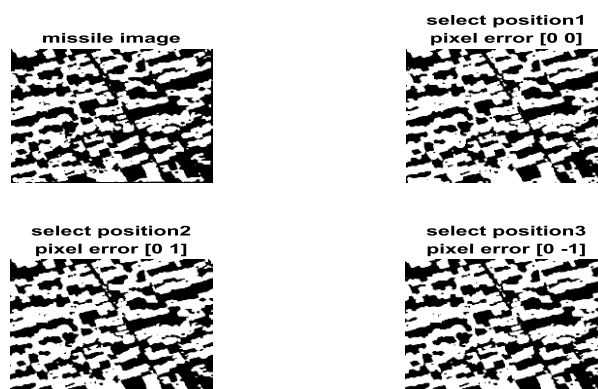
(۱) با توجه به ارتفاع استخراج‌شده توسط رادار ارتفاع‌سنج، فاصله

کانونی عدسی توسط یک سروو تنظیم می‌شود و در نتیجه قدرت تفکیک مکانی دو تصویر برابر می‌شود.

(۲) با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر با دانستن ارتفاع از

سایر حسگرها، قدرت تفکیک مکانی دو تصویر برابر شوند.

به طور مثال فرض کنید زاویه دید^۱ دوربین موشک برابر ۷۰ درجه است و با فرض ارتفاع ۲۰۰ متر برای موشک با توجه به شکل (۱۸): سطح تصویربرداری شده توسط موشک از سطح زمین، با فرض برابر بودن ابعاد تصویر در طول و عرض، برابر ۷۸۴۰۰ مترمربع خواهد بود.



شکل (۱۶): ناحیه انتخاب‌شده به منظور به‌روزرسانی موقعیت موشک

۲-۲- محدودیت‌ها

به دلیل وابسته بودن فرآیند DSMAC به شرایط محیطی و ساختار محیط، در مواردی همچون موارد زیر با کاهش کارایی و یا عدم توان عملیات مواجه می‌شوند:

- جنگل با تراکم بالا
- پوشیده شدن سطح زمین با برف
- شرایط نامناسب آب و هوایی
- وجود دود در تصاویر
- یکسان نبودن قدرت تفکیک تصاویر مرجع و موشک
- تفاوت در ساعت تصویربرداری و تأثیر سایه‌ها
- کم‌عرضه بودن تصاویر مانند تصاویر سطح آب، کویر و ...
- اختلاف در جهت تصویربرداری و عدم تشخیص میزان چرخش‌های Pitch و Yaw موشک

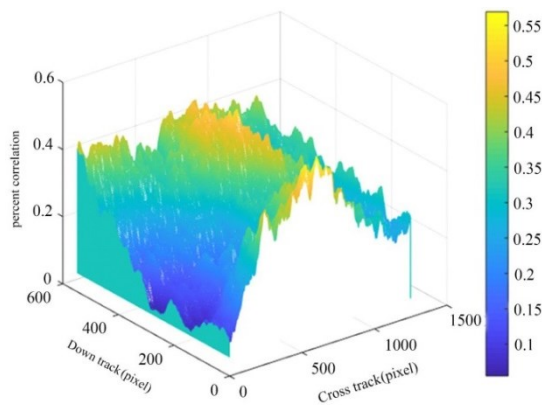
۳- نتایج و بحث

در این بخش، محدودیت‌های مفروض بر روی شبیه‌سازی سیستم موقعیت‌یابی DSMAC اعمال شده و نتایج آن در قالب نمودارهای RMSE نشان داده شده است.

۳-۱- بررسی تعداد پیکسل‌های تصویر موشک

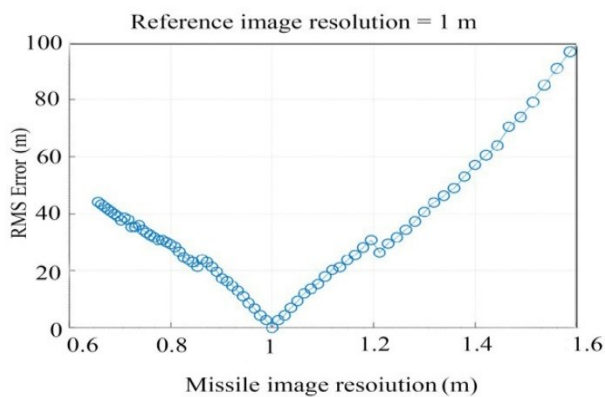
به‌منظور بررسی تأثیر اندازه تصویر موشک در فرآیند DSMAC، اندازه مربع تصویر موشک از چهار طرف افزایش داده شده است (با ثابت فرض کردن مرکز مربع) و در هر مرحله میزان همبستگی و خطای RMS محاسبه شده است. شکل (۱۷)

