

## شناسایی پهپادهای کوچک بال ثابت از مولتی روتور با استفاده از ویژگی های آماری برگرفته از تشدیدهای طبیعی مختلط

محمد مهدی فرج الهی<sup>۱\*</sup>، محمد جواد بابایی<sup>۲</sup>، نادعلی زارعی<sup>۳</sup>، محمد مهدی فریدونی<sup>۴</sup>، محمود آذری<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری برق، دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، ۳. استادیار، دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۴. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۵. دانشجوی دکتری برق، دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

### چکیده

استفاده گسترده از پهپادهای کوچک در میدان های نبرد مدرن، تهدید جدی علیه نیروها و تجهیزات نظامی محسوب شده و لزوم توسعه روش های شناسایی را پررنگ کرده است. روش های سنتی به دلیل وابستگی به پارامترهایی مانند زاویه دید، برد، قطبش و همچنین ویژگی های ذاتی پهپادهای کوچک نظیر پرواز در ارتفاع اندک، سرعت پایین، مانورپذیری بالا و سطح مقطع راداری کم با محدودیت هایی مواجه اند. این پژوهش با بهره گیری از نظریه گسترش تکینگی، روش شناسایی سیستم با دو معیار RMSE تطبیقی و ثابت، ویژگی های آماری اهداف را استخراج و تعدادی فضای ویژگی چندبعدی از صفرها و قطب های تابع تبدیل هدف در ناحیه تشدید معرفی می نماید. برای ارزیابی، مدل های سه بعدی پهپاد کوچک بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ در بازه فرکانسی ۱۲۰-۶۰۰ مگاهرتز و سطوح مختلف SNR شبیه سازی شدند. نتایج نشان می دهد تشدیدهای طبیعی مختلط که وابسته به شکل، ابعاد و جنس هدف هستند، پایه قابل اعتمادی برای شناسایی پهپادهای کوچک را فراهم می کنند. افزایش SNR از ۱۳ به ۱۹ دسی بل، RMSE تطبیقی را ۲۴٪ بهبود بخشید، در حالی که RMSE ثابت با دقت کمتر، زمان پردازش را ۹۹٪ کاهش داد.

**واژه های کلیدی:** پهپاد کوچک مولتی روتور، پهپاد کوچک بال ثابت، تشدیدهای طبیعی مختلط، ویژگی های آماری، روش شناسایی سیستم

## Recognition of Fixed Wing Small Unmanned Aerial Vehicles (SUAVs) from Multirotor Using Statistical Features Derived from Complex Natural Resonances

Mohammad Mahdi Farajollahi<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Babae<sup>2</sup>, Nadali Zarei<sup>3</sup>,  
Mohammad Mahdi feraidooni<sup>4</sup>, Mahmoud Azari<sup>5</sup>

1. Ph.D. Student in Electricity, Electronic Warfare Engineering, Faculty of Electricity, Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein University, Tehran, Iran

2. MSc. Student in Electricity, Electronic Warfare Engineering, Faculty of Electricity, Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Faculty of Electricity, Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein University, Tehran Iran

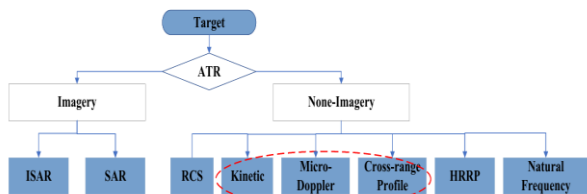
4. Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran Iran

5. Ph.D. Student in Electricity, Electronic Warfare Engineering, Faculty of Electricity, Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein University, Tehran, Iran

### Abstract

The widespread use of SUAVs in modern battlefields poses a serious threat to military forces and equipment and highlighting the need to develop recognition methods. Traditional techniques face major limitations due to their dependence on parameters such as aspect angle, range and polarization, as well as the inherent characteristics of SUAVs, including low altitude flight, low speed, high maneuverability, and small RCS. This study, by using the Singularity Expansion Method, the system identification approach and employing adaptive and fixed RMSE criteria extracts the statistical features of the targets and introduces some multidimensional feature spaces constructed from the zeros and poles of the target's transfer function in the resonances. For evaluation, 3D models of a fixed wing SUAV (Skylark) and a multirotor (Matrice 400) were simulated over the 120–600 MHz frequency range and under various SNR levels. The results indicate that the complex natural resonances depending on the target's geometry, dimensions, and material provide a reliable basis for recognizing SUAVs. Increasing the SNR from 13 to 19 dB improved the adaptive RMSE by 24%, while the fixed mode, despite its lower accuracy, reduced processing time by 99%.

**Key words:** Fixed-Wing SUAV, Multi-Rotor SUAV, Complex Natural Resonances, Statistical Features, System Identification Method



شکل ۱ - فلوچارت طراحی یک رادار بر اساس روش‌های مختلف شناسایی هدف خودکار (دایره چین قرمز محل مربوط به رادار کشف پهپاد را نشان می‌دهد). [۱]

جدول ۱: تعدادی از رادارهای کشف پهپاد [۱]

نام محصول	کشور	باند	برد (km)	ویژگی اصلی شناسایی
Retinar FAR-AD	ترکیه	Ku	۴.۴	میکرو داپلر
Hensoldt-Spexer 2000	آلمان	X	۶	میکرو داپلر، خط سیر <sup>۶</sup>
Aveillant-Gamekeeper	بریتانیا	L	۵	میکرو داپلر، خط سیر
Obsidian	بریتانیا	X	۲	میکرو داپلر
Blighter-A800	بریتانیا	Ku	۳	میکرو داپلر
Weibel - XENTA-M1	دانمارک	X	۱۰	میکرو داپلر
Retia - ReGUARD	جمهوری چک	X	۶	RCS
ART-ART Midrange 3D	اسپانیا	X	۳.۶	میکرو داپلر
ELM/2026BF	اسرائیل	X	۵.۲	خط سیر
Elbit system-DAiR <sup>TM</sup>	اسرائیل	X	۶	میکرو داپلر، خط سیر
ELVIRA	هلند	X	۲.۷	میکرو داپلر
Thales-GO20 MM	فرانسه	X	۴	میکرو داپلر
Thales-SQUIRE	فرانسه	X	۶	میکرو داپلر
SAAB-Giraffe 1X	سوئد	X	۴	میکرو داپلر، خط سیر
Leonardo DRS-RPS-42	ایتالیا و آمریکا	S	۱۰	میکرو داپلر

ویژگی پیشنهادی در مقاله قبل، علاوه بر حالت  $RMSE^7$  تطبیقی، حالت  $RMSE$  ثابت نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج گویای آن بود که حالت تطبیقی نسبت به حالت ثابت از دقت بالاتری بهره می‌برد که این امر نیازمند زمان پردازش بیش‌تر است. ایشان در [۴]، استفاده از فضاهای پیشنهادی در تحقیقات دریایی را در حوزه‌ی هوایی استفاده

در دهه ۲۰۲۰، پهپادها به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده در میدان‌های نبرد ظاهر شدند و نقش آن‌ها در تغییر موازنه‌ی قدرت به طور گسترده مورد توجه قرار گرفت. به‌عنوان نمونه، نبرد دوم قره‌باغ در سال ۲۰۲۰ نشان داد که بهره‌گیری سازمان‌یافته از پهپادهای رزمی می‌تواند سامانه‌های دفاعی کلاسیک را با چالش‌های جدی مواجه سازد. همچنین، جنگ اوکراین و روسیه که در سال ۲۰۲۲ آغاز شد، استفاده‌ی گسترده از پهپادهای شناسایی و رزمی را به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از راهبردهای نظامی مطرح کرد و ابعاد جدیدی از کاربرد جنگ‌افزارهای بدون سرنشین را نمایان ساخت. نهایتاً، در جنگ دوازده‌روزه ایران و اسرائیل که در بازه ۱۳ تا ۲۴ ژوئن ۲۰۲۵ رخ داد، پهپادهای شناسایی، رزمی و ریزپرنده‌ها نقشی گسترده ایفا کردند و اهمیت بهره‌گیری و هماهنگی این ابزارها در نبردهای آینده بیش‌ازپیش روشن شد. این تحولات تاریخی بیانگر آن است که کشف، شناسایی و مقابله با پهپادها و ریزپرنده‌ها، اکنون به یکی از نیازهای اساسی سامانه‌های دفاعی در نبردهای مدرن تبدیل شده است.  $RCS^1$  بسیار کم و استفاده‌ی گروهی از پهپادها در شرایطی همچون حالت swarm به چالشی اساسی برای سامانه‌های مراقبتی تبدیل شده است [۱]. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری‌های شناسایی هدف خودکار<sup>۲</sup> رخ داده است که عمدتاً به دلیل ظهور روش‌های یادگیری عمیق<sup>۳</sup> است. بااین‌حال، لازم به ذکر است که روش‌های یادگیری عمیق بیشتر به‌عنوان یک ابزار عمل می‌کنند تا اینکه خودشان امضا باشند. داده‌هایی که در سامانه‌های شناسایی هدف خودکار مورد پردازش قرار می‌گیرند شامل داده‌های تصویری و غیر تصویری هستند. تصاویر راداری شامل تصاویر رادار روزنه ترکیبی<sup>۴</sup> و رادار روزنه ترکیبی معکوس<sup>۵</sup> می‌شوند. رادار روزنه ترکیبی معمولاً در سامانه‌های راداری هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، درحالی‌که رادار روزنه ترکیبی معکوس بیشتر در سامانه‌های راداری دریا پایه رایج است. در زمینه شناسایی خودکار اهداف، تمرکز بر سامانه‌های راداری زمین پایه است. شکل ۱ روش‌های مختلف شناسایی هدف خودکار را به نمایش می‌گذارد [۱]. راهکارهای سنتی شناسایی هدف خودکار معمولاً از رویکرد تطبیق الگو استفاده می‌کنند که شامل دو گام کلیدی است: استخراج ویژگی و شناسایی الگو. در نتیجه، امضاهای راداری نقش حیاتی در مراحل اولیه ایفا می‌کنند [۱]. در جدول ۱، تعدادی از سامانه‌های راداری کشف پهپاد در کشورهای مختلف قابل مشاهده است. نویسندگان این مقاله در [۲] به پیشنهاد فضای ویژگی متمایز کننده‌ی کشتی از دکوی غیر فعال دریایی مبتنی بر روش شناسایی سیستم پرداخته و تعدادی فضای ویژگی در این حوزه پیشنهاد نمودند. سپس در [۳] علاوه بر افزایش تعداد اهداف و SNR، به منظور ارزیابی زمان پردازش استخراج فضای

