Defensive Researches and Management

Analysis and Evaluation of Technology Development Trends in Counter-Small Drone (Micro-UAV) Systems

Hojat Taei [1] | Farhad Kiani Falavarjani[2]

1. Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Email: h.taei@eng.ui.ac.ir
2. PhD student in Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr Mechanical University Complex, Isfahan, Iran.

Volume info

Vol. 24
Series: 110
Autumn 2025
P.P: 11-37

Article Type

Research Paper

Article History

Received:
2024-10-26
Revised:
2026-02-10
Accepted:
2025-05-04
Published:
2026-03-21

ISSN – E-ISSN

ISSN: 2008-6121
E-ISSN: 2645-5218

Abstract

Counter-drone operations can be considered an advanced technology aimed at detecting and/or creating obstacles to prevent the operations of unmanned aerial vehicles. Co-word analysis is a content analysis method that evaluates the target category based on the frequency of keyword occurrences within documents. This study is applied, data-mining, and scientometric in nature, employing scientific database analysis techniques. Data and keywords related to the research were searched and evaluated from 2013 to 2023 using the Web of Science database. The VOSviewer software was used to analyze the data and visualize the obtained information. The research population consisted of 253 articles on technologies related to counter-drone systems. The analyses included publication frequency by year, countries with the highest number of publications, and the creation of technology maps as well as maps of emerging technologies in this field. The results indicate that the main technologies include artificial intelligence and machine learning, the Internet of Things, deep learning algorithms, object detection algorithms, and machine vision algorithms. The frequency and trend of scientific publication in the field of counter-drone systems have shown a sharply upward trajectory, with China, the United States, and Germany conducting the most research and providing significant support in this technological field.

Keywords: Technology, Drone, Counter-Drone System, Micro UAV, Co-word Analysis.

Cite this Article: Taei, H., Kiani Falavarjani, F. (2025). Analysis and Evaluation of Technology Development Trends in Counter-Small Drone (Micro-UAV) Systems. Scientific Journal of Defensive Researches and Management, 24(110), 11-37.
doi : 10.47176/mdr.2025.1361

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

تحلیل و ارزیابی روند توسعه فناوری در سیستم‌های مقابله با پهپادی کوچک (ریزپرنده)

حجت طایی[1] | فرهاد کیانی فلاورجانی [2]

۱. نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی هوافضا دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان ، اصفهان، ایران.

Email: h.taei@eng.ui.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی مالک اشتر مجتمع دانشگاهی میکانیک شاهین شهر، اصفهان، ایران.

چکیده

عملیات‌های ضد پهپاد را می‌توان به عنوان یک فناوری پیشرفته دانست که هدف آن شناسایی و/یا ایجاد مانعی برای جلوگیری از انجام عملیات هواپیماهای بدون‌سرنشین است. تحلیل هم‌واژگانی یک روش تحلیل محتوایی است که به ارزیابی مقوله مورد نظر براساس دفعات تکرار واژگان کلیدی اسناد می‌پردازد. پژوهش حاضر از نوع کاربردی، داده کاوی و علم‌سنجی است و در انجام آن از تکنیک‌های تحلیل پایگاه‌های داده علمی استفاده شده است. داده‌ها و کلیدواژه‌های مرتبط با پژوهش در فاصله بین سال‌های ۲۰۱۳تا۲۰۲۳ با استفاده از پایگاه اطلاعاتی وب‌آف‌ساینس جستجو و ارزیابی شدند. برای تحلیل داده‌ها و مصورسازی اطلاعات به دست آمده، از نرم‌افزار وس‌ویور استفاده شده است. جامعه آماری پژوهش ۲۵۳ مقاله در زمینه فناوری مرتبط و درگیر با سامانه ضد پهپادی بوده است. تحلیل‌ها شامل، میزان فراوانی انتشار بر حسب سال، کشورهای بیشترین اسناد منتشر کننده، و تهیه نقشه فناوری‌ها و نقشه فناوری‌های نوظهور در این حوزه بوده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد فناوری‌های اصلی شامل هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، اینترنت اشیا، الگوریتمهای یادگیری عمیق، الگوریتمهای تشخیص اشیا، و الگوریتم‌های بینایی ماشین بوده است. فراوانی و روند انتشار اسناد علمی در حوزه سامانه صد پهپاد به شدت سیر صعودی دارد، کشور چین و ایالات متحده و آلمان بیشترین پژوهش‌ها و حمایت‌ها را در این حوزه فناوری انجام داده‌اند.

کلیدواژه‌ها: فناوری، پهپاد، سامانه ضد پهپاد، ریز پرنده، تحلیل واژگان.

استناد: طایی، حجت، و کیانی فلاورجانی ، فرهاد. (۱۴۰۴). تحلیل و ارزیابی روند توسعه فناوری در سیستم‌های مقابله با پهپادی کوچک (ریزپرنده). فصلنامه مدیریت و پژوهش های دفاعی، ۲۴(۱۱۰)، ۱۱-۳۷.

doi : 10.47176/mdr.2025.1361

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

مقدمه

عملیات‌های ضد پهپاد را می‌توان به عنوان یک فناوری پیشرفته دانست که هدف آن شناسایی ویا ایجاد مانعی برای جلوگیری از انجام عملیات هواپیماهای بدون‌سرنشین است. با افزایش استفاده از پهپادهای کوچک در زمینه‌های مختلف، از جمله نظارت، و فعالیت‌های خصمانه، نیاز به توسعه فناوری‌های مقابله با این سیستم‌ها به طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. این مطالعه به تحلیل روند توسعه فناوری در سیستم‌های ضد پهپاد می‌پردازد و بر پیشرفت‌های کلیدی در زمینه شناسایی، ردیابی، انهدام و کنترل و فرماندهی تمرکز می‌کند. پیشرفت در حسگرهای تصویری و راداری، به همراه استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی، دقت شناسایی و ردیابی تهدیدات ناشی از پهپادها را بهبود بخشیده است. همچنین، فناوری‌های انهدام، از جمله تسلیحات الکترونیکی و لیزری، به عنوان راهکارهای مؤثر در مقابله با این تهدیدات توسعه یافته‌اند. در کنار این، سیستم‌های کنترل و فرماندهی بهبود یافته، امکان واکنش سریع‌تر و هماهنگ‌تر نیروهای دفاعی را فراهم می‌کنند. با این حال، چالش‌هایی از قبیل هزینه‌های بالا، نیاز به رعایت مقررات قانونی و تطابق با تکنولوژی‌های در حال تغییر وجود دارد. برای موفقیت در این حوزه، تحقیق و نوآوری مداوم در فناوری‌های ضد پهپاد ضروری است. با توجه به پیچیدگی و سرعت تغییرات در این فناوری در کشور، ضرورت دارد مراکز تحقیقاتی و صنعتی به‌طور مستمر بر روی نوآوری و بهبود سیستم‌های ضد پهپاد تمرکز کنند تا بتوانند به‌طور مؤثری با تهدیدات ناشی از استفاده خصمانه از پهپادها مقابله کنند.

کشف و شناسایی اهداف پروازی عمدتاً به دو روش اصلی (با بهره‌گیری از حساسه‌هایی مانند رادارهای مختلف (و روش تکمیلی) با بهره‌گیری ازدیده‌بانی بصری و سامانه‌های اطلاعاتی شناسایی) صورت می‌گیرد و شبکه‌های یکپارچه اطلاعات پروازی یا پدافند هوایی با نرم افزارهای مختلف بعد از کشف اهداف، اقدام به طبقه بندی و شناسایی هر یک از این اهداف می نمایند (آقابالازاده و محمدی،۲۳:۱۳۹۲).

ادبیات و مبانی نظری

ریزپرنده‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین:به طورکلی وسایل پرنده را می‌توان به دو نوع سرنشین‌دار و بدون سرنشین تقسیم کردکه هرکدام از آنها با توجه به قابلیت‌های پروازی مخصوص

به خود،کاربردهای متفاوتی دارند. واژۀ پهپاد مخفف پرنده هدایت پذیر از دور است که توسط فرهنگستان زبان فارسی، معادل وسیله هوایی بدون سرنشین در نظر گرفته شده است و به پرنده‌ای اطلاق می‌شودکه برای هدف خاصی برنامه‌ریزی شده و می‌تواند به صورت خودکار یا کنترل از راه دور، در محدودۀ جو مأموریت خود را انجام دهد. حال اگر پهپاد در اندازۀکوچک و وزن کم ساخته شود، به آن ریزپرنده گفته می‌شود (بختیاری،محمدی(۱۴۰۲)). برای تمایز بین پهپاد و ریزپرنده معیار واحدی وجود ندارد و هر مجموعه‌ای تعریف خاص خود را دارد.