^۱ Field of view



شکل (۱۹): ماتریس همبستگی نرمالیزه شده بین تصویر موشک و تصویر مرجع

در این شبیه‌سازی، قدرت تفکیک تصویر مرجع ۱ متر فرض شده و میزان RMSE به ازای مقادیر مختلف قدرت تفکیک تصویر موشک، محاسبه و در شکل (۲۰) ترسیم شده است. براساس نمودار، هرچه میزان اختلاف قدرت تفکیک تصویر موشک و تصویر مرجع بیشتر شود، میزان خطای RMS به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ به طوری که با اختلاف قدرت تفکیک حدود ۱۰ سانتی متر، خطای بسیار زیادی در حدود ۲۰ متر در محاسبات موشک ایجاد می‌گردد. به وضوح مشخص است که با تفاوت قدرت تفکیک تصاویر موشک و مرجع، خطای بسیار زیادی در موقعیت‌یابی موشک بروز ایجاد می‌شود.



شکل (۲۰): میزان خطای RMS در صورت عدم برابری قدرت تفکیک تصاویر

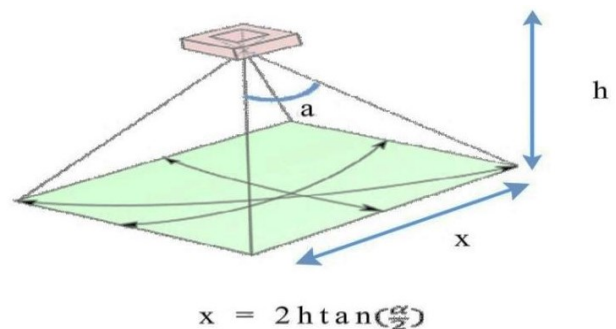
۳-۳- شبیه‌سازی با فرض عدم انطباق زاویه تصویربرداری بین موشک و تصویر مرجع

به بررسی میزان خطای به وجود آمده در صورت یکی نبودن زاویه تصاویر موشک و مرجع پرداخته شده است. این خطا را می‌توان با ایجاد اختلال در سیستم موقعیت‌یابی تطابق عوارض زمینی یا سیستم تعیین موقعیت جهانی، با استفاده از جمنینگ ایجاد کرد تا موشک در محاسبه سمت ورود به صحنه DSMAC

(۱۱)

$$x = 2h \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Big|_{\substack{\alpha=70^\circ \\ h=200m}} = 280m$$

$$A = 280 \times 280 = 78400$$



شکل (۱۸): محاسبه میزان مساحت تصویربرداری شده توسط موشک [۱۶]

با توجه به مساحت استخراج شده توسط تصویر و فرض قدرت تفکیک ۱ متر، تعداد پیکسل تصویر برابر است با:

$$N = \frac{78400}{1 \times 1} = 78400$$

مقدار N با مقدار بیان شده برای اندازه تصویر موشک که می‌تواند بین ۵۰ هزار تا ۱۰۰ هزار باشد، هم‌خوانی دارد. حال فرض کنید با ثابت بودن تعداد پیکسل‌های ساختار دوربین که برابر ۷۸۴۰۰ است، ارتفاع موشک به ۱۵۴ متر تغییر کند. در نتیجه سطحی که تصویربرداری شده برابر

$$x = 2h \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Big|_{\substack{\alpha=70^\circ \\ h=154m}} = 215m$$

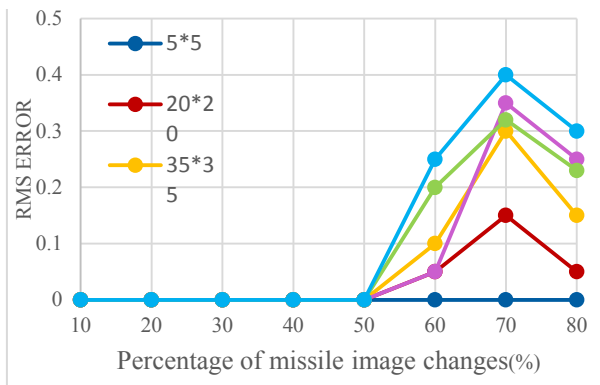
$$A = 215 \times 215 = 46225$$

خواهد بود و قدرت تفکیک هر پیکسل برابر می‌شود.