<sup>5</sup> Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR)

<sup>6</sup> Trace

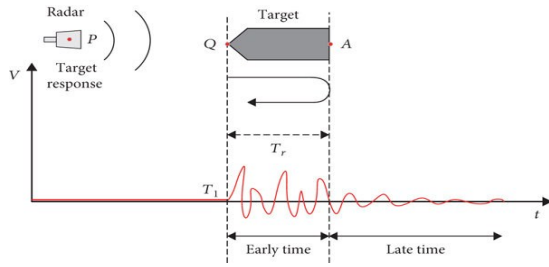
<sup>7</sup> Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>1</sup> Radar Cross Section (RCS)

<sup>2</sup> Automatic Targer Recognition (ATR)

<sup>3</sup> Deep Learning (DL)

<sup>4</sup> Synthetic Aperture Radar (SAR)

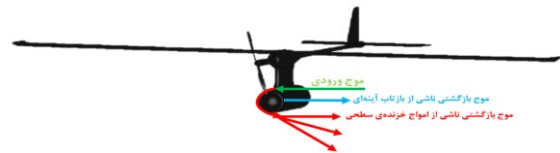


شکل ۳ - پاسخ زودرس و دیررس یک هدف [۸]

تشدیدهای طبیعی مختلط در بخش دیررس سیگنال قرار دارند؛ از این رو، بیشتر پژوهشگران تنها به بررسی پاسخ دیررس می‌پردازند. پاسخ تشدید خود دارای مدل ARMA است، که در آن پاسخ زودرس بخش  $MA^7$  و پاسخ دیررس بخش  $AR^8$  مدل را تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه تمرکز اکثر پژوهشگران بر بخش دیررس است، از روش‌های مبتنی بر مدل AR، مانند روش پرونی<sup>۹</sup>، مداد ماتریس<sup>۱۰</sup> و سایر روش‌ها، برای تخمین این بخش استفاده می‌شود. مشکل اصلی استفاده از این روش‌ها، نیاز به جداسازی دقیق پاسخ دیررس است. در شرایطی که نسبت سیگنال به نویز پایین باشد یا هدف دارای تشدیدهای طبیعی مختلط زیادی باشد، جداسازی بخش دیررس بسیار دشوار خواهد بود. هرچند پاسخ زودرس سیگنال ویژگی‌های بخش دیررس را ندارد، اما خالی از اطلاعات نیست. با استفاده از روش شناسایی سیستم مبتنی بر مدل ARMA، نه تنها نیازی به جداسازی بخش دیررس نیست، بلکه می‌توان از اطلاعات موجود در بخش زودرس، که همان بخش MA پاسخ است، نیز بهره برد. مقالات مرتبط با شناسایی هدف مبتنی بر پاسخ تشدید و تابع تبدیل را می‌توان در چهار دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی کرد: دسته‌ی نخست به ارائه‌ی روش‌هایی برای تشخیص لحظه‌ی آغاز پاسخ دیررس و جداسازی آن از پاسخ زودرس اختصاص دارند (مراجع [۹-۱۳]). دسته‌ی دوم به معرفی روش‌های نوین استخراج تشدیدهای طبیعی مختلط با بهره‌گیری از مدل‌های AR و ARMA می‌پردازند (مراجع [۱۴-۱۸]) و اغلب بر پایه‌ی روش‌های دسته‌ی نخست توسعه یافته‌اند. دسته‌ی سوم با استفاده از روش‌های دو دسته‌ی قبل، به پیشنهاد فضاهای ویژگی جدید برای تمایز اهداف و توسعه‌ی کتابخانه‌ی اهداف راداری می‌پردازند (مراجع [۱۹-۲۳]). به‌عنوان نمونه، نویسندگان [۱۵] در سال ۲۰۲۴ روش حوزه‌ی فرکانس مقاله‌ی قبلی را در [۲۱] برای اهداف هوایی به‌کار گرفتند و نویسندگان [۱۹] نیز در سال ۲۰۲۰ همان روش را در سال ۲۰۲۱ در [۲۰] برای مسئله‌ی دیگر تکرار کردند. دسته‌ی چهارم به مقایسه و ارزیابی روش‌های استخراج قطب و تحلیل اثربخشی فضاهای ویژگی می‌پردازند (مراجع [۲۴، ۲۵]). برای مثال، مقاله‌ی [۲۴] روش‌های پرونی و مداد ماتریس (زمانی) را با روش‌های کوشی و

نموده و به تمایز جنگنده از دکوی غیر فعال هوایی پرداختند. حال به دلیل اهمیت روز افزون شناسایی پهپادهای بال ثابت و مولتی روتورها بر آن شدیم تا عملکرد فضاهای ویژگی پیشنهادی در تحقیقات گذشته در این حوزه نیز بررسی نموده و علاوه بر فضاهای ویژگی پیشنهادی گذشته، فضاهای جدیدی نیز ارائه نماییم.

در این تحقیق به دنبال شناسایی و تمایز پهپاد بال ثابت از مولتی روتور در  $SNR^1$  های ۱۳، ۱۶، ۱۸ و ۱۹ dB در ناحیه‌ی تشدید و پیشنهاد فضای ویژگی هستیم. وقتی سیگنال تحریک ارسالی به گونه‌ای انتخاب شود که هدف را وارد ناحیه‌ی تشدید کند، سیگنال بازگشتی را می‌توان به صورت جمع آثار دو مؤلفه‌ی پاسخ زودرس و پاسخ دیررس مدل‌سازی کرد. منظور از ناحیه‌ی تشدید، حالتی است که شرط  $\lambda \leq D \leq 10\lambda$  برقرار باشد؛ در این رابطه  $\lambda$  همان طول موج سیگنال تحریک و  $D$  بیانگر ابعاد هندسی هدف است. در صورتی که این شرط برقرار باشد، به این معناست که سیگنال ارسالی شامل فرکانس‌های طبیعی (تشدید) هدف است. پاسخ هدف به چنین سیگنالی را پاسخ طبیعی یا پاسخ تشدید می‌نامند. در این تحقیق، هر هدف به‌عنوان یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان مدل‌سازی شده است. با استفاده از سیگنال ارسالی و میدان الکتریکی دور به‌دست آمده، تابع تبدیل هر سیستم در ناحیه‌ی تشدید با روش شناسایی سیستم و مدل  $ARMA^2\_TLS^3$  محاسبه شد. سپس، ریشه‌های چندجمله‌ای صورت و مخرج تابع تبدیل استخراج گردیدند. ریشه‌های صورت همان صفرهای تابع تبدیل و ریشه‌های مخرج آن، قطب‌های تابع تبدیل نامیده می‌شوند. این قطب‌ها همچنین به‌عنوان قطب‌های طبیعی یا تشدیدهای طبیعی مختلط شناخته می‌شوند. مطابق نظریه‌ی  $SEM^4$  که توسط پروفسور کارل ادوارد باوم<sup>۵</sup> ارائه شد، تشدیدهای طبیعی مختلط یک هدف مستقل از زاویه‌ی دید، شکل موج ورودی، قطبش، سرعت، حرکت، برد و ارتفاع هدف هستند [۵-۷]. وی بر این باور بود که تشدیدهای طبیعی مختلط به شکل، جنس و ابعاد هدف وابسته هستند و می‌توان از آن‌ها برای شناسایی اهداف غیرهمکار بهره گرفت. همان‌طور که ذکر شد، پاسخ تشدید هر هدف مطابق شکل‌های ۲ و ۳، جمع آثار دو مؤلفه‌ی پاسخ زودرس و پاسخ دیررس است. پاسخ زودرس ناشی از بازتاب‌های آینه‌ای از سطح هدف و پاسخ دیررس ناشی از امواج خزنده‌ی سطحی است.