سامانه‌های ضدپهپاد

فناوری ضد پهپاد که به عنوان فناوری ضد سامانه‌های بدون سرنشین نیز شناخته می‌شوند به سامانه‌هایی اشاره دارند که برای شناسایی و یا رهگیری هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌شوند (پدرام و همکاران، ۱۳۹۷). در حالی که نگرانی از تهدیدهای امنیتی بالقوه از پهپادهای نظامی و نیز شخصی در حال رشد است یک بازار جدید برای فناوری ضدپهپاد به سرعت در حال ظهور است. تا به امروز حداقل ۲۳۵ عدد از محصولات ضد پهپاد در بازار و یا در حال تحقیق و توسعه برای ورود به بازار شناسایی شده‌اند(هالند،2018).

روش‌های ضدپهپادی چند لایه

رویکرد دفاع لایه‌ای[1] به عنوان موثرترین راه جلوگیری از نفوذ و سوء استفاده از نقاط ضعف امنیتی عنوان می‌شود. در این رویکرد چند فناوری برای حفاظت از محیط با یکدیگر ترکیب می‌شوند. به عبارتی دیگر دفاع لایه‌ای استفاده از کنترل‌های امنیتی مختلف در سطوح مختلف برای محافظت از دارایی‌ها در برابر تهدیدها است. تعداد لایه‌ها و اقدامات امنیتی بستگی به تهدید و اهمیت دارایی‌ها دارد. بسیاری از رویکردهای ضد پهپادی روی فرکانس رادیویی تمرکز دارند، زیرا بیشتر پرنده‌های بدون سرنشین از نوعی لینک فرمان و کنترل فرکانس رادیویی استفاده می‌کنند. اما در حال حاضر این رویکردها با حسگرهای مادون قرمز/ الکترونوری، رادار یا آکوستیک (صوتی) برای شناسایی کامل‌تر حسگرها ترکیب می‌شوند. از این‌رو برای داشتن یک سیستم کامل لازم است تعاملی قدرتمند بین سازندگان حسگر با شرکت‌های ساخت سلاح

1 Layered Defense

جمینگ یا تجهیزات انرژی مستقیم ایجاد شود. مشتریان نظامی ضد پهپاد بیشتر به دنبال سیستم‌های کاملا خودکار با معماری باز هستند تا بتوانند با توجه به محیط عملیاتی خود، حسگرهای مختلف مانند صوتی را در سیستم ادغام کنند. از آنجا که آگاهی بیشتر از وضعیت می‌تواند برای جلوگیری از تهدیدها بسیار مناسب باشد.

سامانه‌های آشکارساز و رهگیر پهپاد

رادار: پهپاد با اثر راداری که از برخورد آن با پالس‌های فرکانسی رادیویی تولید شده توسط رادار، ایجاد شهده است، شناسایی می‌شود. این سامانه‌ها اغلب دارای الگوریتم خاصی برای تمایز بین پهپادها و دیگر اجسهام کوچک پروازی، مانند پرنده‌ها هستند. تصدیق شده است که با تحلیل امواج میکرو داپلر به دست آمده از رادار چند شاخه، باعث شناسایی وردیابی هواپیماهای بدون سرنشین با دقت بالا می‌شود(هافمن و همکاران،۲۰۱۶).

امواج رادیویی: هواپیماهای بدون سرنشین معمولاً با کنترلرهای خود در برخی از باندهای فرکانس خاص ارتباط برقرار می‌کنند(پیکاک و جانستون،۲۰۱۳).

تصویری: تشخیص هواپیماهای بدون سرنشین بر اساس تصاویر ویدئویی جسم در زمینه دید رایانه و تشخیص الگو است.یک شی را می‌توان بر اساس ویژگی‌های ظاهر آن شناسایی کرد (ژانگ و همکاران،۲۰۱۶).

مادون قرمز: پهپادها با اثر دمایی خود تشخیص داده می‌شوند(هالند،۲۰۱۸).

صوتی: شناسایی پهپادها با شناسایی صداهای منحصر به فرد تولید شده توسط موتورهای آن‌ها انجام می شود. در محیط عملیاتی سامانه‌های صوتی برای تشخیص به یک کتابخانه از صداها تولید شده توسط پهپادهای شناخته شده تکیه می‌کنند. سامانه‌های صوتی هزینه اجرایی کمی دارند و برای تشخیص محل هواپیماهای بدون سرنشین از الگوریتم پردازش آرایه سیگنال، مانند طبقه‌بندی سیگنال چندگانه استفاده می‌شود(کریستنچر و همکاران،۲۰۱۶).

حسگرهای ترکیبی: بسیاری ازسامانه‌ها انواع مختلف حسگرها را به منظور ارایه تشخیص قویتر با هم ادغام می‌کنند. به عنوان مثال، یک سامانه ممکن است شامل یک حسگر صوتی درکنار

یک حسگر نوری باشد. در ضمن این که استفاده از عناصر تشخیص چندگانه احتمال تشخیص موفقیت آمیز را افزایش می‌دهد(هالند،۲۰۱۸).

سامانه‌های اخلال‌گر در عملیات پهپاد

مرحله بعد از شناسایی پهپاد، ایجاد یک اختلال در عملیات آن است. مشابه با مرحله شناسایی، برای اخلال در عملکرد پهپاد نیز روش‌ها و فناوری‌های مختلفی در دسترس است. هر یک از این روش‌ها می‌تواند در موقعیت‌ها و اهداف متفاوت، بازخورد بهتری نشان دهد.

یکی از روش‌های تضعیف پهپادهای مخرب استفاده از انرژی مستقیم[1] مانند فناوری‌های ضدپهپادی لیزر و ریزموج است. فناوری ریزموج به اندازه لیزر مخرب نیست اما می‌تواند با سوزاندن قطعات الکترونیکی پهپاد، آن را از کار بیاندازد. در واقع این روش پرنده را نابود نمی‌کند، بلکه فقط مانند لیزر آن را می‌سوزاند. در همین راستا شرکت ریتیون نیز سیستم‌های ضد پهپادی لیزری و ریزموج خود را ارائه داده است. این سیستم جنگ‌افزاری لیزری با انرژی بالا می‌تواند بیش از ۴۰ هدف پهپادی که به سمتش می‌آیند را تخریب کند. از مهمترین مزایای سیستم جنگ‌افزاری لیزری با انرژی بالا این است که با قدرت لیزر ۱۰ کیلووات می‌تواند برد نسبتا طولانی (در محدوده ۳ تا ۵ کیلومتر) را پوشش داده و چند پهپاد را با سرعت زیاد هدف قرار دهد.

اختلال امواج رادیویی: با تولید حجم زیادی از امواج رادیویی، ارتباط فرکانس رادیویی بین پهپاد و اپراتور آن را مختل می‌کند. هنگامی که لینک رادیویی،که می‌تواند شامل لینک و ای‌فای نیز باشد، قطع شود، پهپاد یا به زمین می‌افتد یا بازگشت به خانه را آغاز می‌کند.

اختلال در سامانه ناوبری جهانی: ارتباط ماهوارهای با پهپاد را مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی یا سامانه ماهوارهای ناوبری جهانی، که برای ناوبری استفاده می‌شود مختل می‌کند. در صورت قطع ارتباط ماهواره‌ای، پهپاد یا به زمین می‌افتد یا بازگشت به خانه را آغاز می‌کند.

دستکاری : در این شیوه، فرد با استفاده از مهارت وتجربه خود به غیر از اپراتور پهپاد، از طریق نرم افزار و امواج رادیویی کنترل آن را بدست می‌گیرد.

لیزر: بخش‌های حیاتی و مهم پهپاد توسط امواج لیزر هدف قرار گرفته و باعث می‌شود که آن پرنده سقوط کند.

1 Directed Energy

تور یا دام:برای به دام انداختن پهپاد یا بخش‌های چرخان بیرونی آن کاربرد دارد.

مهمات پرتابه‌ای:استفاده ازگلوله و یا موشک و یا دیگر ادوات انفجاری که برای انهدام پهپاد به کار می‌رود.

ترکیب ادوات بازدارنده:تعدادی از سامانه‌های ضدپهپاد از ترکیب عناصر بازدارنده استفاده می‌کنند. بیشترین موارد مرسوم استفاده ترکیبی از پارازیت رادیویی و پارازیت در سامانه ناوبری جهانی است که پشت سر همکار می‌کنند.

مطالعات و ارزیابی‌ها سامانه‌های ضد پهپاد نشان می‌دهد که این حوزه در سال‌های اخیر با توجه به رشد استفاده از پهپادها در حوزه‌های نظامی، صنعتی، و امنیتی، به یکی از اولویت‌های تحقیقاتی و عملیاتی تبدیل شده است(لیکو ،۲۰۲۰). تمرکز اصلی پژوهش‌ها روی توسعه فناوری‌های شناسایی، ردیابی، و خنثی‌سازی پهپادها، همچنین یافتن راهکارهای عملیاتی جدید برای کاهش تهدیدات پهپادی بوده است (آلتونتاش و ابا، ۲۰۲۲).