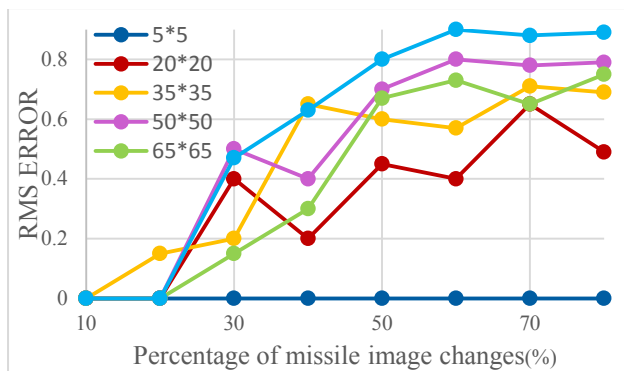
(۱۴)

$$R = \sqrt{\frac{A}{\text{Number pixel}}} = \sqrt{\frac{46255}{78400}} = 0.76 \text{ m}$$

با فرض تغییر قدرت تفکیک تصویر موشک از ۱ m به ۰/۷۶ شبیه‌سازی انجام گرفته و مشاهده شده است که با تغییر قدرت تفکیک، شکل ماتریس کوواریانس به شدت تغییر کرده و دارای بیشینه‌های نسبی زیادی با اندازه‌های نسبتاً برابر می‌باشد. این نمودار ماتریس همبستگی، نشان می‌دهد که سیستم موقعیت‌یابی DSMAC نتوانسته است هیچ موقعیت صحیحی را برای ناوبری موشک مشخص کند. (شکل ۱۹)



شکل (۲۳): میزان خطای RMS برحسب اندازه و میزان تغییرات مصنوعی انجام‌شده با رنگ مشکی



شکل (۲۴): میزان خطای RMS برحسب اندازه و میزان تغییرات مصنوعی انجام‌شده با رنگ زرد

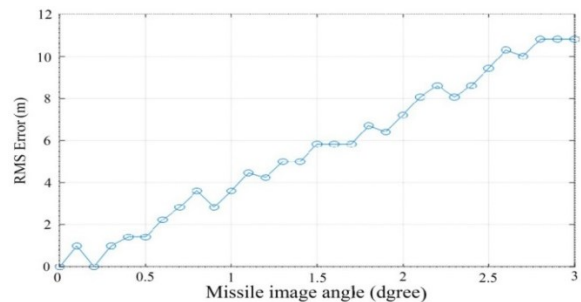
شبیه‌سازی‌ها در بخش تغییرات مصنوعی، نشان می‌دهد که:

- به هر اندازه مساحت کل تغییرات مصنوعی که میزان گسترش دود در صحنه می‌باشد بیشتر باشد، احتمال تطبیق تصویر در سیستم DSMAC پایین‌تر می‌آید.
- هر چه اندازه تغییرات مصنوعی ایجاد شده در تصویر موشک بزرگ‌تر باشد، (تعداد دستگاه‌های دودزا در منطقه بیشتر باشد) امکان ایجاد خطا در فرآیند موقعیت‌یابی DSMAC افزایش پیدا می‌کند و توانایی ما در پدافند بیشتر است.
- هر چه رنگ تغییرات مصنوعی ایجاد شده با رنگ پس‌زمینه صحنه، همخوانی بیشتری داشته باشد؛ اخلاص در فرآیند سیستم DSMAC و موفقیت پدافند غیرعامل در برابر موشک افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیستم موقعیت‌یابی DSMAC شبیه‌سازی شد و روش‌های مختلف اخلاص در این سیستم، ارزیابی گردید. در نهایت، پرواضح است که عدم برابری قدرت تفکیک تصاویر مرجع

و میزان چرخش‌های Pitch و Yaw موشک دچار خطا شود. در شبیه‌سازی‌ها، در ابتدا تصویر مرجع به اندازه دلخواه چرخانده شده است و سپس قسمتی از تصویر چرخانده شده به‌عنوان تصویر موشک انتخاب شده و ماتریس همبستگی با تصویر مرجع اصلی بدون چرخش محاسبه می‌شود. (شکل (۲۱))