شکل ۲ - بازتاب آینه‌ای و برگشتی امواج خزنده<sup>۶</sup> از سطوح دماغه و بدنه‌ی پهپاد کوچک بال ثابت اسکای لارک

<sup>6</sup> Creeping waves

<sup>7</sup> Moving Average (MA)

<sup>8</sup> Auto Regressive (AR)

<sup>9</sup> Prony Method

<sup>10</sup> Matrix Pencil Method (MPM)

<sup>1</sup> Signal to Noise Ratio (SNR)

<sup>2</sup> Auto Regressive Moving Average (ARMA)

<sup>3</sup> Total Least Square (TLS)

<sup>4</sup> Singularity Expansion Method (SEM)

<sup>5</sup> Carl E. Baum

سوی دیگر، رادارهای FMCW نیز با وجود نبود برد کور، به طور ذاتی برد کشف کوتاه‌تری دارند.

در ادامه در بخش ۲ به مبانی نظری و در بخش ۳ نیز به ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی می‌پردازیم. در بخش ۴ نیز نتیجه‌گیری و جمع‌بندی بیان شده است.

## ۲- مبانی نظری

اگر سیگنال تحریک ارسالی به سمت هدف را  $X(n)$  در نظر بگیریم، پاسخ تشدید  $Y(n)$  از هدف، به صورت میدان الکتریکی دور، دریافت خواهد شد. این پاسخ را می‌توان مطابق رابطه‌ی (۱) بیان کرد [۲-۴].

$$Y(n) = Y_{early} + Y_{late} + \varepsilon_n \quad (1)$$

در این رابطه،  $Y(n)$  پاسخ تشدید هدف،  $Y_{early}$  پاسخ زودرس،  $Y_{late}$  پاسخ دیررس و  $\varepsilon_n$  نویز اضافه شده است. برای مدل‌سازی، فرض می‌شود که سیگنال تحریک  $X(n)$  و سیگنال پاسخ دریافتی از هدف  $Y(n)$  توسط یک رابطه‌ی ARMA مشابه رابطه‌ی (۲) به یکدیگر مرتبط هستند [۲-۴].

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_K z^{-K}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_L z^{-L}} \quad (2)$$

در واقع، ضرایب  $a_i$  مربوط به قطب‌های تابع تبدیل و ضرایب  $b_i$  مربوط به صفرهای تابع تبدیل هستند. مرتبه‌ی صورت تابع تبدیل  $K$  و مرتبه‌ی مخرج آن  $L$  است. ابتدا باید ضرایب  $a_i$  و  $b_i$  را بر اساس سری‌های زمانی نمونه‌برداری شده‌ی سیگنال تحریک  $X(n)$  و پاسخ نمونه‌برداری شده از هدف  $Y(n)$  محاسبه کرد. سپس، معادله‌ی ماتریسی (۳) تشکیل داده می‌شود. فرض می‌کنیم تعداد درایه‌های  $X(n)$  برابر  $M$  و تعداد درایه‌های  $Y(n)$  نیز برابر  $N$  است. دو حالت ممکن است رخ دهد: یا  $M = N$  که شرایط ایده‌آل است، یا  $M \neq N$ . در حالت دوم، برای برابر کردن تعداد درایه‌ها، به برداری که تعداد درایه‌های آن کمتر است، صفر اضافه می‌کنیم. پس از این مرحله، معادله‌ی ماتریسی (۳) تشکیل داده می‌شود [۲-۴].

$$\begin{bmatrix} Y(2) & \dots & Y(1+1) & X(1) & \dots & X(K+1) \\ Y(3) & \dots & Y(1+2) & X(2) & \dots & X(K+2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(N-L+1) & \dots & Y(N) & X(N-L) & \dots & X(N-L+K) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (K+1+L)} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_L \\ b_0 \\ \vdots \\ b_K \end{bmatrix}_{(L+K+1) \times 1} = \begin{bmatrix} Y(1) \\ Y(2) \\ \vdots \\ Y(N-L) \end{bmatrix}_{(N-L) \times 1} \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) را همچنین می‌توان به شکل رابطه‌ی (۴) نمایش داد [۲-۴].

$$[D_{YX}] \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = Y$$

اگر معادله‌ای به صورت  $AX \approx B$  داشته باشیم و ماتریس  $A$  قابل معکوس‌گیری نباشد، می‌توان از روش  $LS^3$  و یا TLS برای حل آن

$VCM^1$  (فرکانسی) مقایسه کرده است. نتایج [۲۴] نشان می‌دهد روش‌های زمانی ضمن بهره‌مندی از زمان پردازش کم‌تر به دلیل داشتن ضریب  $R^2$  بالاتر، عملکرد دقیق‌تری دارند، هرچند به جدا سازی پاسخ دیررس و هزینه‌ی سخت‌افزاری بیشتری نیازمندند. در حالی که روش‌های کوشی و VCM مبتنی بر مدل ARMA نه تنها تعداد نمونه‌های کم‌تری برای بازسازی سیگنال نیز دارند بلکه هزینه‌ی سخت‌افزاری کم‌تری نیز احتیاج دارند.

این مقاله از دسته‌ی سوم بوده و با بهره‌گیری از روش شناسایی سیستم مبتنی بر مدل ARMA-TLS در حوزه‌ی زمان، فضای ویژگی جدیدی برای شناسایی پهپاد کوچک بال ثابت از مولتی روتور ارائه می‌کند. نوآوری آن در مقایسه‌ی چندبعدی ریزپرنده‌ها بر پایه‌ی پاسخ تشدید است که تاکنون انجام نشده بود. همچنین بر اساس [۹] و [۱۸]، عملکرد شناسایی در رادارهای رزونانسی وابسته به کتابخانه‌ی قطب‌های اهداف است و در صورت مطابقت قطب‌های هدف ناشناس با کتابخانه، نوع و ویژگی‌های فیزیکی هدف قابل تشخیص خواهد بود. لذا بنا بر آنچه بیان شد به منظور غنی‌تر کردن کتابخانه‌ی اهداف و بهره‌مندی همزمان از مزایای روش‌های حوزه‌ی زمان و روش‌های مبتنی بر مدل ARMA از روش شناسایی سیستم در حوزه‌ی زمان استفاده نمودیم.

رادار یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های ضدپهپاد است و معمولاً به صورت پالسی یا  $FMCW^2$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. رادارهای پالسی سنتی عمدتاً در باندهای بالاتر مانند  $X$  و  $Ku$  فعالیت می‌کنند. با وجود برد بلند، این رادارها در مواجهه با پهپادهای کوچک با RCS بسیار پایین تنها قادر به کشف هدف در فواصل بسیار نزدیک هستند؛ فاصله‌ای که اغلب در برد کور رادار قرار می‌گیرد و امکان شناسایی را با مشکل جدی مواجه می‌سازد. رادار پیشنهادی ما با استفاده از فرکانس‌های پایین‌تر در بازه‌ی ۱۲۰ تا ۶۰۰ مگاهرتز عمل می‌کند؛ بازه‌ای که پهپاد در آن وارد ناحیه‌ی رزونانسی می‌شود. این انتخاب باند فرکانسی دو مزیت اساسی ایجاد می‌کند.

۱. افزایش توان دریافتی به علت طول موج بلندتر: طبق معادله‌ی رادار، توان دریافتی با مجذور طول موج نسبت مستقیم دارد؛ بنابراین استفاده از طول موج‌های بلندتر (باند پایین) نسبت به باندهای  $X$  و  $Ku$  موجب افزایش قابل توجه توان دریافتی می‌شود.

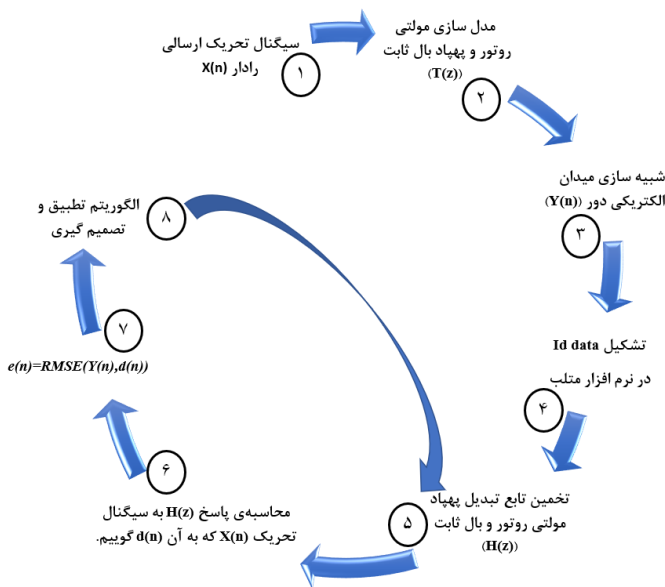
۲. افزایش توان دریافتی به علت RCS بیشینه: در ناحیه‌ی تشدید، RCS ریزپرنده به بیشینه مقدار نسبی خود می‌رسد. از آنجا که RCS نیز در معادله‌ی رادار نسبت مستقیم با توان دریافتی از ریزپرنده دارد، این افزایش موجب افزایش توان دریافتی در رادار خواهد شد.