چالش‌های توسعه و گسترش سامانه‌های ضد پهپاد

برای درک بهتر چالش‌های سامانه‌های ضد پهپاد می‌توان به تفصیل بیشتری در زمینه‌های مختلف پرداخت که هر یک از این چالش‌ها نیازمند بررسی دقیق‌تری هستند. در ادامه توضیحات بیشتری در مورد چالش‌ها ارائه شده است:

۱. تشخیص و شناسایی پهپادها

در شناسایی پهپادها، به‌ویژه پهپادهای کوچک یا پهپادهایی با سرعت بالا، دقت سامانه‌های راداری بسیار حیاتی است. توسعه رادارهایی که بتوانند در محیط‌های متنوع مانند مناطق شهری با بازتاب‌های متعدد یا جنگل‌ها کارآمد عمل کنند، چالشی بزرگ است. علاوه بر این، سامانه‌های چندسنسوری که ترکیبی از رادار، تصویربرداری حرارتی، و تصویربرداری نوری را استفاده می‌کنند، می‌توانند برای افزایش دقت در شناسایی مفید باشند، اما یکپارچه‌سازی این سنسورها خود نیازمند توسعه‌های فناورانه و پیچیدگی‌های فنی بالاست (مولر،۲۰۲۲). تفکیک پهپادهای مجاز از غیرمجاز چالش بزرگی است. سامانه‌های ضد پهپاد باید بتوانند به سرعت و با دقت پهپادهای متخاصم را از پهپادهای غیرنظامی یا مجاز تشخیص دهند. این نیاز به سیستم‌های

پیشرفته‌ای دارد که بتوانند در لحظه اطلاعات پهپادها را بررسی و تأیید کنند. فناوری‌های مرتبط با شناسایی خودکار از طریق سیگنال‌ها یا پروتکل‌های رمزگذاری شده می‌توانند به بهبود این روند کمک کنند، اما اجرای این فناوری‌ها در عمل همچنان یک چالش محسوب می‌شود.

۲. پهپادهای گروهی و حملات سوارم

پهپادهای سوارم می‌توانند با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی به صورت گروهی و هماهنگ عمل کنند و از تاکتیک‌های پیچیده برای حمله استفاده کنند. توسعه سامانه‌های ضد پهپاد که بتوانند در برابر حملات گروهی مقابله کنند، نیاز به هوش مصنوعی قوی و الگوریتم‌های پیش‌بینی دارد. همچنین، این سامانه‌ها باید بتوانند پهپادهای متعددی را به صورت همزمان و به‌طور مستقل هدف قرار دهند. یکی از مشکلات بزرگ پهپادهای سوارم این است که آن‌ها قادر به تغییر رفتار خود به صورت آنی هستند و مسیرهای حرکتی غیرقابل پیش‌بینی را دنبال می‌کنند. سامانه‌های ضد پهپاد باید بتوانند رفتارهای غیرمنتظره را تحلیل کنند و با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پیش‌بینی خودکار، به سرعت واکنش نشان دهند.

۳. محیط‌های پیچیده و اختلالات الکترومغناطیسی

در محیط‌های شلوغ مانند شهرهای بزرگ یا مناطق صنعتی، وجود نویزهای محیطی و تداخلات الکترومغناطیسی می‌تواند عملکرد سامانه‌های ضد پهپاد را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. به ویژه در سامانه‌های مبتنی بر اختلال سیگنالی[1]، مشکل اختلال در سیگنال‌های ضروری دیگر مانند شبکه‌های موبایل، وای فای یا سیستم‌های هوانوردی یک چالش بزرگ است. به همین دلیل توسعه سامانه‌هایی که بتوانند به صورت انتخابی و دقیق پهپادهای غیرمجاز را هدف قرار دهند بدون ایجاد اختلال در سایر سامانه‌های حیاتی، یک مسئله اساسی است.

در مناطق جنگلی یا مناطقی که موانع فیزیکی مانند ساختمان‌ها وجود دارند، سامانه‌های راداری و نوری با مشکلاتی مواجه می‌شوند. بهینه‌سازی سامانه‌های چندسنسوری و استفاده از ترکیب‌های مختلف سنسورها (مثلاً استفاده همزمان از رادارهای نفوذکننده در پوشش گیاهی و دوربین‌های حرارتی) ممکن است راه‌حلی برای این مشکل باشد.

1 jamming

۴. پیشرفت سریع فناوری پهپادها

پهپادهای مجهز به هوش مصنوعی می‌توانند خودمختار عمل کنند و حتی با روش‌هایی از قبیل تغییر مسیر یا خاموش کردن سیگنال‌های کنترلی، از شناسایی و سرنگونی توسط سامانه‌های ضد پهپاد جلوگیری کنند. این مسئله سامانه‌های ضد پهپاد را به چالش می‌کشد تا به طور مداوم با جدیدترین فناوری‌ها به‌روز شوند. پهپادهایی که از فناوری‌های جدید استتار استفاده می‌کنند، از جمله استفاده از مواد جذب‌کننده امواج راداری[1] یا استفاده از پهپادهای بدون سیگنال‌های الکترومغناطیسی، به شدت شناسایی آن‌ها را دشوار می‌کنند. سامانه‌های ضد پهپاد باید به طور مداوم توانایی شناسایی این نوع پهپادها را بهبود دهند.

۵. محدودیت‌های قانونی و حقوقی

استفاده از سامانه‌های ضد پهپاد به ویژه در فضای عمومی و شهری نیازمند قوانین و مقررات شفاف است. در بسیاری از کشورها هنوز چارچوب قانونی مشخصی برای استفاده از این سامانه‌ها وجود ندارد، که باعث می‌شود توسعه و استقرار آن‌ها با مشکلات حقوقی مواجه شود. به عنوان مثال، حریم خصوصی شهروندان یکی از مواردی است که در بسیاری از کشورها مورد بحث است.

۶.مشکلات دیپلماتیک و تداخلات مرزی

استفاده از سامانه‌های ضد پهپاد در مناطق مرزی یا نزدیک به فضای هوایی سایر کشورها ممکن است باعث بروز مشکلات دیپلماتیک شود. به‌ویژه اگر سامانه‌های اختلال‌گر یا نابودگر پهپادها به‌طور ناخواسته در فضای هوایی کشورهای دیگر دخالت کنند، ممکن است عواقب سیاسی و امنیتی ایجاد شود.

۷. هزینه‌های توسعه و نگهداری

توسعه سامانه‌های ضد پهپاد پیشرفته نیازمند سرمایه‌گذاری‌های هنگفت است. از رادارهای پیشرفته گرفته تا سامانه‌های لیزری یا سلاح‌های الکترومغناطیسی، هر یک از این فناوری‌ها هزینه‌های زیادی برای توسعه، پیاده‌سازی و نگهداری دارند. این مسئله به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه یا سازمان‌های غیرنظامی چالش‌برانگیز است (جیان،۲۰۲۲). به دلیل پیشرفت‌های سریع

1 **R**adar **A**bsorbing **M**aterials

فناوری‌های پهپادها، سامانه‌های ضد پهپاد نیاز به بروزرسانی مداوم دارند. بروزرسانی این سامانه‌ها نه تنها نیازمند هزینه‌های مادی است، بلکه به نیروی انسانی متخصص و آموزش‌دیده نیز نیاز دارد.

مقایسه تکنیک‌های مقابله با پهپادها

شکل ۱، معماری سیستم ضد پهپاد را نشان می‌دهد و سه بخش اصلی را شامل می‌شود:

- سیستم‌های حسگر[1] : وظیفه شناسایی و ردیابی پهپادها را بر عهده دارند.
- سیستم کنترل فرماندهی[2] : اطلاعات دریافتی از حسگرها را پردازش کرده، تصمیم‌گیری می‌کند و فرمان‌های لازم را به سیستم‌های مقابله ارسال می‌کند.
- سیستم‌های مقابله [3]: اقدامات لازم برای مقابله با پهپادها را انجام می‌دهند.

۱. سیستم‌های حسگر:

این بخش شامل چهار نوع حسگر اصلی است:

- رادار : از امواج رادیویی برای تشخیص و ردیابی اهداف استفاده می‌کند. برای تشخیص در فواصل دور و در شرایط آب و هوایی مختلف مناسب است.
- الکترواپتیکال/فروسرخ: از دوربین‌های اپتیکی و حرارتی برای تصویربرداری و شناسایی پهپادها استفاده می‌کند. برای تشخیص دقیق نوع پهپاد و تصویربرداری با کیفیت بالا مناسب است.
- جهت‌یابی رادیویی: سیگنال‌های رادیویی ارسالی از پهپاد را دریافت و جهت آن را تعیین می‌کند. برای تشخیص و ردیابی پهپاد از طریق سیگنال‌های رادیویی مناسب است.
- آکوستیک[4] : از میکروفون‌ها برای تشخیص صدای پهپادها استفاده می‌کند. برای تشخیص در فواصل نزدیک و در محیط‌های کم‌نویز مناسب است.