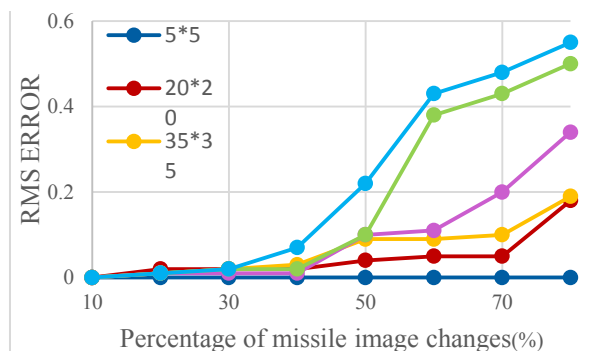


شکل (۲۱): میزان خطای RMS در صورت عدم برابری زاویه تصاویر

۳-۴- شبیه‌سازی با ایجاد تغییرات مصنوعی (دود) در تصاویر

به‌منظور بررسی میزان اثر ایجاد دود در منطقه نبرد، شبیه‌سازی با تغییرات مصنوعی در تصویر و مشاهده تأثیر آن و میزان مقاومت DSMAC در برابر آن، انجام گرفته که در ادامه آورده شده است. شبیه‌سازی‌ها با توجه به سه مورد زیر انجام گرفته است:

- ۱) میزان مساحتی که از تصویر موشک، تمایل به ایجاد تغییرات مصنوعی در آن داریم را مشخص کنیم. می‌توان مشخص کرد از ۱۰ درصد یا ۸۰ درصد از ناحیه انتخاب شده برای موشک دارای تغییرات مصنوعی باشد.
- ۲) رنگ انتخاب شده برای تغییرات مصنوعی را در بازه RGB، می‌توان تغییر داد.
- ۳) در شبیه‌سازی انجام شده، تغییرات مصنوعی به‌صورت مربع در نظر گرفته شده‌اند که توسط کاربر، ابعاد آن در اندازه‌های ۵*۵ تا ۸۰*۸۰ قابل تغییر است.



شکل (۲۲): میزان خطای RMS برحسب اندازه و میزان تغییرات مصنوعی انجام‌شده با رنگ سفید

- Technical Digest, 15, 3, pp. 250–264, 1994.
- [7] Y. Qiao, X. Xie, L. Shi, and D. Li, "The Application of Spatial Scene Matching Based on Surf in Cruise Missile Terminal Guidance," *IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 3, pp. 790-793, 2010.
- [8] W. Li-guang and J. Zhan-rong, "Analysis and Simulation for Performance of Jammer Fixed in Cruise Missile," *Journal of System Simulation*, 3, pp. 39–45, 2008.
- [9] J. Liu, W. Jiang, and T. Liu, "Penetration Efficiency Evaluation of Missile with Jammer," *Applied Mechanics and Materials*, 719, pp. 369-375, 2015.
- [10] D. M. Gormley, "Missile Defence Myopia: Lessons from the Iraq War," *Survival*, 45, pp. 61–86, 2003.
- [11] J. C. Otto, G. Prasicsek, and J. Blothe, and L. Schrott, "GIS Applications in Geomorphology," In *Comprehensive Geographic Information Systems*: Elsevier, pp. 81–111, 2018.
- [12] Y. Sheikh, S. Khan, and M. J. Shah, "Feature-based Georegistration of Aerial Images," vol. 4, 2004.
- [13] K. D. Shere and J. W. Wingate, "Allocation of Resources to Offensive Strategic Weapon Systems," *Naval Research Logistics Quarterly*, 23, pp. 85–93, 1976.
- [14] C. Wiseman, "Information Systems as Competitive Weapons," *Dow Jones-Irwin Homewood*. IL, 1985.
- [15] J. R. Carr and J. S. Sobek, "Digital Scene Matching Area Correlator (DSMAC)," In *Image Processing For Missile Guidance*, 238, pp. 36–41, 1980.
- [16] K. Wu, Q. Du, Y. Wang, and Y. Yang, "Supervised Sub-Pixel Mapping for Change Detection from Remotely Sensed Images with Different Resolutions," *MDPI remote sensing*, 9, pp. 284–291, 2017.
- [17] V. Ekutekin, "Navigation and Control Studies on Cruise Missiles," Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, 2007.
- [18] K. Kou, B. Li, and D. Tang, "An INS Error Estimation Method based on Passive Observation to Single Feature Target for Cruise Missile," *Navigation and Control Conference*, pp. 2488–2493, 2014.
- [19] P. L. Nova, "GPS Position Accuracy Measures," *Positioning Leadership*, pp. 1–6, 2003.
- [20] C. Kopp, "The Strategic Cruise Missile," *Air Power Australia*, Part1, pp. 58–62, 2005.
- [21] A. M. Sazdar, J. Mazloum, S. M. Shokrolahi, and S. Sharbati, "Improvement of Buildings Detection Based on Adaptive Thresholding in Satellite Images," *Adv. Defence Sci. & Tech*, 2, pp. 242–297, 2018. (In Persian)
- [22] B-N. Vo and W-K. Ma, "The Gaussian Mixture Probability Hypothesis Density Filter," *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54, pp. 4091–4104, 2006.
- [23] I. Sharifi and M. Ghasemzadeh, "Design and Evaluation of an Expert System based on Histogram Shape for Image Thresholding," in *2015 9th International Conference on E-Commerce in Developing Countries: With focus on E-Business (ECDC)*, pp. 1–5, 2015.
- [24] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, pp. 62–66, 1979.

و موشک، بیشترین کارایی را در اخلاخل در سیستم موقعیت‌یابی DSMAC دارد. سپس ایجاد تغییرات مصنوعی (دود) با رعایت رنگ پس‌زمینه و میزان گسترش بیش از پنجاه درصد، نقش بسزایی در از کار انداختن این سیستم ایفا می‌کند.

نوآوری ما در این مقاله، ارائه راهکارهای پدافندی در مقابله با موشک‌های کروز، بر مبنای ایجاد اخلاخل در سیستم موقعیت‌یابی DSMAC است. ابتدا پیشنهاد می‌شود مراکز حساس و حیاتی در مناطق پرتراکم جنگلی که عوارض تکراری زیادی وجود دارد و یا در مناطق کویری که بدون عارضه است احداث شود. تحلیل مسیریابی موشک کروز در فاز میانی و شناسایی اطلاعاتی، نکته دیگری است که سمت ورود موشک را به صحنه انجام DSMAC مشخص می‌کند و پیش‌نیاز دفاع در برابر موشک‌های کروز در فاز پایانی (مقابله با سیستم DSMAC) می‌باشد.

با توجه به سمت ورود موشک به صحنه نبرد، در شعاع ۳ تا ۵ کیلومتری از هدف، از جمرهای ارتفاع‌سنج موشک کروز استفاده می‌شود تا موشک در فرآیند ارتفاع‌سنجی، دچار خطا شود. در نتیجه سیستم DSMAC قادر به یکسان کردن قدرت تفکیک تصاویر مرجع و موشک نیست و عملاً سیستم DSMAC از مدار خارج می‌شود تا خطای موشک در فاز نهایی به بالای ۳۰ متر برسد. همچنین در این مناطق محتمل ورود موشک، با نصب سامانه های لیزری، اقدام به از بین بردن دیافراگم دوربین سیستم DSMAC نماییم. راهکار پدافندی دیگر، استفاده از دستگاه‌های دودزا که رنگ متناسب با رنگ غالب پس‌زمینه تولید می‌کند، است. در ایده‌آل‌ترین شرایط، نیاز است تا حداقل ۵۰ درصد از مساحتی بالغ بر ۴ کیلومترمربع را با دود بپوشانیم تا با قابلیت اطمینان بالایی موشک کروز را از مسیرش خارج کنیم.

۵- مراجع

- [1] K. Kou, B. Li, and D. Tang, "An INS Error Estimation Method Based on Passive Observation to Single Feature Target for Cruise Missile," *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, pp. 2488-2493, 2014.
- [2] D. M. Gormley, "Dealing With The Threat of Cruise Missiles," *Routledge*, 2013.
- [3] B. Kuchta, "Technology Advances in Cruise Missiles," *Annual Meeting and Technical Display*, vol. 16, p. 937, 1981.
- [4] J. Waldemark, M. Millberg, T. Lindblad, and K. Waldemark, "Image Analysis for Airborne Reconnaissance and Missile Applications," *Pattern Recognition Letters*, vol. 21, pp. 239–251, 2000.
- [5] G. Zhang, L. Shen, and W. Chang, "Acquisition Probability Estimation Model based on Discrete Fractional Brownian Random Field," In *Location Services and Navigation Technologies*, vol. 5084, pp. 109–116, 2003.
- [6] G. B. Irani and J. P. Christ, "Image Processing for Tomahawk Scene Matching," *Johns Hopkins APL*