با ترکیب دو مزیت یاد شده، رادار پیشنهادی قادر است ریزپرنده را در فواصل دورتر و خارج از برد کور شناسایی کند؛ موضوعی که برای رادارهای پالسی سنتی در باندهای  $S$ ،  $X$  و  $Ku$  امکان‌پذیر نیست. از

<sup>3</sup> Least Square (LS)

<sup>1</sup> Vector fitting Cauchy Method (VCM)

<sup>2</sup> Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW)



شکل ۴: بلوک دیاگرام روند استخراج تابع تبدیل

در این ساختار،  $(T(z))$  نمایانگر مدل واقعی پهپاد کوچک بال ثابت یا ریزپرنده است که هدف از شناسایی، دستیابی به مدل آن است. تابع  $(H(z))$  نیز مدل تخمین زده شده یا تابع تبدیل حاصل از فرایند شناسایی سیستم است. عبارت  $(d(n))$  پاسخ تابع تبدیل تخمینی به سیگنال تحریک ورودی و  $(e(n))$  خطای  $RMSE$  میان پاسخ تشدید دریافتی از هدف و پاسخ تولیدشده توسط مدل تخمینی را نشان می دهد. بلوک الگوریتم تطبیق و تصمیم گیری پس از محاسبه  $(e(n))$  در هر گام، تصمیم می گیرد که آیا فرایند مدل سازی باید خاتمه یابد یا امکان بهبود بیشتر و کاهش خطا در گام بعدی وجود دارد.

### ۳- نتایج شبیه سازی

#### ۳-۱- پالس تحریک

در کاربردهای عملی، انتخاب پالس به عوامل متعددی وابسته است و راندمان تابش و شکل طیفی از مهم ترین ملاحظات در این زمینه به شمار می روند. از آن جا که سیگنال فرایه ن باند معمولاً به صورت یک سیگنال باند پایه ارسال می شود، برای دستیابی به تابش کارآمد باید پالس ارسالی فاقد هرگونه مؤلفه جریان مستقیم باشد تا انرژی به طور مؤثر در باند فرکانسی مورد نظر گسیل شود. افزون بر این، برای دستیابی به بیشترین توان تابشی در محدوده ی مجاز تعیین شده توسط کمیسیون ارتباطات فدرال، ضروری است که پالس ارسالی دارای طیفی نسبتاً مسطح در پهنا ی باند هدف باشد. در میان انواع پالس هایی که تعاریف ریاضی مشخصی دارند، معمولاً از مونو سایکل های گوسی<sup>۶</sup>، دوبلت گوسی<sup>۷</sup>، مونو سایکل های رایلی<sup>۸</sup> و مونو سایکل های منچستر<sup>۹</sup> به طور

استفاده کرد. در روش LS با استفاده از رابطه ی (۵) می توانیم  $X_{LS}$  را محاسبه نمود [۲-۴].

$$X_{LS} = (A^H A)^{-1} A^H B = A^+ B \quad (5)$$

در این رابطه،  $H$  نمایانگر هر میتین<sup>۱</sup> و  $(+)$  نمایانگر عملگر ماتریس شبیه معکوس مور-پنروز<sup>۲</sup> است. بنابراین، رابطه ی (۴) را می توان بر اساس رابطه ی (۵) به شکل رابطه ی (۶) نمایش داد [۲-۴].

$$\begin{bmatrix} a \\ \dots \\ b \end{bmatrix} = [D_{YX}]^+ Y \quad (6)$$

پس از محاسبه ی ضرایب چند جمله ای های صورت و مخرج، ریشه های آن ها با مساوی صفر قرار دادن چند جمله ای ها به دست می آید. سپس، با قرار دادن ریشه های صورت و مخرج در رابطه ی (۷)، می توان قطب ها و صفرها را در حوزه ی لاپلاس محاسبه کرد [۲-۴].

$$s_k = \frac{1}{T_s} \ln(Z_k) \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (7)$$

در این رابطه،  $s_k = \sigma \pm j2\pi f_r$  است که  $s_k$  نشان دهنده ی تشدید طبیعی مختلط،  $\sigma$  عامل میرایی<sup>۳</sup> و  $f_r$  فرکانس طبیعی<sup>۴</sup> (تشدید) است. برای حل معادله ی (۴) با استفاده از روش TLS، ابتدا باید ماتریس  $W$  را تشکیل دهیم [۲-۴].

$$W = [D_{YX}; Y] \quad (8)$$

سپس، در رابطه ی (۹)،  $SVD^5$  ماتریس  $W$  انجام می شود [۲-۴].

$$[U, \Sigma, V] = SVD(W) \quad (9)$$

سپس، در رابطه ی (۱۰)، ابعاد ماتریس  $[D_{YX}]$  محاسبه می شوند [۲-۴].

$$[m, nn] = size([D_{YX}]) \quad (10)$$

حال در (۱۱) و (۱۲)  $V_{YY}$  و  $V_{XY}$  را محاسبه می نمایم [۲-۴]:

$$v_{xy} = v(1:nn, 1+nn:end) \quad (11)$$

$$v_{yy} = v(1+nn:end, 1+nn:end) \quad (12)$$

لازم به ذکر است همان طور که پیش تر بیان شد برای استفاده از روش حداقل مربعات کل لازم است  $V_{YY} \neq 0$  باشد. اینک با استفاده از رابطه ی (۱۳) بردار ضرایب چند جمله ای های صورت و مخرج را محاسبه می نمایم [۲-۴].

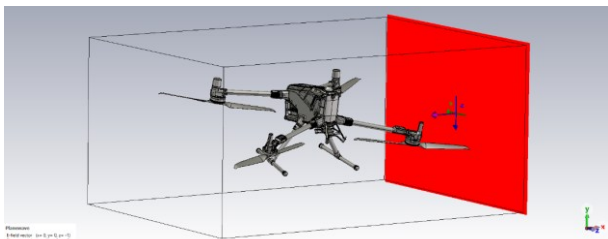
$$\begin{bmatrix} a \\ \dots \\ b \end{bmatrix} = \frac{-V_{XY}}{V_{YY}} \quad (13)$$

پس از محاسبه ی ضرایب چند جمله ای های صورت و مخرج، می توانیم ریشه های صورت و مخرج را با مساوی صفر قرار دادن چند جمله ای های صورت و مخرج به دست آوریم. سپس با قرار دادن ریشه های صورت و مخرج در (۷) می توان قطب ها و صفرها را در حوزه ی لاپلاس محاسبه نمود. روند پیاده سازی مطبق شکل ۴ است [۴].

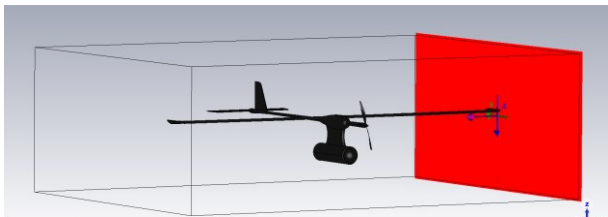
<sup>6</sup> Gaussian monocycles  
<sup>7</sup> Gaussian doublet  
<sup>8</sup> Rayleigh monocycles  
<sup>9</sup> Manchester monocycles

<sup>1</sup> Hermitian  
<sup>2</sup> Moore\_Penrose  
<sup>3</sup> Damping factor  
<sup>4</sup> Natural Frequency (NF)  
<sup>5</sup> Singular Value Decomposition (SVD)

۸ و جدول ۲ تصاویر مدل‌های سه‌بعدی اهداف و مشخصات هر یک را نمایش می‌دهند.



شکل ۷ - مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ از جنس PEC<sup>۲</sup>



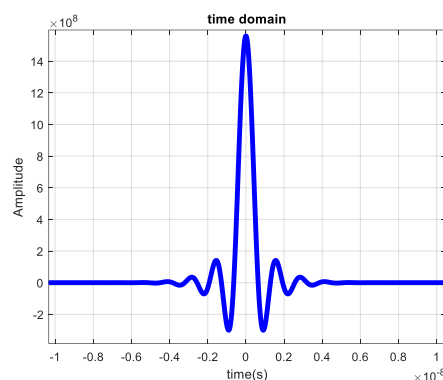
شکل ۸ - پهپاد کوچک بال ثابت اسکای لارک از جنس PEC

جدول ۲ - مشخصات مدل‌های سه بعدی اهداف

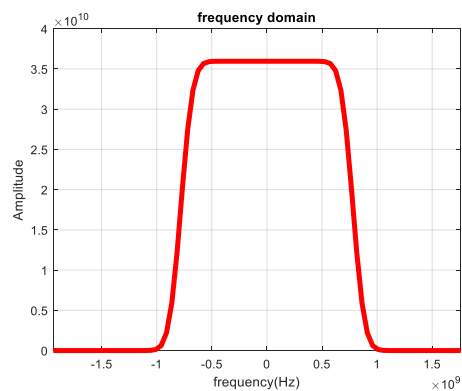
نام هدف	طول	طول بال‌ها	ارتفاع	جنس
ماتریس ۴۰۰	۰.۹۸m	۰.۷۶m	۰.۴۸m	PEC
اسکای لارک	۲.۲m	۲.۴m	۰.۴۸m	PEC

همان‌طور که بیان شد برای شناسایی هدف با استفاده از تشدیدهای طبیعی مختلط لازم است طول موج سیگنال تحریک ارسالی به نحوی انتخاب شود که در ناحیه‌ی تشدید قرار گیریم؛ لذا بازه‌ی فرکانسی مورد استفاده را با توجه به جدول ۲ از ۱۲۰ الی ۶۰۰ مگاهرتز در نظر می‌گیریم. در این مرحله با بهره‌گیری از روش شناسایی سیستم، توابع تبدیل مربوط به اهداف مورد نظر تخمین زده می‌شوند و سپس صفرها و قطب‌های این توابع محاسبه می‌گردند. با تکیه بر ویژگی‌های متمایزکننده‌ی قطب‌ها و صفرهای مربوط به پهپاد کوچک بال ثابت و مولتی روتور، می‌توان این دو هدف را در SNRهای برابر با ۱۸،۱۶،۱۳ و ۱۹ dB از یکدیگر تفکیک کرد. نکته‌ی کلیدی در این مرحله، بهره‌گیری از معیار خطای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) تطبیقی یا ثابت است که در تعیین تعداد بهینه‌ی قطب‌ها و صفرهای مدل نقشی تعیین‌کننده دارد. همان‌طور که اشاره شد، در مدل ARMA نیازی به جداسازی پاسخ زودرس و دیررس نیست و استفاده از روش حداقل مربعات کل عملکرد را در شرایط نویزی بهبود می‌دهد. قطب‌ها مستقل از زاویه دید ولی صفرها وابسته به زاویه هستند. چون قطب‌های غالب در زوایای مختلف ممکن است تغییر کنند، برای دستیابی به ویژگی مستقل از زاویه دید باید از زوایای مختلف تابش انجام و قطب‌ها

گسترده در سامانه‌های فرآیند استفاده می‌شود. در این تحقیق برای تحریک هدف از سیگنال موج صفحه‌ای استفاده می‌شود. گرچه می‌توان از هر نوع شکل موج زمانی بهره گرفت، انتخاب موج ضربه‌ای به صورت موج صفحه‌ای به دلیل سادگی و کارایی بالا، مناسب‌تر است. با این حال، تولید یک پاسخ ضربه‌ای ایده‌آل در عمل امکان‌پذیر نیست، زیرا طیف فرکانسی آن از صفر تا بی‌نهایت گسترده می‌شود. به همین دلیل، همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده، یک پالس گوسی به عنوان سیگنال تحریک انتخاب شده است. این نوع پالس به دلیل افت سریع انرژی در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس، یک سیگنال باند محدود محسوب می‌شود و از نظر محاسبات عددی دقت و کارایی بالایی دارد [۴-۲].



شکل ۵ - نمایش پالس دوپلت گوسی به کار رفته برای تحریک در حوزه‌ی زمان



شکل ۶ - نمایش پالس دوپلت گوسی به کار رفته برای تحریک در حوزه‌ی فرکانس

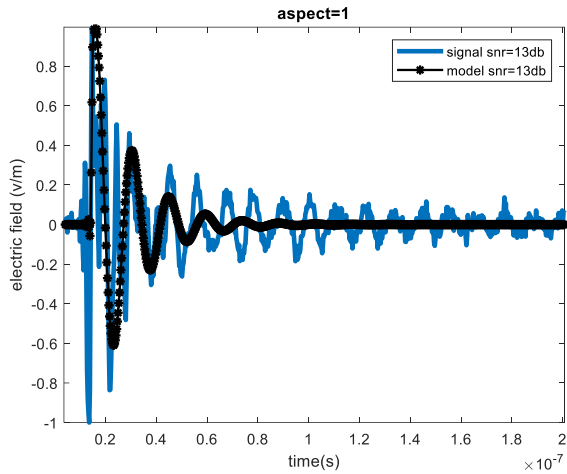
## ۲-۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در مرحله‌ی نخست، بر اساس مشخصات فیزیکی پهپاد کوچک بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰، مدل سه‌بعدی آن‌ها با دقت بالا طراحی و مش‌بندی می‌شود. فرآیند مدل‌سازی سه بعدی و شبیه‌سازی میدان الکتریکی دور با استفاده از نرم‌افزارهای SolidWorks و CST<sup>۱</sup> Studio Suite انجام می‌گیرد. شکل‌های ۷

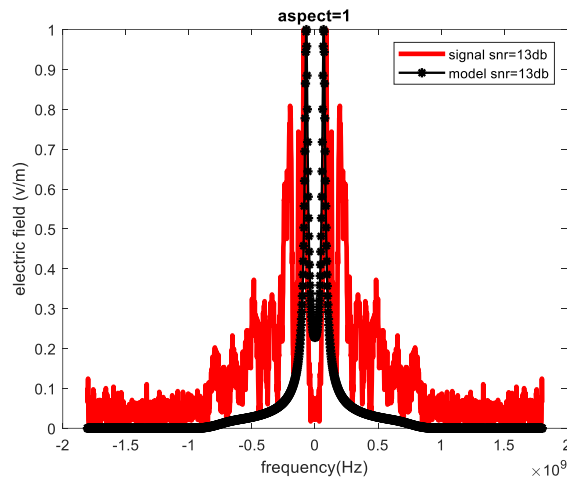
<sup>۲</sup> Perfect Electric Conductor (PEC)

<sup>۱</sup> Computer Simulation Technology (CST)

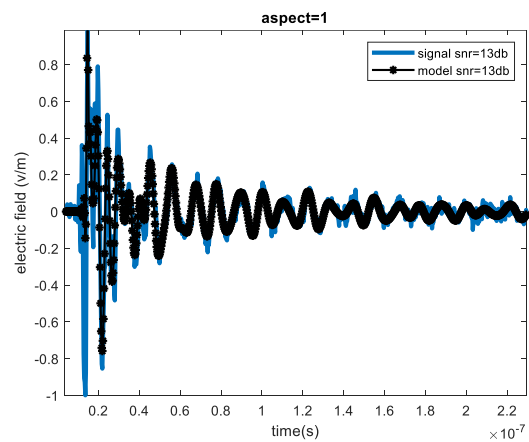
در یک کتابخانه مرجع ذخیره شوند؛ در غیر این صورت احتمال هشدار غلط افزایش می‌یابد [۴]. مطابق شکل‌های ۹ تا ۱۶، میدان الکتریکی دور دریافتی از پهپاد کوچک بال ثابت و مولتی‌روتور در یکی از شش جهت اصلی (جلو، عقب، چپ، راست، بالا و پایین) با استفاده از معیار خطای RMSE تطبیقی و ثابت در SNR=13dB نمایش داده شده است. در این مرحله، پس از به‌دست آوردن تابع تبدیل بهینه، ریشه‌های چندجمله‌ای‌های صورت و مخرج تعیین می‌شوند. مکان قطب‌ها و صفرهای این تابع به‌عنوان شاخص‌های تشخیصی قابل استفاده بوده و می‌توانند با به‌کارگیری روش تطبیق الگو به تفکیک و شناسایی هدف کمک کنند. در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰، موقعیت قطب‌ها و صفرهای مربوط به پهپاد کوچک بال ثابت اسکای لارک و مولتی‌روتور ماتریس ۴۰۰ در صفحه لاپلاس در SNR=13dB به‌عنوان نمونه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



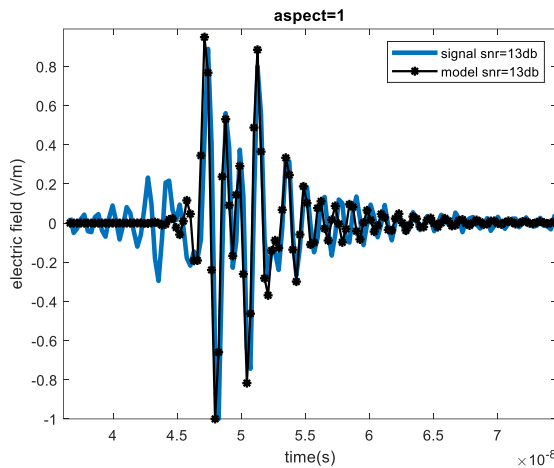
شکل ۱۱ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی ماتریس ۴۰۰ در حوزه‌ی زمان به‌صورت RMSE ثابت



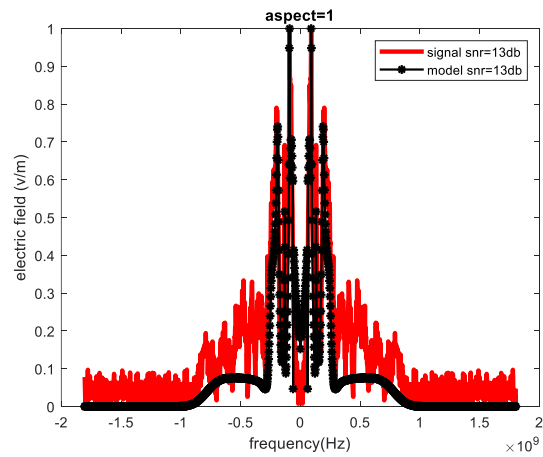
شکل ۱۲ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی ماتریس ۴۰۰ در حوزه‌ی فرکانس به‌صورت RMSE ثابت



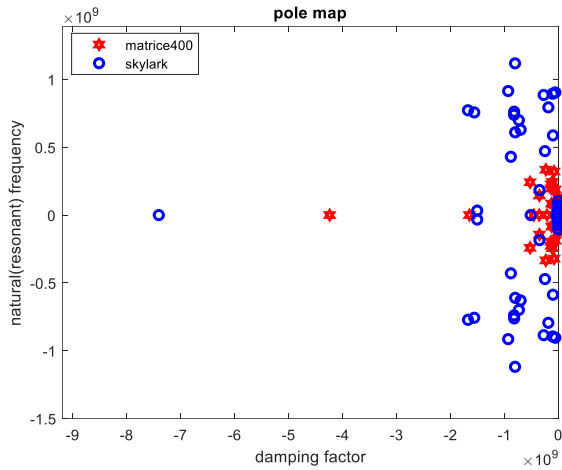
شکل ۹ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی ماتریس ۴۰۰ در حوزه‌ی زمان به‌صورت RMSE تطبیقی