۲. سیستم کنترل فرماندهی:

این بخش، مغز سیستم ضد پهپاد است و وظایف زیر را بر عهده دارد:

1 Sensor Systems
2 Command Control System
3 Defeat Systems
4 Acoustic

- تصویر عملیاتی مشترک[1] : اطلاعات دریافتی از حسگرهای مختلف را تجمیع و یک تصویر واحد از وضعیت میدان نبرد ارائه می‌دهد.
- تشخیص، طبقه‌بندی و شناسایی[2] : با استفاده از الگوریتم‌های پردازش سیگنال و تصویر، پهپادها را تشخیص داده، نوع آن‌ها را طبقه‌بندی و هویت آن‌ها را شناسایی می‌کند.
- الگوریتم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری[3] : با تحلیل اطلاعات، بهترین روش مقابله با هر پهپاد را تعیین و به اپراتور یا سیستم‌های مقابله پیشنهاد می‌دهد.
- مقابله[4] : پس از تصمیم‌گیری، فرمان‌های لازم را به سیستم‌های مقابله ارسال می‌کند.

۳. سیستم‌های مقابله:

این بخش شامل دو دسته روش مقابله است:

مقابله نرم[5] : بدون آسیب فیزیکی به پهپاد، آن را از کار می‌اندازد یا مسیر آن را منحرف می‌کند. شامل موارد زیر است:

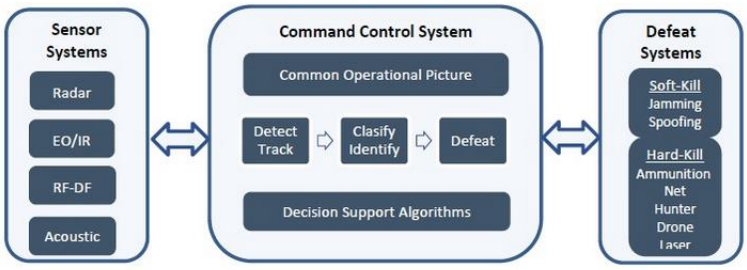
- جَمینگ : ایجاد اختلال در سیگنال‌های کنترلی و ارتباطی پهپاد.
- فریب : ارسال سیگنال‌های جعلی جی پی اس یا سایر سیگنال‌های کنترلی به پهپاد.

مقابله سخت[6]: با استفاده از سلاح‌های فیزیکی، پهپاد را منهدم می‌کند. شامل موارد زیر است:

- مهمات : استفاده از گلوله یا موشک برای هدف قرار دادن پهپاد.
- تور پرتاب تور برای به دام انداختن پهپاد.
- پهپاد شکارچی: استفاده از پهپاد دیگر برای مقابله با پهپاد هدف.
- لیزر: استفاده از پرتو لیزر برای از کار انداختن پهپاد.

1 Common Operational Picture
2 Detect, Classify, Identify
3 Decision Support Algorithms
4 Defeat
5 Soft-Kill
6 Hard-Kill

این شکل نشان می‌دهد که یک سیستم ضد پهپاد کارآمد، نیازمند ترکیبی از حسگرهای مختلف، سیستم پردازش اطلاعات قوی و روش‌های مقابله متنوع است. هر یک از بخش‌ها نقش مهمی در عملکرد کلی سیستم ایفا می‌کنند و هماهنگی بین آن‌ها برای مقابله مؤثر با تهدیدات پهپادی ضروری است. انتخاب نوع حسگرها و روش‌های مقابله بستگی به نوع تهدید، محیط عملیاتی و بودجه موجود دارد. برای مثال، در محیط‌های شهری با نویز زیاد، استفاده از حسگرهای آکوستیک به تنهایی کارآمد نخواهد بود و نیاز به استفاده از سایر حسگرها و روش‌های مقابله است.



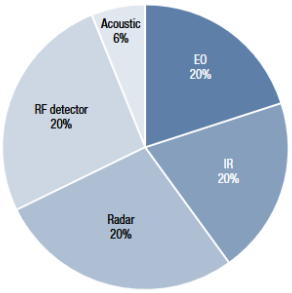
شکل ۱. شماتیکی از معماری ضد پهپاد

تحلیل و ارزیابی حسگرهای شناسایی ورهگیری در سامانه های ضد پهپاد

چهار نوع حسگر الکترواپتیک[1]، فرکانس رادیویی[2]، تشعشعات فروسرخ[3] و رادار، هر کدام به میزان ۲۰٪ در سیستم‌های تشخیص پهپاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۲ نشان می‌دهد که این چهار فناوری، نقش مهم و تقریباً برابری در این حوزه ایفا می‌کنند. حسگر آکوستیک با تنها ۶٪ کمترین میزان استفاده را دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل محدودیت‌های این فناوری مانند برد کوتاه، تأثیرپذیری از نویز محیطی و دقت پایین‌تر در مقایسه با سایر روش‌ها باشد.توزیع تقریباً مساوی بین چهار حسگر اصلی (حسگر الکترواپتیک، فرکانس رادیویی، تشعشعات فروسرخ و رادار) نشان‌دهنده اهمیت استفاده از ترکیبی از این فناوری‌ها در سیستم‌های پیشرفته تشخیص پهپاد است. هر یک از این حسگرها نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و ترکیب آن‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد کلی سیستم و کاهش نقاط ضعف هر کدام کمک کند. به عنوان مثال:

1 Electro-Optical
2 Radio Frequency
3 Infrared

- رادار: برای تشخیص برد بالا و ردیابی اهداف در شرایط مختلف آب و هوایی مناسب است، اما در تشخیص دقیق نوع پهپاد و در محیط‌های شلوغ ممکن است با مشکل مواجه شود.
- حسگر الکترواپتیک: برای شناسایی دقیق‌تر نوع پهپاد و تصویربرداری با کیفیت بالا مناسب است، اما در شرایط آب و هوایی نامساعد و شب کارایی کمتری دارد.
- فرکانس رادیویی: برای تشخیص و ردیابی پهپاد از طریق سیگنال‌های رادیویی مناسب است، اما در محیط‌های با تداخل فرکانسی زیاد ممکن است دچار مشکل شود.
- آکوستیک: ارزان‌تر است، اما برد و دقت پایینی دارد.



شکل ۲. درصد استفاده از انواع حسگرها در سیستم‌های تشخیص پهپاد

این شکل نشان می‌دهد که در سیستم‌های تشخیص پهپاد، استفاده از ترکیبی از فناوری‌ها، به ویژه حسگر الکترواپتیک ،فرکانس رادیویی ،تشعشعات فروسرخ و رادار ، رایج‌تر است و حسگر آکوستیک به دلیل محدودیت‌هایش کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- رادار: این سیستم در زمینه‌های برد، شرایط محیطی، اسکن حجم و ردیابی چندین هدف عملکرد خوبی دارد. با این حال، هزینه بالاتری دارد و دقت کمتری در شناسایی موقعیت و طبقه‌بندی اهداف دارد. همچنین در شناسایی اهداف خودران کمتر موثر است.

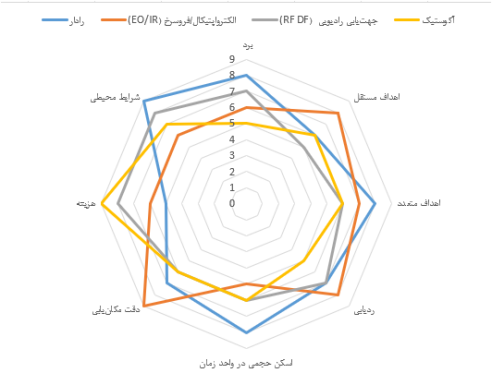
- الکترو-اپتیکال/مادون قرمز: این سیستم دقت بالایی در تعیین موقعیت و طبقه‌بندی اهداف دارد، اما در شرایط محیطی سخت (مانند مه یا باران شدید) عملکرد ضعیف‌تری دارد. این سیستم نسبت به رادار و به جهت یافتن منبع انتشار امواج رادیویی هزینه بالاتری دارد.
- شناسایی جهت فرکانس رادیویی: این سیستم از نظر هزینه مقرون به صرفه است و در ردیابی در شرایط مختلف عملکرد مناسبی دارد، اما توانایی محدودی در طبقه‌بندی اهداف دارد و برد آن متوسط است. همچنین عملکرد ضعیفی در شناسایی اهداف دارد.
- اکوستیک: سیستم اکوستیک بسیار مقرون به صرفه است و در محیط‌های شلوغ و پر از نویز عملکرد خوبی دارد، اما در زمینه‌هایی مانند برد، طبقه‌بندی و اسکن حجم عملکرد ضعیف‌تری دارد و همچنین در ردیابی و شناسایی اهداف خودران ضعیف‌تر است.

جدول ۱. مقایسه‌ای عملکردی میان انواع حسگرها در سیستم‌های تشخیص پهپاد

معیار	رادار	الکترواپتیکال/فروسرخ	جهت‌یابی رادیویی	آکوستیک
برد	۸	۶	۷	۵
شرایط محیطی	۹	۶	۸	۷
هزینه	۵	۶	۸	۹
دقت مکان‌یابی	۷	۹	۶	۶
اسکن حجمی در واحد زمان	۸	۵	۶	۶
ردیابی	۷	۸	۷	۵
اهداف متعدد	۸	۷	۶	۶
اهداف مستقل	۶	۸	۵	۶

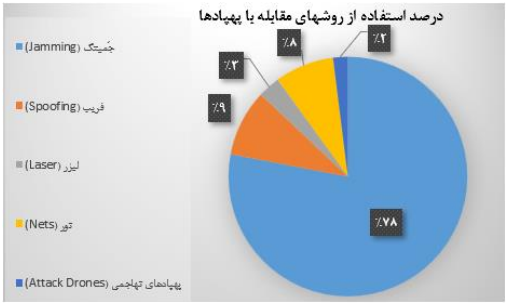
هر نوع حسگر ویژگی‌ها و نقاط ضعف خاص خود را دارد. به عنوان مثال، رادار در شرایط محیطی سخت عملکرد خوبی دارد اما هزینه بالاتری دارد، در حالی که اکوستیک مقرون به صرفه

است اما در زمینه‌های ردیابی و طبقه‌بندی ضعیف است. بسته به نیاز خاص هر ماموریت (مثلاً بودجه، برد یا شرایط محیطی)، ممکن است استفاده از سیستم‌های مختلف یا ترکیبی از آنها مطلوب‌تر باشد.



شکل ۳. مقایسه‌ای عملکردی میان انواع حسگرها در سیستم‌های تشخیص پهپاد

تحلیل و ارزیابی روش‌های مقابله با پهپادها



شکل ۴. درصد استفاده از روش‌های مقابله با پهپادها

- جَمینگ[1] با ۷۸٪، رایج‌ترین روش مقابله با پهپادها است. جَمینگ به معنای ایجاد اختلال در سیگنال‌های کنترلی و ارتباطی پهپاد با اپراتور آن است که باعث از کار افتادن یا سقوط پهپاد

1 Jamming

می‌شود. دلیل محبوبیت بالای این روش، نسبتاً ساده و مؤثر بودن آن در مقابله با طیف وسیعی از پهپادهاست.

- فریب[1] با ۹٪ در رتبه دوم قرار دارد. فریب شامل ارسال سیگنال‌های جعلی جی‌پی‌اس یا سایر سیگنال‌های کنترلی به پهپاد است که باعث گمراهی آن و هدایتش به مسیر یا مکان دلخواه می‌شود.
- فناوری‌های تور با ۸٪ و لیزر با ۳٪، سهم کمتری در مقابله با پهپادها دارند. استفاده از تور برای به دام انداختن پهپادها در فواصل نزدیک کاربرد دارد و لیزر نیز به دلیل محدودیت‌های فنی و هزینه‌های بالا، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- پهپادهای تهاجمی[2] با تنها ۲٪، کمترین میزان استفاده را دارند. این روش شامل استفاده از پهپادهای دیگر برای مقابله مستقیم با پهپاد هدف (مانند برخورد فیزیکی یا حمل سیستم‌های جَمینگ) است که به دلیل پیچیدگی‌های عملیاتی و قانونی، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۵ نشان می‌دهد که در حال حاضر، جَمینگ به عنوان مؤثرترین و رایج‌ترین روش مقابله با پهپادها شناخته می‌شود. با این حال، با پیشرفت فناوری پهپادها و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر جَمینگ، احتمالاً شاهد افزایش استفاده از سایر روش‌ها مانند فریب، لیزر و پهپادهای تهاجمی در آینده خواهیم بود. همچنین، ترکیب چند روش مختلف نیز می‌تواند راهکار مؤثری برای مقابله با تهدیدات ناشی از پهپادها باشد. به طور خلاصه، این شکل نشان می‌دهد که تمرکز اصلی در مقابله با پهپادها در حال حاضر بر روی جَمینگ است، اما سایر روش‌ها نیز با توجه به شرایط و نیازهای خاص، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

پیشینهٔ پژوهش

(لیو وهمکاران،۲۰۱۶) روندتوسعه پهپاد درچین را با استفاده از روش تجزیه و تحلیل پتنت نشان دادند و مشکلات موجود برای توسعه فناوری پهپاد در چین را روشن کردند.

1 Spoofing
2 Attack Drones

(فاهی و میلر،۲۰۱۷) با معرفی فناوری‌های کلیدی مرتبط با پهپادها، مانندپیشرفت‌های روباتیک، پیشرفتهای یادگیری ماشین،پیشرفت‌های هوش مصنوعی،پیشرفت‌های رابط انسان و ماشین و غیره ،نقشه راه وسایل نقلیه بدون سرنشین وزارت دفاع ایالات متحده در بازه زمانی۲۰۱۷تا ۲۰۴۲راتهیه کردند.

(پدرام و همکاران ،۱۳۹۷) در پژوهش خود به فناوریهای دفاعی ضدپهپادی با رویکرد آینده پژوهی پرداخته اند و در انجام این مهم از اولویت گذاری پا بر جا به عنوان یکی از روش‌های فعالیت آینده پژوهی استفاده کرده‌اند.

(میرزایی کهق،۱۴۰۲) با استفاده از مبانی پیش بینی فناوری (پایش و دیدگاه خبرگان) و یا استفاده از روش دلفی فازی،به تحلیل توسعه جهانی فناوری‌های مرتبط با ریزپزنده‌ها در یک دهه آتی پرداخته است. یافته های این مقاله نشان می‌دهد فناوری های هوش مصنوعی و الکترونیک و مخابرات بایستی در اولویت و مدنظر مسولان و تصمیم سازان و برنامه ریزان کشور قرار بگیرد.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش به دنبال آسان کردن عملیات اجرایی و نیز حل چالش‌های بلند مدت است، لذا نوع آن کاربردی است. در این تحقیق با تکیه بر منابع معتبر، ذیل رویکرد کتابخانه‌ای ادبیات تحقیق را گردآوری نموده و به بررسی و پویش اسناد و مدارک با استفاده از تحلیل هم واژگانی رویکرد توصیفی از روند توسعه فناوری‌ها در حوزه سامانه‌های ضد پهپاد ارایه نموده است.

هم‌واژگانی را از نظر مفهومی معادل هم‌واژه[1] دانسته‌اند که گاه واژه هم‌رخدادی [2]را به جای آن هم به کار برده‌اند. در زبان فارسی واژه نخست را هم‌واژگانی و واژه دوم را هم رخدادی معنا کرده‌اند. تحلیل هم‌واژگانی که بر اساس هم رخدادی واژگان عمل می‌کند، به عنوان یک روش تحلیل محتوا در مطالعات داده‌کاوی و علم سنجی مطرح است.

در این فعالیت علمی با استفاده از داده‌های پایگاه استنادی وب آف ساینس در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۲۳ میلادی کلید واژه سامانه ضد پهپاد[3] مورد جستجو و تحلیل واژگان قرار گرفته است.

1 co-word
2 co-occurance
3 counter unmanned aerial systems (C-UAS)

داده‌های اماری شامل ۲۵۳ مقاله در این حوزه بوده است که در این فعالیت با استفاده از تحلیل واژگان روند و فناوری موثر در حوزه سامانه ضد پهپادی استخراج و گزارش شده است.