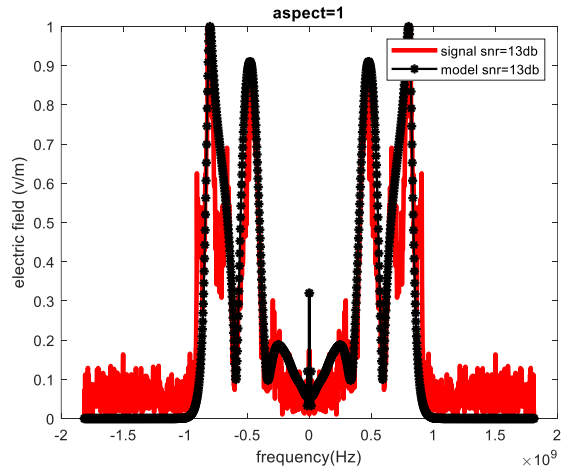
شکل ۱۳ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی پهپاد کوچک اسکای لارک در حوزه‌ی زمان به‌صورت RMSE تطبیقی



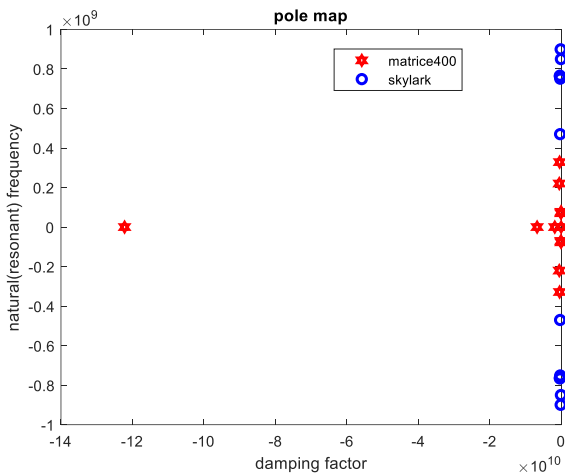
شکل ۱۰ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی ماتریس ۴۰۰ در حوزه‌ی فرکانس به‌صورت RMSE تطبیقی



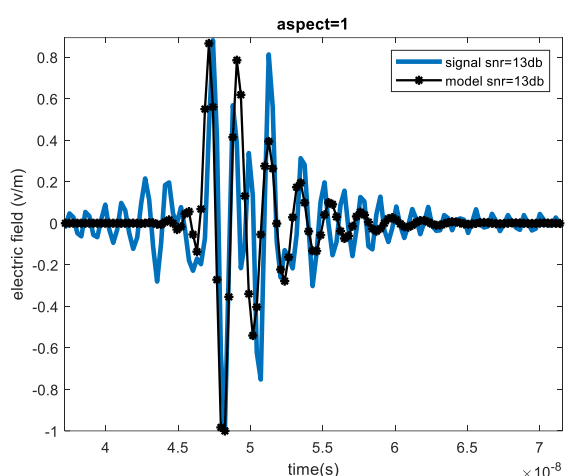
شکل ۱۷: محلّ قرار گیری قطب‌ها در حالت RMSE تطبیقی



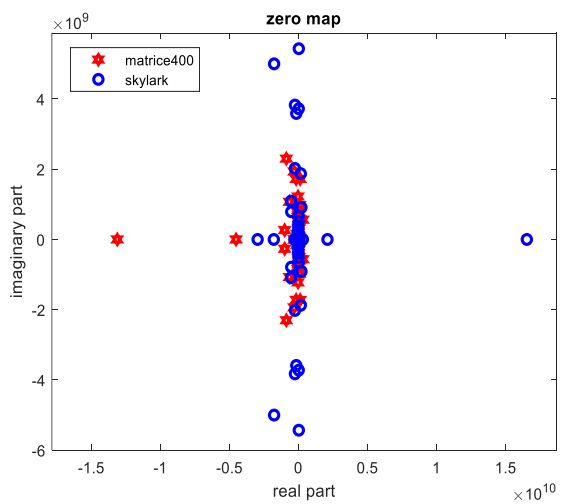
شکل ۱۴ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی پهپاد کوچک اسکای لارک در حوزه‌ی فرکانس به صورت RMSE تطبیقی



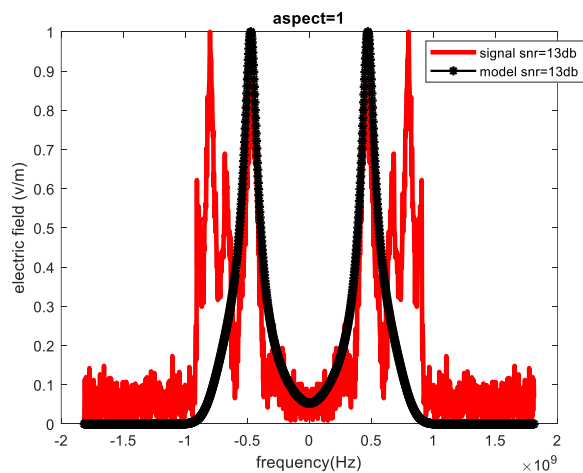
شکل ۱۸ - محلّ قرار گیری قطب‌ها در حالت RMSE ثابت



شکل ۱۵ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی پهپاد کوچک اسکای لارک در حوزه‌ی زمان به صورت RMSE ثابت



شکل ۱۹ - محلّ قرار گیری صفرها در حالت RMSE تطبیقی



شکل ۱۶ - سیگنال دریافتی از سمت جلوی پهپاد کوچک اسکای لارک در حوزه‌ی فرکانس به صورت RMSE ثابت

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌هایی که با استفاده از پردازنده‌ی 8GB DDR5 و حافظه‌ی AMD Ryzen 3 7320U برابر با RAM انجام شده است، جداول ۳ و ۴ تهیه گردید. برای شکل‌های ۹ تا ۱۶ انجام شده است، طبق این جداول، هرچند در روش RMSE تطبیقی زمان پردازش نسبت به RMSE ثابت بیشتر است، اما دقت آن به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد و لذا تعداد فضاهای ویژگی نیز بیش‌تر است. در مقابل، استفاده از حالت RMSE ثابت، زمانی مناسب است که محدودیت زمانی در فرایند پردازش وجود داشته باشد. کاملاً مشهود است در حالت RMSE ثابت زمان پردازش تا ۹۹٪ کاهش یافته است.

جدول ۳ - زمان پردازش در حالت RMSE تطبیقی در مجموع ۶ جهت

نام هدف	مجموع تعداد قطب‌ها	مجموع تعداد صفرها	زمان پردازش کل (ثانیه)
ماتریس ۴۰۰	۶۷	۶۵	۶۰۶.۶۲۰
اسکای لارک	۷۱	۷۱	۵۸۸.۲۷۷

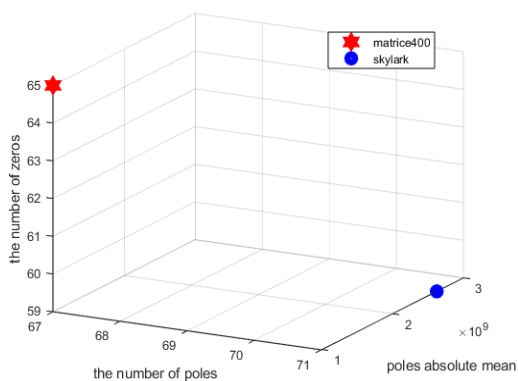
جدول ۴ - زمان پردازش در حالت RMSE ثابت در مجموع ۶ جهت

نام هدف	مجموع تعداد قطب‌ها	مجموع تعداد صفرها	زمان پردازش کل (ثانیه)
ماتریس ۴۰۰	۱۲	۶	۵.۶۶۶
اسکای لارک	۱۲	۶	۵.۷۳۲

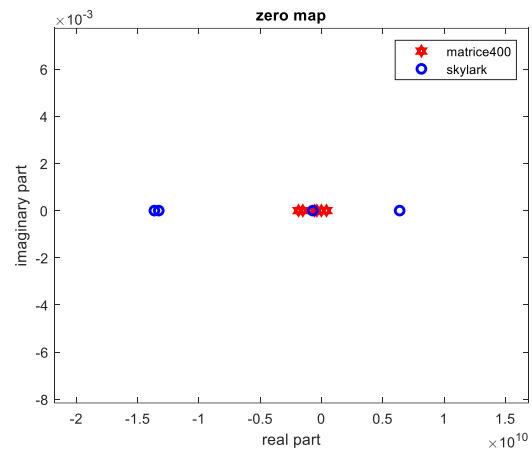
فضای ویژگی سه‌بعدی میانگین اندازه‌ی قطب‌ها و تعداد قطب‌ها و صفرها، مطابق شکل ۲۳ فضای ویژگی دیگر پیشنهادی در این پژوهش است. برای محاسبه‌ی میانگین اندازه‌ی قطب‌ها می‌توانیم از رابطه‌ی (۱۴) بهره ببریم [۲-۴].

$$(14) \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i|$$

به‌نحوی که N نمایش‌دهنده‌ی تعداد تمامی قطب‌های حاصله و  $|P_i|$  نیز نمایانگر اندازه‌ی هر قطب است [۴].

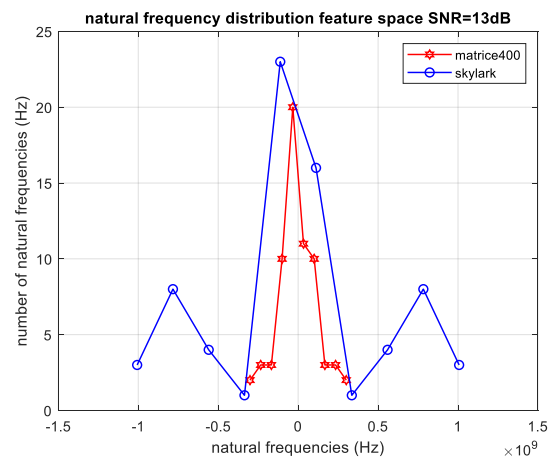


شکل ۲۳ - تعداد قطب‌ها، تعداد صفرها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در حالت RMSE تطبیقی

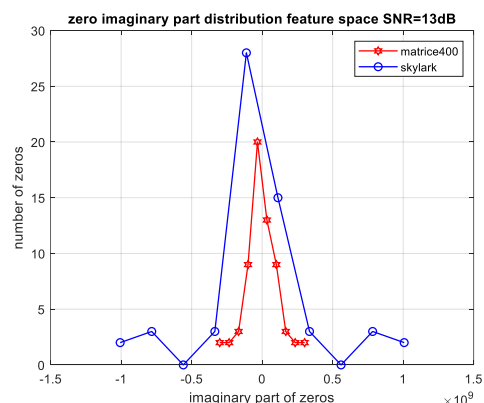


شکل ۲۰ - محل قرار گیری صفرها در حالت RMSE ثابت

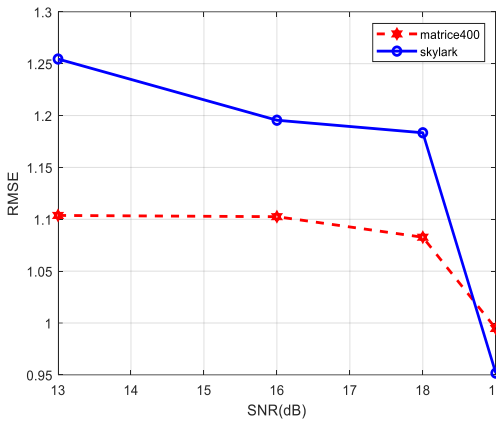
یکی دیگر از فضاهای ویژگی ارائه شده در این تحقیق مطابق شکل‌های ۲۱ و ۲۲، فضای ویژگی توابع توزیع فرکانس‌های طبیعی و قسمت موهومی صفرها در حالت RMSE تطبیقی است. این فضای ویژگی نیز بر اساس قطب و صفرهای مستخرج از تمامی ۶ جهت پیشنهاد گردیده است.



شکل ۲۱ - تابع توزیع فرکانس‌های طبیعی در حالت RMSE تطبیقی



شکل ۲۲ - تابع توزیع قسمت موهومی صفرها در حالت RMSE تطبیقی



شکل ۲۶- تغییرات RMSE در SNRهای مختلف در حالت تطبیقی

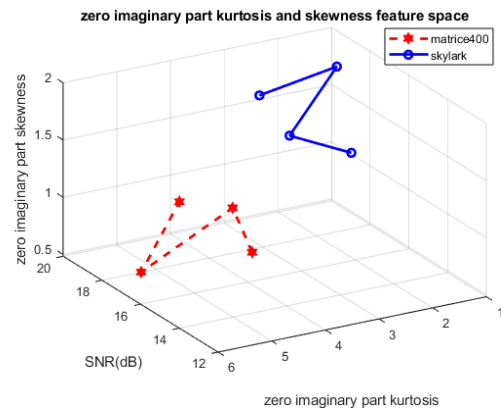
برای تحلیل روشن تر شکل‌های ۱۷ تا ۲۵، لازم به ذکر است، تابع توزیع فرکانس‌های طبیعی هر هدف در صفحه‌ی مختلط، تنها مختص همان هدف است [۲۶]. همچنین با توجه به این که هر سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان تابع تبدیل خاص خود را داراست، اگر به هریک از پهپاد بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ به عنوان یک سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان نگاه کنیم، تابع تبدیل آن‌ها در صفحه‌ی مختلط دارای صفرها و قطب‌هایی است که مختص هر یک از آن‌ها است. لذا در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ صفرها و قطب‌های تابع تبدیل هریک در صفحه‌ی مختلط در دو حالت RMSE ثابت و تطبیقی نمایش داده شده است و تفاوت توزیع قطب‌ها و صفرهای هر یک کاملاً مشهود است. با توجه به این که دقت تخمین در حالت تطبیقی به مراتب بالاتر است، لذا استناد به تابع توزیع هر هدف در این حالت فضاهای ویژگی متعددی در اختیار خواهد گذاشت. به همین خاطر در شکل‌های ۲۱ و ۲۲، نمودار تابع توزیع فرکانس‌های طبیعی و قسمت موهومی صفرهای پهپاد بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ نمایش داده شده است و تفاوت توابع توزیع کاملاً مشهود است. این تفاوت‌های توابع توزیع ناشی از تفاوت برخی ویژگی‌های آماری بین توابع توزیع پهپاد بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ است. لذا در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵، از این تفاوت‌های آماری توابع توزیع به منظور پیشنهاد فضاهای ویژگی چند بعدی برای تمایز دو هدف مذکور استفاده شده است. از جمله‌ی این ویژگی‌های آماری می‌توان به تعداد صفرها، تعداد قطب‌ها، میانگین اندازه‌ی قطب‌ها، واریانس فرکانس‌های طبیعی، کشیدگی و چولگی قسمت موهومی صفرها در SNRهای مختلف بلوک پردازش سیگنال اشاره نمود. اهمیت پژوهش انجام شده در این مقاله این است که همان طور که در مقدمه بیان شد، راهکارهای سنتی شناسایی هدف خودکار معمولاً از رویکرد تطبیق الگو استفاده می‌کنند که شامل دو گام کلیدی است: استخراج ویژگی و شناسایی الگو. این مقاله نیز در همین راستا به ارائه‌ی الگوی محل قرار گیری صفرها و قطب‌های توابع تبدیل اهداف یاد شده در صفحه‌ی مختلط پرداخت و به عنوان دیدگاهی نو آورانه علاوه بر پیشنهاد الگو به پیشنهاد فضای

حال با استفاده از تابع توزیع قسمت موهومی صفرهای پهپاد بال ثابت اسکای لارک و مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ در حالت RMSE تطبیقی، فضای ویژگی سه‌بعدی تغییرات کشیدگی<sup>۱</sup> و چولگی<sup>۲</sup> تابع توزیع صفرها در SNRهای مختلف مطابق شکل ۲۴ پیشنهاد شده است. کشیدگی و چولگی مطابق روابط (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه هستند.

$$Kurt(D_f) = E\left\{\left(\frac{D_f - E\{D_f\}}{\sigma}\right)^4\right\} \quad (15)$$

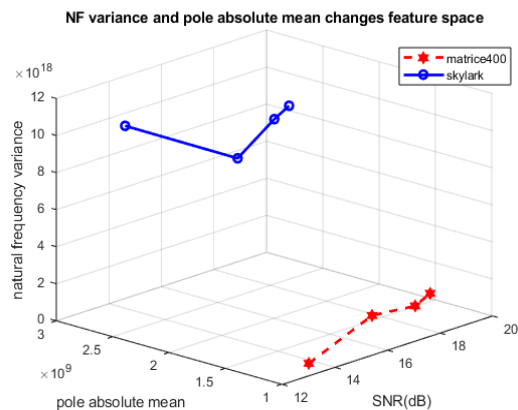
$$Skew(D_f) = E\left\{\left(\frac{D_f - E\{D_f\}}{\sigma}\right)^3\right\} \quad (16)$$

به نحوی که  $D_f$ ،  $E\{D_f\}$  به ترتیب تابع توزیع و امید ریاضی تابع توزیع قسمت موهومی صفرها هستند.  $\sigma$  نیز نمایانگر انحراف معیار است. با عنایت به شکل ۲۱ و شکل ۲۲، تفاوت‌هایی در واریانس فرکانس‌های طبیعی (تشدید) و میانگین اندازه‌ی قطب‌های این دو هدف قابل مشاهده است؛ لذا در شکل ۲۵ به معرفی فضای ویژگی سه‌بعدی تغییرات واریانس فرکانس‌های طبیعی و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در SNRهای مختلف اشاره شده است. در شکل ۲۶ به تغییرات RMSE در SNRهای مختلف در حالت تطبیقی پرداخته شده است.



شکل ۲۴ - فضای ویژگی سه‌بعدی تغییرات کشیدگی و چولگی تابع

توزیع قسمت موهومی صفرها در SNRهای مختلف



شکل ۲۵ - فضای ویژگی سه‌بعدی تغییرات واریانس فرکانس‌های طبیعی و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در SNRهای مختلف

<sup>2</sup> Skewness

<sup>1</sup> Kurtosis

- [۲] م. م. فرج‌الهی، م. آذری و ن. زارعی، "ویژگی‌های متمایز کننده‌ی دکوی غیرفعال دریایی مبتنی بر روش شناسایی سیستم،" نهمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی رادار و سامانه‌های مراقبتی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری نیروی هوایی ارتش جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران، ۲۰۲۵.
- [۳] م. م. آذری، م. م. فرج‌الهی، ن. زارعی و م. ضیغمی، "فضای ویژگی متمایز کننده کشتی از دکوی غیرفعال دریایی مبتنی بر تابع تبدیل هدف،" رادار، ۲۰۲۵. Available: [Online]. [https://radar.ihu.ac.ir/article\\_210368.html](https://radar.ihu.ac.ir/article_210368.html).
- [۴] م. م. فرج‌الهی، ن. زارعی و م. م. فریدونی، "فضای ویژگی متمایز کننده جنگنده از دکوی غیرفعال مبتنی بر تابع تبدیل هدف،" پردازش سیگنال پیشرفته، ۲۰۲۵. doi: ۱۰.۲۲۰۳۴/jasp.۲۰۲۵.۶۳۹۱۹.۱۲۶۱
- [5] M. Van Blaricum and R. Mittra, "A technique for extracting the poles and residues of a system directly from its transient response," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 6, pp. 777-781, 2003.
- [6] J. Brittingham, E. Miller, and J. Willows, "Pole extraction from real-frequency information," *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, no. 2, pp. 263-273, 1980.
- [7] T. Feng, J. Yang, P. Ge, S. Zhang, Y. Du, and H. Wang, "An Improved Pole Extraction Algorithm with Low Signal-to-Noise Ratio," in *2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, 2021, vol. 4: IEEE, pp. 1146-1150.
- [8] Z. Deng, T. Zhang, N. Li, C. Zhang, and W. Si, "Pole Extraction of Radar Target in Resonant Region Based on Sliding-Window Matrix Pencil Method," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1-10, 05/09 2022, doi: 10.1155/2022/1539056.
- [9] A. Akbarpour and S. Chamaani, "Estimation of Target Circumferential Size by Backscattered Wave," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 13, 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.5003.
- [10] P. Sathe and A. Bhattacharya, "Late-Time Estimation Methods to Achieve Resonance Based Radar Target Recognition," in *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, 2022, pp. 87-88, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9887036.
- [11] C. Hargrave, V. Clarkson, A. Abbosh, and N. Shuley, "Radar target identification: Estimating the start of the late time resonant response," in *2013 International Conference on Radar*, 2013, pp. 335-340, doi: 10.1109/RADAR.2013.6652009.
- [۲] ویژگی چند بعدی مبتنی بر ویژگی‌های آماری برگرفته از الگوی قرار گیری صفرها و تشدیدهای طبیعی مختلط پرداخت. مطابق شکل ۲۳، پهنای کوچک بال ثابت اسکای لارک، تعداد و میانگین اندازه‌ی قطب‌های بیش‌تر است اما تعداد صفرهای ماتریس ۴۰۰ بیش‌تر از تعداد صفرهای اسکای لارک است. مطابق شکل ۲۴، کشیدگی و چولگی تابع توزیع قسمت موهومی صفرهای پهنای بال ثابت اسکای لارک در SNRهای مختلف بیش‌تر از کشیدگی و چولگی تابع توزیع قسمت موهومی صفرهای مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ است. در شکل ۲۵ نیز همان‌طور که مشخص است، واریانس فرکانس‌های طبیعی پهنای بال ثابت اسکای لارک در SNRهای مختلف از مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ بیش‌تر است. در شکل ۲۶ نیز با افزایش SNR از ۱۳ به ۱۹ دسی‌بل، RMSE تخمین تا ۲۴٪ کاهش یافته است. این بدین معنی است که با افزایش SNR، دقت تخمین بهبود یافته است.
- یکی دیگر از مهم‌ترین چالش‌های پهنای پهنای سامانه‌های راداری، استفاده‌ی هم‌زمان از چندین پهنای است که به آن swarm نیز گفته می‌شود. در این شرایط، رادار باید توانایی شناسایی اهداف متعدد به طور هم‌زمان را داشته باشد. این امر نیازمند رادارهایی با رزولوشن در برد مطلوب است. در این تحقیق بر اساس بازه فرکانسی ذکر شده یعنی ۱۲۰ تا ۶۰۰ مگاهرتز، عرض باند مورد استفاده برابر ۴۸۰ مگاهرتز است؛ لذا مطابق رابطه  $\Delta R = \frac{C}{2B}$  که در آن  $\Delta R$  رزولوشن در برد، C سرعت نور و B نیز همان پهنای باند مورد استفاده است، رزولوشن در برد این رادار برابر ۳۱.۲۵ سانتی متر است که نه تنها سبب می‌شود رادار چند هدف را یک سلول نبیند بلکه برای مثال یک مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ به تنهایی بیش از دو سلول رادار را پر می‌کند که نشان از عملکرد مطلوب این نوع رادار و فضاهای ویژگی پیشنهادی دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تفکیک پهنای بال ثابت کوچک اسکای لارک از مولتی روتور ماتریس ۴۰۰ با تکیه بر پاسخ طبیعی، مدل‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی میدان الکتریکی دور در ۶ جهت و ۴ سطح SNR انجام شد. سپس با بهره‌گیری از روش شناسایی سیستم در حوزه‌ی زمان، فضاهای ویژگی چندبعدی مبتنی بر ویژگی‌های آماری برگرفته از تشدیدهای طبیعی مختلط پیشنهاد گردید. مقایسه‌ی RMSE تطبیقی و ثابت نشان داد روش تطبیقی دقت بالاتری دارد، هرچند زمان پردازش بیشتر است. در حالت ثابت زمان پردازش ۹۹٪ کاهش و در حالت تطبیقی RMSE با افزایش SNR تا ۱۹ dB حدود ۲۴٪ کاهش یافت و رزولوشن برد رادار ۳۱.۲۵ سانتی‌متر به دست آمد.

#### مراجع

- [1] J. Gong, J. Yan, D. Kong, and D. Li, *Introduction to Drone Detection Radar with Emphasis on Automatic Target Recognition (ATR) technology*. 2023.

- Method and Target Discrimination," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-12, no. 5, pp. 583-589, 1976, doi: 10.1109/TAES.1976.308260.
- [24] A. Gallego and F. Roman, "Hardware Suitability of Complex Natural Resonances Extraction Algorithms in Backscattered Radar Signals," *Algorithms*, vol. 16, no. 8, p. 370, 2023.
- [25] F. Sarrazin, A. Sharaiha, P. Pouliguen, J. Chauveau, S. Collardey, and P. Potier, "Comparison between Matrix Pencil and Prony methods applied on noisy antenna responses," in *2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAPC.2011.6113978.
- [26] J.-H. Lee, I.-S. Choi, and H.-T. Kim, "Natural frequency-based neural network approach to radar target recognition," *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 51, no. 12, pp. 3191-3197, 2003.
- [12] C. Hargrave, I. Vaughan, L. Clarkson, and H. S. Lui, "Late-time resonance window estimation in radar," in *2013, 7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCS.2013.6723933.
- [13] A. Boonpoonga, P. Chomdee, S. Burintramart, and P. Akkaraekthalin, "Simple estimation of late-time response for radar target identification," *Radio Science*, vol. 52, no. 6, pp. 743-456, 2017, doi: 10.1002/2016RS006237.
- [14] L. Joon-Ho, C. In-Sik, and K. Hyo-Tae, "Natural frequency-based neural network approach to radar target recognition," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, no. 12, pp. 3191-3197, 2003, doi: 10.1109/TSP.2003.818908.
- [15] S.Zhou, H.Gao, and F.Ren, "Pole Feature Extraction of HF Radar Targets for the Large Complex Ship Based on SPSO and ARMA Model Algorithm," *Electronics*, vol. 11, p. 1644, 2022, doi: 10.3390/electronics11101644.
- [16] N. Chantasan, A. Boonpoonga, and S. Burintramart, "Radar target identification using Cauchy method," in *International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/iEECON.2014.6925932.
- [17] N. H. Younan, "Radar target identification via a combined E-pulse/SVD-Prony method," in *Record of the IEEE 2000 International Radar Conference [Cat. No. 00CH37037]*, 2000, pp. 799-803, doi: 10.1109/RADAR.2000.851937.
- [18] G. A. Lazarakos, "Radar target identification by natural resonances: Evaluation of signal processing algorithms," Monterey California. Naval Postgraduate School, 1991.
- [19] A. Sathyamurthy and J. Balakrishnan, "Radar Target Discrimination of Real Size Aircraft with Minor Structural Variations: Challenges and Solutions," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 102, pp. 139-148, 05/01 2020, doi: 10.2528/PIERC20031805.
- [20] A. Sathyamurthy and J. Balakrishnan, "resonance based discrimination of stealth targets coated with radar absorbing material (RAM)," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 99, pp. 69-79, 01/01 2021, doi: 10.2528/PIERM20101001.
- [21] S.Zhou, H.Gao, and F.Ren, "Extracting Pole Characteristics of Complex Radar Targets for the Aircraft in Resonance Region Using RMSPSO\_ARMA," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2024, doi: 10.1155/2024/2233923.
- [22] D. Chaparro-Arce, S. Gutierrez, A. Gallego, C. Gutierrez, F. Vega, and C. Pedraza, "Extraction of complex natural resonances of ships acoustic signals using Matrix Pencil Method," in *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2020, pp. 1-4.
- [23] C. w. Chuang and D. L. Moffatt, "Natural Resonances of Radar Targets Via Prony's