سؤالات پژوهش

۱- فناوری‌های اصلی استفاده شده در سامانه‌های ضد پهپاد کدامند و مزایا و معایب هرکدام چیست؟

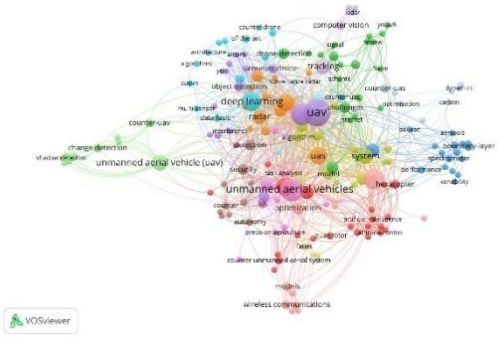
۲- انواع مختلف سامانه‌های ضد پهپاد چیست و هر یک چه ویژگی‌هایی دارند؟

۳- سامانه‌های ضد پهپاد چگونه می‌توانند پهپادهای کوچک و پرسرعت را شناسایی و رهگیری کنند؟

۴- محدودیت‌ها و چالش‌های فنی سامانه‌های ضد پهپاد کدامند؟

۵- کشورهای پیشرو در حوزه سامانه ضد پهپادی کدام کشورها هستند؟

یافته‌های پژوهش



شکل ۵. شماتیکی از پرتکرارترین کلمات در حوزه فناوری ضد پهپاد

این تصویر یک نقشه هم‌رخدادی واژگان است که با استفاده از ابزار وس ویوور[1] تولید شده و نشان می‌دهد که چگونه مفاهیم مختلف در حوزه ضد پهپاد به یکدیگر مرتبط هستند. این شبکه شامل واژگان کلیدی مرتبط با فناوری، سامانه های ضد پهپاد است. نقشه‌ای که مشاهده می‌کنید، خوشه‌بندی موضوعات مرتبط با پهپادها و فناوری‌های مرتبط با آن را نشان می‌دهد. این تصویر بر

1 VOSviewer

اساس تحلیل هم‌واژگانی از مقالات علمی و پژوهشی تهیه شده است. با تحلیل شکل موارد زیر قابل استنباط است:

۱ .خوشه پهپادها و وسایل پرنده بدون سرنشین (رنگ قرمز):

کلمات کلیدی اصلی: پهپادها یا وسایل پرنده بدون سرنشین[1]، بهینه‌سازی[2] عملکرد پهپادها برای کاربردهای مختلف، خودمختاری[3] پهپادها، به معنای قابلیت پرواز بدون نیاز به دخالت مستقیم انسان، استفاده از ارتباطات بی‌سیم[4] برای کنترل پهپادها و انتقال داده‌ها.

این خوشه به بررسی کلی و مباحث اساسی در مورد پهپادها، بهینه‌سازی سیستم‌ها، و ارتباطات بی‌سیم می‌پردازد.

۲ .خوشه یادگیری عمیق و رادارها (رنگ نارنجی):

کلمات کلیدی اصلی یادگیری عمیق[5]، نوعی از هوش مصنوعی که در تحلیل داده‌های پهپادها و بهبود الگوریتم‌های تشخیص و ردیابی استفاده می‌شود، رادارها برای شناسایی و ردیابی پهپادها و اهداف هوایی، تشخیص اشیاء[6] با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ردیابی اهداف شناسایی‌شده توسط پهپادها یا رادارها.این خوشه به تحقیقاتی اشاره دارد که از یادگیری عمیق برای بهبود رادارها و سیستم‌های تشخیص و ردیابی استفاده می‌کنند. این فناوری‌ها برای شناسایی اشیاء و ردیابی آن‌ها در کاربردهای نظامی و نظارتی بسیار حیاتی هستند.

۳ .خوشه ضد پهپادها و سیستم‌های مقابله با پهپادها (رنگ قهوه‌ای):

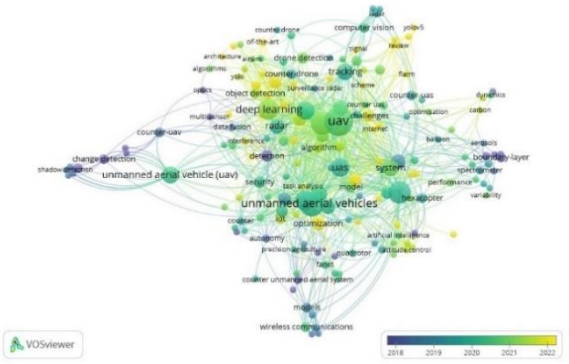
کلمات کلیدی اصلی سیستم‌های ضد پهپاد[7] که به منظور شناسایی و متوقف کردن پهپادهای متخاصم طراحی شده‌اند .تشخیص حضور پهپادها در محیط، امنیت و حفاظت از زیرساخت‌های حساس در برابر حملات پهپادی، تحلیل وظایف در سیستم‌های مقابله با پهپادها.این خوشه بر توسعه و بررسی فناوری‌های مقابله با تهدیدات پهپادی تمرکز دارد. موضوعاتی مانند شناسایی

1 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)
2 Optimization
3 Autonomy
4 Wireless Communications
5 Deep Learning
6 Object Detection
7 Counter-UAV

پهپادهای متخاصم و طراحی سیستم‌های دفاعی برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی در این حوزه قرار دارند.

۴ .خوشه بینایی کامپیوتر و تشخیص با هوش مصنوعی (رنگ سبز):

کلمات کلیدی اصلی بینایی کامپیوتر[1] که در تشخیص و ردیابی پهپادها به کمک هوش مصنوعی نقش دارد یولو[2] یک مدل پیشرفته تشخیص اشیاء که در این حوزه بسیار پرکاربرد است تشخیص پهپادها با استفاده از تصاویر و داده‌های ویدیویی.این خوشه روی کاربردهای بینایی کامپیوتر و هوش مصنوعی متمرکز است که برای تشخیص پهپادها و تجزیه و تحلیل داده‌های ویدیویی استفاده می‌شوند. مدل‌های پیشرفته‌ای مانند، یولو برای تشخیص سریع و دقیق پهپادها در محیط‌های مختلف به کار گرفته می‌شوند.



شکل ۶. هم‌رخدادی کلیدواژه‌های مرتبط با فناوری‌های ضد پهپاد در بازه زمانی سالهای ۲۰۱۸-۲۰۲۲

شکل **۶** نقشه با یک طیف رنگی از آبی (برای سال **۲۰۱۸**) تا زرد (برای سال **۲۰۲۲**) تغییرات زمانی موضوعات را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، موضوعاتی مانند ضد پهپاد در سال‌های اخیر اهمیت بیشتری یافته‌اند. این نقشه نمایی از شبکه تحقیقات علمی است که نشان می‌دهد چطور اصطلاحات کلیدی در کنار هم ظاهر می‌شوند و در چه حوزه‌هایی تحقیقات بیشتری صورت گرفته است. جدیدترین عناوین فناوری در حوزه فناوری ضد پهپاد را نشان می‌دهد. با تحلیل این شکل می‌توان فناوری‌های داغ‌تر یا به نوعی نوظهور و بدیع را در یک حوزه فناوری شناسایی

1 Computer Vision
2 YOLO (You Only Look Once)

نمود. رنگ‌ها (گره‌ها) متمایل به زرد و روشن‌تر حوزه‌های علمی جدیدتر را نشان می‌دهند. با تحلیل و ارزیابی شکل موارد زیر قابل اهمیت است.

۱ .مفاهیم مرکزی و پیوندهای قوی

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین: این گره بزرگ در مرکز نقشه قرار دارد و نشان‌دهنده یکی از پرکاربردترین کلیدواژه‌ها در این حوزه است. این نشان می‌دهد که بخش زیادی از تحقیقات علمی مرتبط به پهپادها انجام می‌شود.

ضد پهپاد: ضد پهپاد یکی از موضوعات مهم و کاربردی است که به شدت با موضوعات دیگر مانند یادگیری عمیق، تشخیص، بینایی کامپیوتر و ردیابی پیوند خورده است. این نشان می‌دهد که پژوهشگران در حال توسعه فناوری‌هایی هستند که بتوانند پهپادها را شناسایی، ردیابی و در صورت لزوم با آن‌ها مقابله کنند.

۲ .تکنولوژی‌های مرتبط با پهپادها و ضد پهپادها

یادگیری عمیق[1] این فناوری به عنوان یکی از کلیدهای اساسی در شناسایی و ردیابی پهپادها شناخته شده است. بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در این حوزه استفاده می‌شوند تا دقت تشخیص و ردیابی بهبود یابد. پیوند قوی با مفاهیمی مثل رادار و ردیابی نشان می‌دهد که یادگیری عمیق برای پردازش داده‌های راداری و ردیابی خودکار پهپادها کاربرد گسترده‌ای دارد.

بینایی کامپیوتر و یولو: بینایی کامپیوتر و مدل‌های معروفی مثل یولو در تشخیص اشیاء به‌ویژه پهپادها به کار می‌روند. یولو به عنوان یک مدل قدرتمند برای شناسایی سریع اشیاء در تصاویر، نقش مهمی در این حوزه ایفا می‌کند.

رادار و ردیابی :این دو مفهوم بسیار نزدیک به هم در نقشه قرار دارند که نشان‌دهنده اهمیت رادارهای پیشرفته برای شناسایی و ردیابی پهپادها است. سیستم‌های راداری با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری عمیق می‌توانند پهپادهای در حال پرواز را شناسایی کرده و آن‌ها را در شرایط مختلف ردیابی کنند.

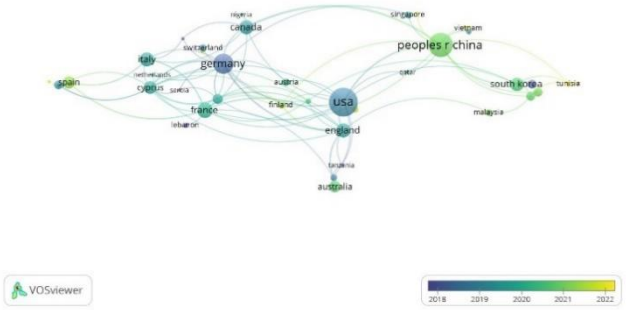
1 Deep Learning

۳ .روندهای زمانی و موضوعات نوظهور

رنگ‌های مختلف گره‌ها نشان‌دهنده زمان‌بندی تحقیقات مرتبط است. در این نقشه، طیف رنگی از آبی (که موضوعات مربوط به سال‌های قبل، مانند ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد) تا زرد (که موضوعات جدیدتر مربوط به سال ۲۰۲۲ را نمایش می‌دهد) وجود دارد. موضوعاتی که رنگ زرد دارند مانند بینایی کامپیوتر و یادگیری عمیق نشان می‌دهند که این فناوری‌ها در سال‌های اخیر بیشترین توجه را به خود جلب کرده‌اند.اینترنت اشیاء و ارتباطات بی‌سیم: این حوزه‌ها با رنگ‌های روشن‌تر (زرد) نشان‌دهنده پیشرفت‌های اخیر در این زمینه هستند. پهپادها به عنوان بخشی از شبکه‌های هوشمند و متصل به اینترنت اشیاء ، به صورت فزاینده‌ای در حال گسترش هستند.

این نقشه به‌خوبی نشان می‌دهد که تحقیقات در حوزه پهپادها و ضد پهپادها طی سال‌های اخیر به شدت به سمت استفاده از فناوری‌های پیشرفته مثل یادگیری عمیق، بینایی کامپیوتر و اینترنت اشیا حرکت کرده است. همچنین، موضوعات جدیدتری مثل سیستم‌های ضد پهپاد و ارتباطات بی‌سیم در حال رشد هستند و پژوهشگران به دنبال راهکارهای نوآورانه برای مقابله با چالش‌های پهپادها و استفاده بهینه از آن‌ها در محیط‌های مختلف هستند. این نقشه به خوبی نشان می‌دهد که موضوعاتی مانند سیستم‌های ضد پهپاد، ردیابی و یادگیری ماشین در حال رشد و توسعه هستند و تمرکز زیادی بر روی استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته برای شناسایی و مقابله با پهپادها وجود دارد.به طور کلی فناوری‌های نوظهور در سامانه‌های ضد پهپاد به طور شامل موارد زیر است:

توسعه روزافزون پهپادها و کاربردهای متنوع آن‌ها، ضرورت ایجاد سیستم‌های دفاعی مؤثر در برابر این تهدیدات را بیش از پیش آشکار کرده است. با توجه به پیشرفت‌های سریع فناوری، حوزه سامانه‌های ضد پهپاد نیز همواره در حال تحول است. برای بهبود عملکرد سامانه‌های ضد پهپاد در آینده، فناوری‌های نوظهور مختلفی می‌توانند به جنبه‌های کلیدی مانند شناسایی سریع‌تر، پاسخ‌های مؤثرتر، و کارآیی بیشتر کمک کنند.



شکل ۷. شماتیکی کشورهای پیشرو در حوزه سامانه‌های ضد پهپادی

شکل ۷ تحلیل شبکه همکاری‌های بین‌المللی در حوزه سامانه‌های ضد پهپادی را نشان می دهد. در این شبکه، هر گره (نقطه) نشان‌دهنده یک کشور است و خطوط بین گره‌ها نشان‌دهنده میزان همکاری تحقیقاتی بین دو کشور در این حوزه است. رنگ خطوط نیز نشان‌دهنده زمان انجام این همکاری‌ها است. نتایج کلیدی از تحلیل این شکل شامل موارد زیر است:

- چین و آمریکا به عنوان قطب‌های اصلی: چین و آمریکا به عنوان دو قدرت بزرگ در حوزه فناوری و نظامی، بیشترین همکاری‌های تحقیقاتی را با سایر کشورها داشته‌اند و به عنوان قطب‌های اصلی این شبکه شناخته می‌شوند.
- تمرکز همکاری‌ها در اروپا: کشورهای اروپایی مانند آلمان، فرانسه، انگلیس و ایتالیا نیز نقش بسیار مهمی در تحقیقات حوزه سامانه‌های ضد پهپادی داشته‌اند و همکاری‌های گسترده‌ای با یکدیگر و سایر کشورها برقرار کرده‌اند.
- همکاری‌های رو به رشد: افزایش تعداد خطوط و شدت رنگ‌ها در سال‌های اخیر نشان‌دهنده رشد چشمگیر همکاری‌های بین‌المللی در این حوزه است.
- همکاری‌های منطقه‌ای: وجود خوشه‌هایی از کشورها با همکاری‌های متقابل نشان‌دهنده شکل‌گیری همکاری‌های منطقه‌ای در این حوزه است. به عنوان مثال، همکاری‌های نزدیک بین کشورهای اروپایی.

- نقش کشورهای نوظهور: برخی از کشورهای نوظهور مانند چین و کره جنوبی نیز به سرعت در حال افزایش سهم خود در تحقیقات این حوزه هستند.
- اهمیت همکاری‌های بین‌المللی: این شبکه نشان می‌دهد که تحقیقات در حوزه سامانه‌های ضد پهپادی به شدت به همکاری‌های بین‌المللی وابسته است. تبادل دانش، فناوری و منابع بین کشورها به تسریع پیشرفت در این حوزه کمک می‌کند.
- رقابت و همکاری همزمان: در عین حال که همکاری‌های گسترده‌ای بین کشورها وجود دارد، رقابت نیز بین برخی از کشورها برای دستیابی به فناوری‌های برتر در این حوزه وجود دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با افزایش استفاده از پهپادهای کوچک در زمینه‌های مختلف، نیاز به توسعه فناوری‌های شناسایی و ردیابی این دستگاه‌ها به طور فزاینده‌ای احساس می‌شود.

- **حسگرها و تکنیک‌های راداری** :پیشرفت در حسگرهای تصویری، راداری و الکترونیکی، توانایی شناسایی و ردیابی دقیق پهپادها را بهبود بخشیده است. این سیستم‌ها قادرند به سرعت و با دقت بالایی، تهدیدات را شناسایی و موقعیت آنها را مشخص کنند.
- **فناوری‌های هوش مصنوعی** :استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوها به افزایش دقت در شناسایی و ردیابی تهدیدات کمک کرده است. این فناوری‌ها می‌توانند به طور خودکار اطلاعات را پردازش کرده و نتایج را ارائه دهند.

توسعه فناوری‌های انهدام:

به موازات پیشرفت‌های شناسایی، فناوری‌های انهدام نیز در حال توسعه هستند:

- **تسلیحات الکترونیکی** :سیستم‌های جمر (جنگ الکترونیک) قادر به مختل کردن ارتباطات و کنترل پهپادها هستند. این فناوری‌ها به‌ویژه در عملیات‌های نظامی و امنیتی کاربرد دارند.
- **سامانه‌های لیزری و انرژی متمرکز** :استفاده از فناوری‌های لیزری به عنوان یک روش انهدام مؤثر در مقابله با پهپادها، به دلیل دقت و قدرت بالا، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم‌ها قادرند پهپادها را در فواصل دور منهدم کنند.
- **تسلیحات غیرکشنده** :توسعه سیستم‌های غیرکشنده مانند تله‌ها و سیستم‌های محدودکننده حرکت، به نیروهای امنیتی این امکان را می‌دهد که بدون آسیب رساندن به افراد، تهدیدات را کنترل کنند.

تحولات در سیستم‌های کنترل و فرماندهی

سیستم‌های کنترل و فرماندهی به‌عنوان هسته اصلی عملیات‌های دفاعی، به سرعت در حال تحول هستند:

- **تحلیل داده‌های بلادرنگ** :با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته و تحلیل داده‌های بلادرنگ، نیروهای نظامی می‌توانند به‌طور مؤثری به تهدیدات پاسخ دهند و استراتژی‌های مقابله را بهینه‌سازی کنند.
- **یکپارچگی سیستم‌ها** :یکپارچه‌سازی سیستم‌های مختلف شناسایی، ردیابی و انهدام، به نیروهای دفاعی کمک می‌کند تا تصویر جامع‌تری از وضعیت را به‌دست آورند و اقدامات سریع‌تری انجام دهند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

روند توسعه فناوری در حوزه مقابله با پهپادها با چالش‌های متعددی مواجه است:

- **هزینه‌های بالا** :توسعه و پیاده‌سازی سیستم‌های پیشرفته ضد پهپاد ممکن است برای برخی کشورها و سازمان‌ها هزینه‌بر باشد. این موضوع می‌تواند محدودیتی در استفاده از فناوری‌های نوین ایجاد کند.
- **تکنولوژی‌های در حال تغییر** :با پیشرفت فناوری‌های پهپاد و روش‌های جدید برای استفاده از آنها، نیاز به توسعه مداوم و به‌روزرسانی سیستم‌های ضد پهپاد نیز افزایش می‌یابد. این وضعیت نیاز به تحقیق و نوآوری مداوم را برجسته می‌کند.

پیشنهادات

تحلیل و ارزیابی روند توسعه فناوری در سیستم‌های مقابله با پهپادهای کوچک نشان می‌دهد که این حوزه به سرعت در حال تحول است. با افزایش تهدیدات ناشی از استفاده غیرمجاز و خصمانه از پهپادها، کشورهای مختلف و سازمان‌ها به سمت سرمایه‌گذاری در تحقیقات و توسعه فناوری‌های جدید سوق داده شده‌اند.

همکاری‌های بین‌المللی و تبادل اطلاعات :برای مقابله مؤثر با چالش‌ها، همکاری‌های بین‌المللی و تبادل اطلاعات و فناوری میان کشورها و سازمان‌ها بسیار ضروری است. ایجاد شبکه‌های همکاری و مشارکت در پروژه‌های تحقیقاتی می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه کمک کند.

ضرورت نوآوری و تحقیق مداوم :برای موفقیت در این حوزه، لازم است که جامعه بین‌المللی و دولت‌ها بر روی نوآوری و بهبود سیستم‌های ضد پهپاد تمرکز کنند تا بتوانند به‌طور مؤثری با تهدیدات ناشی از استفاده غیرمجاز و خصمانه از پهپادها مقابله کنند.

فهرست منابع

آقابالازاده؛ علی اصغر و محمدی، اردشیر.(۱۳۹۲).**مدیریت صحنه نبرد در پدافند هوایی (اصول اساسی)**، تهران:دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا

پدرام، عبدالرحیم و احمدیان، مهدی و امیرمزلقانی، یوسف (۱۳۹۷). آینده پژوهی در حوزه محصولات ضد پهپاد با استفاده اولویت پابرجا، **آینده پژوهی دفاعی** سال سوم، شماره۱۱

میرزایی کهق، علی.(۱۴۰۲). تحلیل توسعه جهانی مرتبط با ریزپرنده ها در یک دهـه آتـی، آینـده پژوهـی دفـاعی، سال هشتم، شماره ۲۸

بختیاری، امیر و محمدی، اردشیر. (۱۴۰۲). مدیریت تهدیدات ریزورنده ها در محیط عملیاتی آینده، **آینده پژوهی دفاعی** ، دوره هشتم، شماره ۳۱

محمدی، اردشیر و نواده توپچی، حسین و فروزان، ایرج و شـکوهی، حسـین و ایجـابی، ابـراهیم .(۱۴۰۱). مولفـه های اثرگذار بر کشف و مقابله با هواپیماهای بدون سرنشین در صحنه نبرد آینده، **آینده پژوهی دفاعی**، سـال هفتم، شماره ۲۵

بیرانوند، محمود و سیفی گلستان، ابوذر و عیوضی، محمد رحیم. (۱۳۹۹). مطالعه علم سـنجی تولیـدات پژوهشـی در حوزه آینده نگاری راهبردی،**آینده پژوهی دفاعی**، سال پنجم، شماره ۱۹

ایوبی، علی و غفاری، حمید رضا.(۱۳۹۸). آینده پژوهی در پهپاد کوادروتور به کمک کنترل فازی و ازدحام ذرات، **آینده پژوهی دفاعی**، سال چهارم، شماره ۱۲

مختاریان، علـی (۱۳۸۱). **پرنده‌های بدون سرنشین به عنـوان اهـداف کـاذب** ، معاونـت پشـتیبانی، مهندسـی و تحقیقات صنعتی، گروه پهپاد۳(۱۱):۴۵-۶۶

رضایی، بهرام و پرتوی، محمد تقی و نصیرپور، غلامرضا.(۱۳۹۱). شبیه‌سازی کشف و شناسایی تهدیـدات هـوایی در سامانه‌های فرماندهی و کنترل، **فصلنامه علوم و فنون نظامی**، ۱۲۵:۲۲-۱۴۰

شریفی تهرانی، امید و صادقی، علیرضا و علـوی، سـید محمـد.(۱۳۹۹). چـالش آینـده یکپارچـه سـازی پهپـاد و اخلالگر، **فصلنامه مطالعات جنگ**، سال دوم، شماره ششم، ۵۳-۷۰

شریفی تهرانی، امید و لشگریان، حمیدرضا (۱۳۹۶)، نقش پهپاد در حوزه جنگ الکترونیک، نیازها و چالش‌هـای تلفیق، **سومین کنفرانس ملی اویونیک**، دانشگاه هوایی ارتش، ایران.

یزدان پناه، رهام و دیگران (۱۳۸۹)، آینده‌پژوهی فناوری‌های حوزه جنگ الکترونیک و تعیین نقاط قوت، ضعف، فرصتها و تهدیدات این حوزه، **چهارمین کنفرانس ملی مدیریت تکنولوژی ایران**، ایران.

Holland, M.A. (2018). Counter-Drone Systems. Center for the Study of the Drone at Bard College, Feburary http://dronecenter.bard.edu/counter-drone-systems./

Georgia Lykou, Dimitrios Moustakas and Dimitris Gritzalis, (2020), Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber- Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies, Sensors 2020, 20, 3537; doi:10.3390/s20123537

Altuntas, S. & Aba, S. (2022). Technology Forecasting of Unmanned Aerial Vehicle Technologies through Hierarchical S-Curves, Defence Science Journal, 72(1): 18-29, DOI: 10. 14429/dsj. 72. 16823

Battsengel, G. Geetha, S. & Jeon J. (2020). Analysis of technological trends and technological portfolio of unmanned aerial vehicle. J. Open Innov. Technol. Mark. Complex, 6(3): 48. doi: 10. 3390/joitmc6030048

Liu, Q. Ge, Z. & Song, W. (2016). Research based on patent analysis about the present status and development trends of unmanned aerial vehicle in China. Open J. Soc. Sci. 4(7): 172–181. doi: 10. 4236/jss. 2016. 47027.

Mueller, T. J. (2009). On the Birth of Micro Air Vehicles. International Journal of Micro Air Vehicles, 1(1): 1-12.

PS, R. & Jeyan, M. L. (2020). Mini Unmanned Aerial Systems (UAV) – A Review of the Parameters for Classification of a Mini UAV. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 7(3): 1-21

ATP 3-01.81 (Aug 2023) Counter-Unmanned Aircraft System Techniques, Department of the Army, Washington DC.

ATP 3.3.8.1 (May 2019), Minimum Training Requirements For Unmanned Aircraft Systems (UAS) Operators And Pilots, NATO, Brussels.

Aouladhadj D., Kpre E., Deniau V., Kharchouf A., Gransart Ch., Gaquire, Ch. Drone (2023.09.04), Detection and Tracking Using RF Identication Signals, Special Issue "UAV Detection, Classication, and Tracking" Sensors 2023, 23(17), 77650, Available: https://doi.org/10.3390/s23177650.

Časar, J., Starý, V. and Hanuš, V., (2023), May. Evaluation metodology for counter unmanned aerial system detectors. In 2023 International Conference on Military Technologies (ICMT) (pp. 1-5). IEEE, DOI: .

Classication of the Unmanned Aerial Systems, (2023.04.02), Available: https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/5.

CRS (2023.08.24), Navy Shipboard Lasers: Background and Issues for Congress, Available: https://sgp.fas.org/crs/weapons/ R44175.pdf

Konrad Dobija.(2023). Countering Unmanned Aerial Systems (UAS) in Military Operations, Safety & Defense 9(1):74-82, DOI:10.37105/sd.195

Michalski D. & Michalska A., (2017)"Protection against drone activity", Security Forum, vol. 1, no. 1, pp. 73-83, ISSN 2857-3691 https://wsb.edu.pl/files/pages/634/security_forum_01_2017_8druk.pdf.

Gupta Suraj G., Ghonge Mangesh M., Jawandhiya P. M. (2013), Review of Unmanned Aircraft Robin Radar (2023), 10 Types of Counter Drone Technology To Detect And Stop Drones Today, Available: