Scientific Journal of Radar
Vol. 12, No. 1, Spring and Summer2024, Serial No. 31, pp. 37- 49
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

Ship from Marine Passive Decoy Distinctive Feature Space Based on Target Transfer Function

M. Azari, MM. Farajollahi, N. Zarei*, M. Zeighami

*Assistant Professor, Imam Hossein University (AS), Tehran, Iran

(Received: 2024/04/25, Revised: 2024/07/16, Accepted: 2024/08/03, Published: 2024/08/28)

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

ABSTRACT

Marine passive decoys, or marine multi-faceted corner reflectors, will have special properties such as a high RCS in small dimensions close to the RCS of ships, having the same doppler value and high effectiveness in the electronic warfare environment. For this reason, they are used as one of the main tools for radar and missile seeker deception; Therefore, distinguishing the false decoy target from the ship's main target is an important issue in increasing radar accuracy. In this paper, we discussed the separation of the ship from the marine passive decoy using the system identification method. For this purpose, we first extracted the transfer function of each target at three signal-to-noise ratios of 13, 16, and 19 dB and analyzed the behavior of zeros and poles, the RMSE rate, and the required processing time in two constant and adaptive RMSE modes. Using available zeros and poles, we presented different feature spaces to distinguish the main target of the ship from the false target of the marine passive decoy. These feature spaces include the three-dimensional feature space of the number of zeros - the number of poles and the poles absolute mean and the space of the location of the zeros and poles in the S-plane. In order to prove the effectiveness of the proposed feature spaces, three-dimensional plots of the changes in the number of poles, the number of zeros, and the poles absolute mean were presented at different SNRs. We concluded that by increasing the SNR from 13 to 19 dB, the estimation RMSE decreased from 60 to 84 percent. In this paper, we showed that the constant RMSE mode compared to the adaptive one, although it is less accurate; But it reduces processing time by 97% in some targets.

Keywords: target identification, system identification, singularity expansion method, resonant response, complex natural resonances

Cite this article: Azari, M., Farajollahi, M. M., Zarei, N. & Zeighami, M., "Ship from Marine Passive Decoy Distinctive Feature Space Based on Target Transfer Function." *Radar*, vol. 12, no. 1 , pp. 37- 49, 2024.

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

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

Publisher: Imam Hossein University

Corresponding Author Email: zarei_na@yahoo.com

"رادار"
سال دوازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص ۳۷- ۴۹
شاپا الکترونیکی: ۴۰۲۴ -۲۳۴۵ شاپا چاپی: ۴۰۳۲ -۲۳۴۵

علمی – پژوهشی

فضای ویژگی متمایزکننده‌ی کشتی از دکوی غیرفعّال دریایی مبتنی بر تابع تبدیل هدف

محمود آذری؛ محمدمهدی فرج الهی؛ نادعلی زارعی*؛ محمد ضیغمی

۱- دانشجوی دکترا ۲- کارشناسی ارشد ۳- استادیار ٤- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران ، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

چکیده

دکوی‌های غیرفعّال دریایی یا همان بازتابنده‌های گوشه‌ی چندوجهی دریایی، خصوصیّات ویژه‌ای همچون مقدار بالای سطح مقطع راداری در ابعاد کوچک و نزدیک به سطح مقطع راداری کشتی‌ها، یکسان بودنِ مقدار داپلر آنها و نیز اثربخشی بالا در محیط جنگ الکترونیک خواهند داشت. به همین خاطر از آن‌ها به‌عنوان یکی از ادوات اصلی اخلال در فریب رادارها و سر جستجوگر موشک‌ها استفاده می‌شود؛ لذا تمایز هدفِ کاذب دکوی از هدف اصلی کشتی از موضوعات حائز اهمیت در افزایش دقّت رادارهاست. در این مقاله به تفکیک کشتی از دکوی غیرفعّال دریایی با استفاده از روش شناسایی سیستم پرداختیم. بدین منظور ابتدا تابع تبدیل هر هدف را در سه نسبت سیگنال به نویز ۱۳،۱۶ و ۱۹ *dB* استخراج کرده و به تحلیل رفتار صفرها و قطب‌ها، میزان *RMSE* و زمان پردازش لازم در دو حالت *RMSE* ثابت و تطبیقی پرداختیم. با استفاده از صفرها و قطب¬های در اختیار، فضاهای ویژگی مختلف برای تفکیک هدف اصلی کشتی از هدف کاذب دکوی غیرفعّال دریایی ارائه دادیم. این فضاهای ویژگی عبارت‌اند از فضای ویژگی سه‌بعدی تعداد صفرها - تعداد قطب‌ها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها و فضای محلّ قرارگیری صفرها و قطب‌ها در صفحه S. به‌منظور اثبات کارآمدی فضاهای ویژگی پیشنهادی نمودارهای سه‌بعدی تغییرات تعداد قطب‌ها، تعداد صفرها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در *SNR*های مختلف بیان شد و نتیجه گرفتیم که با افزایش *SNR* از ۱۳ به ۱۹*dB* خطای *RMSE* تخمین از ۶۰ تا ۸۴ درصد کاهش یافت. در این مقاله نشان دادیم حالت *RMSE* ثابت در مقایسه باحالت *RMSE* تطبیقی اگرچه دقّت کم‌تری دارد؛ اما در برخی از اهداف زمان پردازش را تا ۹۷ درصد کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: شناسایی هدف، شناسایی سیستم، روش گسترش تکینگی[1]، پاسخ تشدید، تشدیدهای طبیعی مختلط[2]

۱. مقدمه

پژوهش‌ها پیرامون تخمین تشدیدهای طبیعی مختلط از دو جهت قابل‌تقسیم بندی هستند: ۱. حوزه‌ی کاری که مشتمل بر حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس است. ۲. نوع فعّالیّت انجام شده که شامل ۱. پیشنهاد روش برای جداسازی پاسخ دیررس از زودرس، ۲. پیشنهاد روش برای تخمین تابع تبدیل مبتنی بر مدل AR[3] و یا ARMA[4] ۳. ایجاد کتابخانه از اهداف مختلف و پیشنهاد فضای ویژگی و ۴. مقایسه‌ی روش‌ها و فضاهای ارائه شده از نظر زمان پردازش، پیچیدگی محاسباتی، خطای تخمین و تحلیل اثربخشی

استناد: آذری، محمود، فرج الهی، محمد مهدی، زارعی، نادعلی و ضیغمی، محمد، "فضای ویژگی متمایز کننده کشتی از دکوی غیرفعّال دریایی مبتنی بر تابع تبدیل هدف." *رادار*، ۱۲(۱)، ۳۷- ۴۹، ۱۴۰۳.

DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.1.4

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

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

OPEN ACCESS

رایانامه نویسنده مسئول:zarei_na@yahoo.com

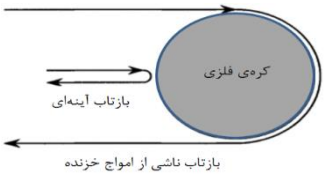
است. برای نمونه [۱] که از مقالات دسته‌ی چهارم است از جمله مقالاتی است که به مقایسه‌ی برخی روش‌های تخمین تشدیدهای طبیعی مختلط از جمله روش پرونی[۵]، مداد ماتریس[۶]، کوشی[۷] و VCM[8] پرداخته است. طبق [۱] روش‌های حوزه‌ی زمان مانند پرونی و مداد ماتریس که مبتنی بر مدل AR هستند، عملکرد زمانی بهتری نسبت به روش‌های حوزه‌ی فرکانس مانند کوشی و VCM که مبتنی بر مدل ARMA هستند دارند. به طور خاص روش مداد ماتریس با داشتن بالاترین ضریب R^2 و زمان اجرایی مطلوب در سناریوهای عملی، بازسازی سیگنال خوبی را به نمایش می‌گذارد؛ اما بر خلاف روش‌های حوزه‌ی فرکانس مبتنی بر مدل ARMA از مشکل تعداد نمونه‌ها و جداسازی پاسخ دیررس رنج می‌برد. از دیگر نمونه‌های مقالات دسته‌ی چهارم می‌توان [۲, ۳] را نام برد. از جمله مقالات دسته‌ی اوّل نیز می‌توان به [۴-۸] اشاره نمود که به جداسازی پاسخ دیررس در حوزه‌ی زمان می‌پردازند. مقالات دسته‌ی دوم نیز همان‌طور که پیش‌تر بیان شد یا در حوزه‌ی زمان به استخراج تشدیدهای طبیعی مختلط می‌پردازند که برای نمونه می‌توان به [۹-۱۳] مبتنی بر مدل AR و [۱۴, ۱۵] مبتنی بر مدل ARMA در حوزه‌ی زمان اشاره نمود و یا مقالاتی که در حوزه‌ی فرکانس به این مهم می‌پردازند همچون [۱۶, ۱۷] که از مدل ARMA بهره می‌برند و نیازی به جداسازی پاسخ دیررس از زودرس ندارند. مقالات دسته‌ی سوم نیز یا مانند [۱۸-۲۱] در حوزه‌ی فرکانس با مدل ARMA و یا مانند [۲۲] در حوزه‌ی زمان با مدل AR به گسترش کتابخانه و پیشنهاد فضای ویژگی می‌پردازند. این مقاله نیز در مقالات دسته‌ی سوم قرار می‌گیرد و به‌منظور بهره‌مندی هم‌زمان از مزایای روش‌های حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس از روش شناسایی سیستم که روشی مبتنی بر مدل ARMA است به همراه معیار RMSE[9] تطبیقی و ثابت در حوزه‌ی زمان استفاده می‌نماید. طبق [۱۴]، رادارهای مبتنی بر پاسخ تشدید نیاز مبرم به یک کتابخانه‌ی غنی دارند و طبق [۵] اگر هدف ناشناس در کتابخانه‌ی این رادارها وجود نداشته باشد، آن هدف ناشناس شناسایی نخواهد شد. در حقیقت مطابق [۵] برای شناسایی هدف در این رادارها، ابتدا کتابخانه‌ای از قطب‌های اهداف مدنظر ایجاد شده و سپس فرایند شناسایی هدف با مقایسه‌ی قطب‌های استخراج شده از هدف ناشناس با اهداف موجود در کتابخانه انجام می‌شود؛ لذا اگر قطب‌های هدف ناشناس با قطب‌های اهداف موجود در کتابخانه مطابقت داشت، امکان تشخیص شکل، ابعاد و ماده‌ی سازنده‌ی هدف وجود دارد.

دکوی غیرفعال یا همان بازتابنده‌ی گوشه، یک سامانه‌ی اخلال غیرفعال است که به‌منظور ایجاد اهداف کاذب راداری استفاده می‌شود. بازتابنده‌های گوشه به‌طورکلی از سه صفحه‌ی مسطّح فلزی متعامد و یا صفحات مسطّح غیرفلزی با پوشش فلزی ساخته می‌شوند. این ادوات به دلیل نمایش سطح مقطع راداری بزرگ می‌توانند خود را شبیه به اهداف بسیار بزرگ‌تر از خود همانند کشتی به نمایش بگذارند. جنگ جهانی دوم نقطه‌ی شروع استفاده از بازتابنده‌های گوشه به‌عنوان هدف کاذب راداری بوده و از آن زمان تا کنون این نوع اهداف در ساختارهای متنوّعی توسعه یافته‌اند. یکی از این ساختارها بازتابنده‌های گوشه‌ی شناور بادی است که بیش‌تر کاربرد زمینی و دریایی دارد و به‌ندرت در زمینه‌ی هوایی مورداستفاده قرار می‌گیرد. دکوی‌های غیرفعال به‌عنوان یک هدف کاذب عمل نموده که به همین سبب توانایی شکستن قفل رادار از روی کشتی و قراردادن قفل آن بر روی خود را دارند و قدرت ردیابی رادار را به چالش می‌کشند. از کشتی‌های نظامی و هواپیماهای جنگنده و دیگر سلاح‌های راهبُردی به‌عنوان مشتریان اصلی این محصول یاد می‌شود. از مزایای دکوی‌های غیرفعال می‌توان به قیمت ارزان، ساخت، حمل و استفاده‌ی آسان، ابعاد کوچک، سبک بودن، عدم نیاز به منبع تغذیه، حضور طولانی‌مدت در صحنه‌ی نبرد، سرعت عملیاتی‌شدن بالا، پوشش باند وسیع فرکانسی، داشتن ویژگی‌های طیفی مطلوب، سطح مقطع راداری بزرگ و امکان استفاده‌ی هم زمان با دیگر ادوات اخلال فعّال و غیرفعال مانند اخلال‌گرها و چف اشاره نمود [۲۳-۲۵]. بنا به‌مراتب مذکور، استفاده از دکوی‌های غیرفعال بسیار موردتوجه قرار گرفته است. حال می‌توان به اهمیّت یافتن روش‌های شناسایی و تفکیک دکوی غیرفعال از هدف و علی‌الخصوص کشتی پی برد. به همین جهت [۲۵] به بررسی روش‌های فضاهای ویژگی موجود در شناسایی کشتی از دکوی غیرفعال دریایی مانند HRRP[10]، داپلر، میکرو داپلر و ویژگی‌های پلاریزاسیونی پرداخته است. در این مقاله می‌خواهیم چندین فضای ویژگی جدید در این حوزه مبتنی بر تابع تبدیل معرّفی نماییم. در بخش ۱ به بیان روش، در بخش ۲ به توضیح شبیه‌سازی، در بخش ۳ به بیان نتیجه‌گیری و در بخش ۴ نیز به بیان پیشنهادها پرداخته شده است.

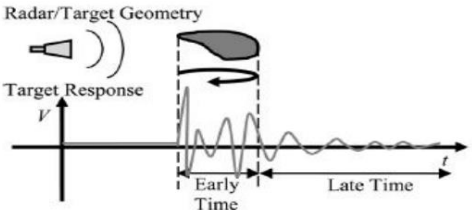
روش

استخراج قطب از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ابتدا به وسیله‌ی روش پرونی انجام می‌شد [۱۵]. روش پرونی معایبی همچون حسّاسیّت به نویز و خطاهای اندازه‌گیری دارد. برای حلّ این مشکل روش‌های متعدّدی مانند روش پالس خاموش[۱۱] [۲۶]، روش KT[۱۲] [۲۷]، روش تابع مداد[۱۳] [۲۸]، روش مداد ماتریس [۲۹-۳۱] که از پاسخ‌های اندازه‌گیری‌شده از جهات متعدّد بهره می‌برد توسعه یافت. به‌طورکلی تمامی این روش‌ها از مدل خود همبسته برای مدل‌کردن سیگنال استفاده می‌کنند که تنها برای مدل‌کردن قسمت دیررس مناسب است. به همین دلیل پیش از

استفاده از این روش‌ها برای استخراج قطب باید ابتدا لحظه‌ی شروع پاسخ دیررس را به نحو مطلوب بیابیم. در شناسایی اهداف غیر همکار یعنی اهدافی که مطابق [۳۲] وضعیت یا ویژگی‌های ناشناخته در هوا، فضا، دریا و غیره دارند، یافتن لحظه‌ی شروع پاسخ دیررس معمولاً آسان نیست. زیرا هندسه‌ی هدف و جهت‌گیری آن نسبت به رادار معیّن نیست. به‌منظور غلبه بر این محدودیّت، از روشی استفاده می‌شود که نیازی به جداسازی پاسخ دیررس از زودرس نداشته باشد. این روش که از یک مدل خود همبسته‌ی میانگین متحرّک برای تقریب تمام پاسخ گذرای هدف بهره می‌برد. از این روش با عنوان روش شناسایی سیستم یاد می‌نمایند. از امضای نمونه‌برداری شده‌ی هدف برای ایجاد یک معادله‌ی تفاضلی خود همبسته‌ی میانگین متحرّک استفاده شده و ماتریس داده‌ی توسعه‌یافته[۱۴] ایجاد می‌شود. به دلیل استفاده از الگوریتم تجزیه‌ی مقادیر تکین، این روش از روش حدّاقل مربّعات کل[۱۵] نیز بهره می‌برد [۱۵]. همان‌طور که پیش‌ازاین بیان شد هنگامی که یک پالس با عرض پالس کوتاه به یک هدف رسانا برخورد نماید، میدان پراکنده شده از هدف مطابق شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) شامل دو قسمت زودرس و دیررس خواهد بود.



شکل (۱-الف). پراکندگی ناشی از یک کره‌ی فلزی شامل بازتاب آینه‌ای و بازتاب ناشی از امواج خزنده‌ی سطحی [۳۳]



شکل (۱-ب). پاسخ زودرس و دیررس یک هدف [۳۱]

لذا سیگنال بازگشتی از هدف به‌صورت زیر است [۳۴]:

$$Y(n) = y_{early} + y_{late} + \varepsilon_n \qquad (۱)$$

به‌نحوی که $Y(n)$ پاسخ دریافتی از هدف، y_{early} پاسخ زودرس هدف، y_{late} پاسخ دیررس هدف و ε_n نیز نشان‌دهنده‌ی نویز است. قسمت زودرس (y_{early}) ناشی از بازتاب آینه‌ای از سطح هدف رسانا است [۱۵]. قسمت دیررس که تشدیدهای طبیعی مختلط نیز در آن قرار دارند صرفاً وابسته به ساختار فیزیکی هدف است و مستقل از شکل موج، قطبش و زاویه‌ی دید، سرعت و حرکت هدف است [۱۸, ۳۱]. فرض بر این است که سیگنال تحریک (X(n)) و سیگنال پاسخ دریافتی از هدف (Y(n)) توسّط تابع تبدیلی مانند (۲) به هم مرتبط می‌شوند [۱۴].

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_K z^{-K}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_L z^{-L}} \qquad (۲)$$

در واقع a_i ها ضرایب مرتبط با مخرج تابع تبدیل و b_i ها ضرایب مرتبط با صورت تابع تبدیل هستند. مرتبه‌ی صورت تابع تبدیل K و مرتبه‌ی مخرج تابع تبدیل برابر L است. در ابتدا باید ضرایب a_i و b_i را از روی سری‌های زمانی سیگنال نمونه‌برداری شده‌ی تحریک (X(n)) و پاسخ نمونه‌برداری شده از هدف (Y(n)) محاسبه شود. سپس معادله‌ی ماتریسی (۳) را ایجاد می‌نماییم. فرض می‌کنیم تعداد درایه‌های (X(n)) برابر M و تعداد درایه‌های (Y(n)) نیز برابر N است. دو حالت وجود دارد یا $M = N$ است و یا $M \neq N$. اگر $M = N$ باشد که شرایط ایدئال است؛ اما اگر $M \neq N$ باشد، باید کاری کنیم که $M = N$ شود. بدین منظور به انتهای برداری که تعداد درایه‌ی آن کم‌تر است صفر اضافه می‌نماییم تا تعداد درایه‌ها برابر شود. سپس معادله‌ی ماتریسی (۳) را ایجاد می‌نماییم [۱۴].

$$\begin{bmatrix} Y(2) & \dots & Y(l+1) & X(1) & \dots & X(K+1) \\ Y(3) & \dots & Y(l+2) & X(2) & \dots & X(K+2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y(N-L+1) & \dots & Y(N) & X(N-L) & \dots & X(N-L+K) \end{bmatrix}_{(N-L)\times(K+1+L)} \qquad (۳)$$
$$\begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_L \\ b_0 \\ \vdots \\ b_K \end{bmatrix}_{(L+K+1)\times 1} = \begin{bmatrix} Y(1) \\ Y(2) \\ \vdots \\ Y(N-L) \end{bmatrix}_{(N-L)\times 1}$$

رابطه‌ی (۳) را می‌توان به‌صورت (۴) نیز نمایش داد [۱۴]:

$$[D_{YX}]\begin{bmatrix} a \\ \dots \\ b \end{bmatrix} = Y \qquad (۴)$$

اگر معادله‌ای به‌صورت $AX \approx B$ داشته باشیم به‌نحوی که امکان معکوس‌سازی ماتریس A وجود نداشته باشد، برای حلّ آن می‌توانیم از روش حدّاقل مربّعات و یا حدّاقل مربّعات کل استفاده نماییم. در روش حدّاقل مربّعات با استفاده از رابطه‌ی (۵) می‌توانیم X_{LS} را محاسبه نماییم [۹].

$$X_{LS} = (A^H A)^{-1} A^H B = A^+ B \qquad (۵)$$

به‌نحوی که H نمایانگر هرمیشین[۱۶] و (+) نمایانگر عملگر ماتریس شبیه معکوس مور - پنروز است. یعنی رابطه‌ی (۴) را بر اساس (۵) می‌توان به شکل (۶) نمایش داد [۱۴].

$$\begin{bmatrix} a \\ \dots \\ b \end{bmatrix} = [D_{YX}]^+ Y \qquad (۶)$$

پس از محاسبهٔ ضرایب چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج، می‌توانیم ریشه‌های صورت و مخرج را با مساوی صفر قراردادن چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج به دست آوریم. سپس با

قراردادن ریشه‌های صورت و مخرج در (۷) می‌توان قطب‌ها و صفرها را در حوزه‌ی لاپلاس محاسبه نمود [۱۵].

$$(k=1,2,\dots N)s_k = \frac{1}{T_s}\ln(Z_k) \quad (۷)$$

حال اگر بخواهیم معادله‌ی (۴) را با روش حدّاقل مربّعات کل حل نماییم باید ابتدا طبق (۸) ماتریس W را ایجاد نماییم [۹].

$$W = [D_{YX}: Y] \quad (۸)$$

سپس در (۹) تجزیه‌ی مقادیر تکین W را انجام می‌دهیم [۹].

$$[\sim, \sim, V] = SVD(W) \quad (۹)$$

در (۱۰) ابعاد ماتریس $[D_{YX}]$ محاسبه شده است [۹]:

$$[\sim, nn] = size([D_{YX}]) \quad (۱۰)$$

حال در (۱۱) و (۱۲) V_{XY} و V_{YY} محاسبه می‌شود [۹]:

$$vxy = v(1: nn, 1 + nn: end) \quad (۱۱)$$

$$vyy = v(1 + nn: end, 1 + nn: end) \quad (۱۲)$$

لازم به ذکر است همان‌طور که پیش‌تر بیان شد برای استفاده از روش حدّاقل مربّعات کل لازم است $V_{YY} \neq 0$ باشد. اینک با استفاده از (۱۳) بردار ضرایب چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج محاسبه شده است [۹].

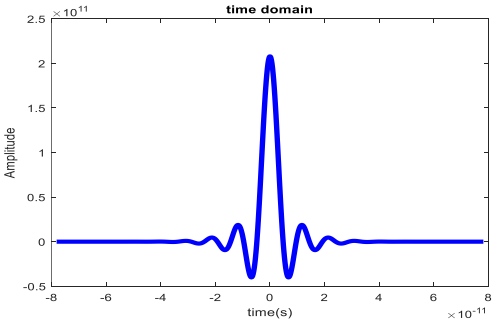
$$\begin{bmatrix} a \\ \dots \\ b \end{bmatrix} = \frac{-V_{XY}}{V_{YY}} \quad (۱۳)$$

پس از محاسبهٔ ضرایب چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج، ریشه‌های صورت و مخرج با مساوی صفر قراردادن چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج محاسبه می‌شود. سپس با قراردادن ریشه‌های صورت و مخرج در (۷) می‌توان قطب‌ها و صفرها را در حوزه‌ی لاپلاس محاسبه نمود [۱۵]. یکی از نکات مهم که در این تحقیق از آن بهره برده شده است استفاده از RMSE و کمینه نمودن آن برای تعیین تعداد قطب‌ها و صفرهاست.

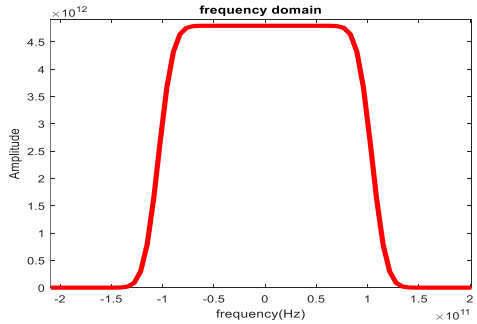
شبیه‌سازی

۱-۱- پالس تحریک

به‌منظور یافتن بیشینه تعداد قطب‌ها به‌عنوان امضای یک هدف، استفاده از یک سامانه‌ی راداری فرا پهن باند که تمامی تشدیدهای ساختاری هدف را تحریک نماید، لازم است. این عرض پالس اندک سبب کاهش برد کشف رادار خواهد شد. به‌منظور جبران این مشکل و دستیابی به برد کشف هدف در ۱۰۰ کیلومتری، بیشینه توان سیگنال ارسالی باید در حدّ چند ده گیگاوات باشد که کاملاً غیرمنطقی است. راه دیگر غلبه بر این مشکل، اصل بدون ازدست‌رفتن کلیت و بسنده بودن قطب‌های غالب است که سبب می‌شود از پهنای باند باریک‌تر و توان کم‌تری استفاده نماییم. لازم به ذکر است به‌دست‌آوردن پاسخ ضربه‌ی ایدئال غیرعملی است. زیرا طیف فرکانس آن از صفر تا بی‌نهایت گسترش می‌یابد. ازاین‌رو، برای تحریک، یک پالس گاوسی با کاهش سریع به یک مقدار ناچیز در هر دو حوزه زمان و فرکانس در نظر گرفته شده است [۳۱]. این نوع پالس به طور مؤثری باند محدود است و برای محاسبات عددی مناسب است [۳۵]. برای به حداکثر رساندن توان تابشی مطابق محدودیت‌های کمیسیون ارتباطات فدرال، پالس باید دارای طیف مسطّح بر روی پهنای باند موردنظر باشد. در میان پالس‌های با تعاریف معیّن ریاضی، پالس‌هایی که معمولاً مورداستفاده قرار می‌گیرند، شامل تک چرخه‌های گوسی[۱۷]، موجک[۱۸] دوبلت گوسی[۱۹]، تک چرخه‌های رایلی[۲۰]، تک چرخه‌های منچستر[۲۱] هستند [۳۶]. مطابق اطّلاعات نرم‌افزار CST[22] سیگنال تحریک استفاده شده حول صفر متقارن بوده و نقطه‌ی شروع آن $\frac{-۶.۲۵}{F_{max}}$ و نقطه‌ی انتهایی آن نیز $\frac{۶.۲۵}{F_{max}}$ است. خارج از این بازه پالس مذکور صفر است. در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) پالس تحریک مورداستفاده در نرم‌افزار CST در حوزه‌ی زمان و فرکانس نمایش‌داده‌شده است.



شکل (۲-الف). سیگنال مورداستفاده برای تحریک در حوزه‌ی زمان

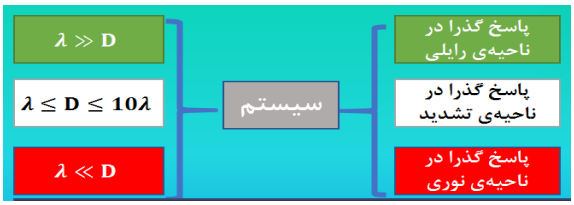


شکل (۲-ب). سیگنال مورداستفاده برای تحریک در حوزه‌ی فرکانس

۱-۲- پاسخ هدف

با انتخاب یکی از سیگنال‌های تحریک باند محدود مذکور، برای نمونه سیگنال دوبلت گوسی، شبیه‌سازی میدان الکتریکی دور هدف در ناحیهٔ تشدید انجام خواهد شد. به‌طورکلی سیگنال

تحریک ارسالی به سمت هدف در یکی از سه ناحیهٔ رایلی، تشدید و یا نوری قرار خواهد گرفت. به همین طریق پاسخ گذرای هدف یا همان میدان الکتریکی دور دریافتی نیز بسته به ناحیه‌ای که طول‌موج سیگنال ورودی در آن قرار دارد، در یکی از همین سه ناحیه قرار خواهد گرفت. شکل ۳ به بیان ارتباط بین ناحیه‌ی پاسخ گذرای دریافتی و طول‌موج سیگنال تحریک می‌پردازد.



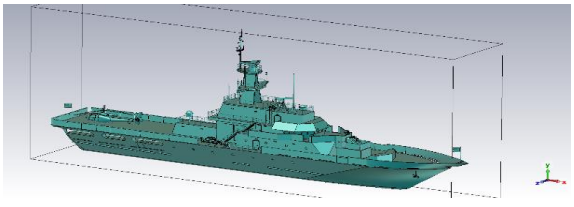
شکل (۳): ارتباط بین ناحیه‌ی قرارگیری پاسخ گذرای دریافتی از هدف و طول‌موج سیگنال تحریک

به‌نحوی که λ همان طول‌موج سیگنال تحریک و D ابعاد هدف است. در این تحقیق، تمرکز ما بر روی ناحیهٔ تشدید است. پاسخ گذرا در ناحیه‌ی تشدید را پاسخ طبیعی یا پاسخ تشدید نیز می‌نامند. زیرا هنگامی که سیگنال تحریک در ناحیه‌ی تشدید قرار دارد، یعنی سیگنال تحریک ارسالی شامل فرکانس‌های طبیعی یا همان فرکانس‌های تشدید هدف است. هدف نیز به‌عنوان یک سیستم به سیگنالی که شامل فرکانس‌های طبیعی یا همان فرکانس تشدید است، پاسخ گذرا در ناحیه‌ی تشدید خواهد داد که به‌اختصار به آن پاسخ شدید یا پاسخ طبیعی می‌گویند.

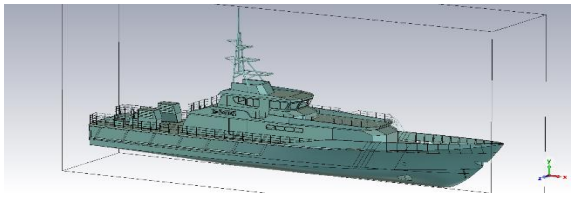
۱-۳- نتایج شبیه‌سازی

مراحل اجرای این پروژه را به‌طورکلی می‌توان در سه مرحله بیان نمود:

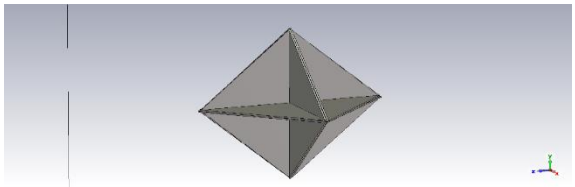
۱. مطابق با ساختار فیزیکی کشتی و دکوی غیرفعال دریایی، مدل‌های آن‌ها به طور دقیق ایجاد و مش‌بندی می‌شوند. این کار در نرم‌افزار سالیدورکز[۲۳] و CST انجام می‌شود. در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ت) تصاویر مدل‌های اهداف مورداستفاده در این تحقیق نمایش‌داده‌شده است.



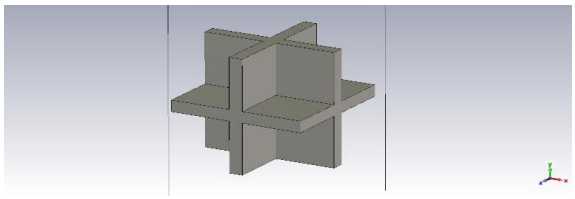
شکل (۴-الف). مدل کشتی دارالتّقوا[۲۴] از جنس هادی الکتریکی کامل[۲۵]



شکل (۴-ب). مدل کشتی Damen Stan 4207 از جنس هادی الکتریکی کامل



شکل (۴-پ). مدل دکوی غیرفعال دریایی مثلّثی از جنس هادی الکتریکی کامل



شکل (۴-ت). مدل دکوی غیرفعال دریایی مربّعی از جنس هادی الکتریکی کامل

در این تحقیق از مدل‌های کوچک‌شده‌ی اهداف با مقیاس یک هزارم ابعاد واقعی استفاده شده است؛ لذا دکوی‌های ساخته شده نیز که در واقع دارای طول، عرض و ارتفاع برابر ۱m هستند با عنایت به مقیاس یک هزارم دارای طول، عرض و ارتفاع برابر ۱mm هستند. جنس مادّه‌ی سازنده‌ی اهداف نیز در این تحقیق هادی الکتریکی کامل در نظر گرفته شده است.

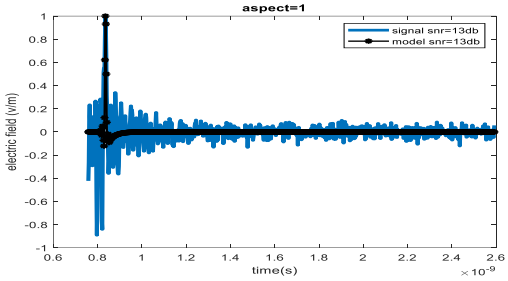
۲. حال نوبت به شبیه‌سازی پاسخ هدف است. همان‌طور که بیان شد برای شناسایی هدف با استفاده تشدیدهای طبیعی مختلط لازم است طول‌موج سیگنال تحریک ارسالی به‌نحوی انتخاب شود که کشتی در ناحیه‌ی تشدید قرار گیرد؛ لذا بازه‌ی فرکانسی مورداستفاده را از ۲۰-۸۰GHz در نظر می‌گیریم. در واقع در ابعاد واقعی فرکانس مورداستفاده ۲۰-۸۰MHz است و لذا اگر ابعاد ۱۰۰۰ برابر کوچک‌تر شود، باید فرکانس به اندازه‌ی ۱۰۰۰ برابر افزایش یابد. البتّه لازم به ذکر است به دلیل این که سامانه‌های راداری به دنبال کشف هدف اصلی یعنی همان کشتی هستند؛ لذا بازه‌ی فرکانسی مورداستفاده باید به‌نحوی تعیین شود که کشتی در ناحیه‌ی تشدید قرار گیرد. با عنایت به بزرگی ابعاد کشتی در مقایسه با دکوی غیرفعال دریایی، دکوی غیرفعال دریایی وارد ناحیه‌ی رایلی می‌شود.

۳. حال با استفاده روش شناسایی سیستم اقدام به تخمین توابع تبدیل اهداف مدنظر نموده و سپس صفرها و قطب‌های توابع تبدیل محاسبه می‌شوند. اکنون می‌توانیم با استفاده از ویژگی‌های متمایزکننده‌ی مربوط به صفرها و قطب‌های کشتی و دکوی غیرفعال دریایی، آن دو را از یکدیگر در نسبت‌های سیگنال به نویز برابر ۱۳،۱۶ و ۱۹ dB متمایز نمایم. نکته‌ی مهم در این مرحله استفاده از معیار RMSE برای به‌حداقل‌رساندن اختلاف مدل تخمینی با سیگنال اصلی است. این معیار در تعیین تعداد مطلوب قطب‌ها و صفرها کمک خواهد نمود. در روش شناسایی سیستم مزیّت اصلی این است که نیازی به جداسازی پاسخ دیررس از زودرس نبوده و بهره‌گیری از روش حدّاقل مربّعات کل نیز در بهبود عملکرد در حضور نویز کمک به سزایی خواهد نمود. در شکل (۵) روند کار از ابتدا تا پیشنهاد فضای ویژگی به‌صورت مرحله‌به‌مرحله بیان شده است.

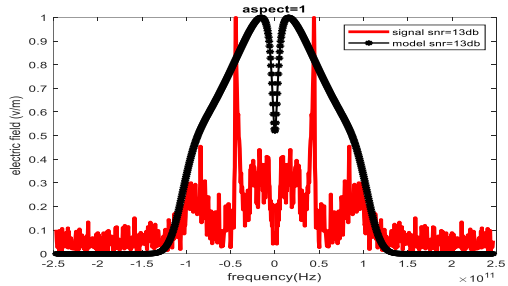


شکل (۵): روند اقدامات برای پیشنهاد فضای ویژگی

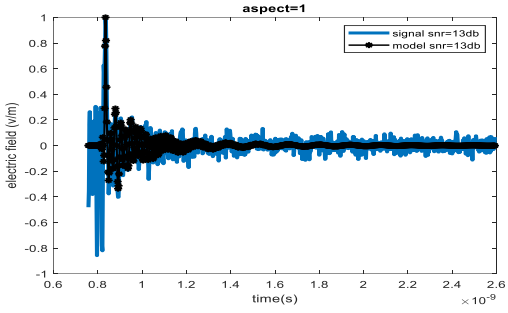
هر قطب، باقی‌مانده‌ی مربوط به خود را دارد. قطب‌ها مستقل از زاویه‌ی دید؛ اما باقی‌مانده‌ها به زاویه‌ی دید وابسته هستند تعداد قطب‌ها می‌تواند بسیار زیاد باشد و ما برای تخمین رفتار پاسخ دریافتی از هدف از قطب‌های غالب استفاده می‌نماییم. باتوجه‌به این که باقی‌مانده‌ها وابسته به زاویه‌ی دید هستند سبب می‌شوند که در زوایای مختلف جای قطب‌های غالب و غیرغالب عوض شود. یعنی ممکن است در یک زاویه قطب‌های غالب ما با قطب‌های غالب در زاویه‌ی دیگر متفاوت باشند؛ اما این بدان معنی نیست که قطب‌هایی که در آن زاویه وجود داشت در زاویه‌ی دیگر وجود ندارد؛ بلکه بدین معنی است که قطب‌های غالب آن زاویه در زاویه‌ی دیگر حالت غیرغالب داشته و تخمین‌گر از آن‌ها صرف‌نظر می‌نماید [۳۷]. به همین خاطر در عمل برای دستیابی به ویژگی مستقل از زاویه‌ی دید بودن نیاز است که از زوایای مختلف به هدف تابش انجام شود و قطب‌ها در زوایای مختلف به‌دست‌آمده و در کتابخانه‌ی مرجع ذخیره شود. در غیر این صورت امکان هشدار غلط در طی فرایند شناسایی و طبقه‌بندی بالا خواهد بود. در این قسمت به مقایسه‌ی دو کشتی و دو دکوی غیرفعال دریایی در نسبت سیگنال به نویز برابر ۱۳dB در دو حالت RMSE ثابت و تطبیقی می‌پردازیم. لازم به ذکر است پاسخ‌های اهداف در شش جهت شامل عقب، جلو، چپ، راست، بالا و پایین شبیه‌سازی شده است.



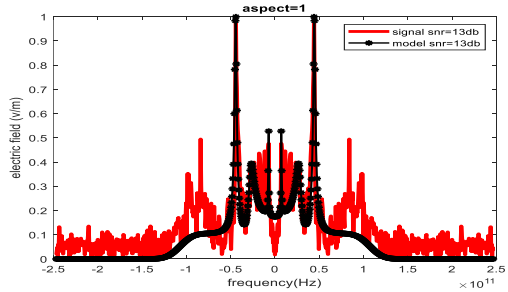
شکل (۶-الف). سیگنال دریافتی از کشتی دارالتّقوا و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی زمان در حالت RMSE ثابت



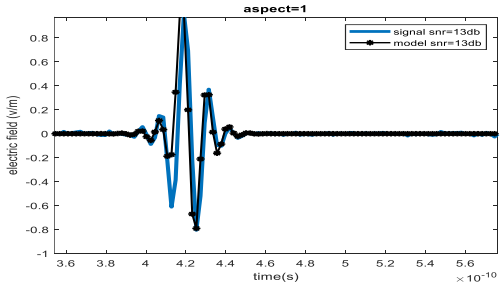
شکل (۶-ب). سیگنال دریافتی از کشتی دارالتّقوا و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی فرکانس در حالت RMSE ثابت



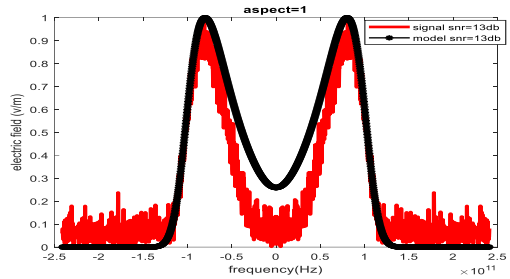
شکل (۶-پ). سیگنال دریافتی از کشتی دارالتّقوا و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی زمان در حالت RMSE تطبیقی



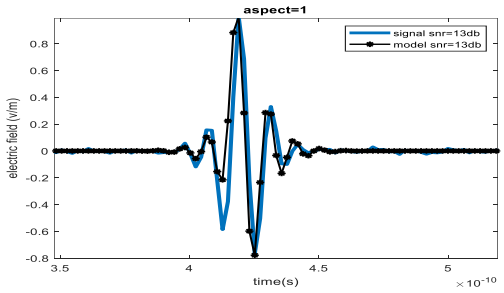
شکل (۶-ت). سیگنال دریافتی از کشتی دارالتّقوا و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی فرکانس در حالت RMSE تطبیقی



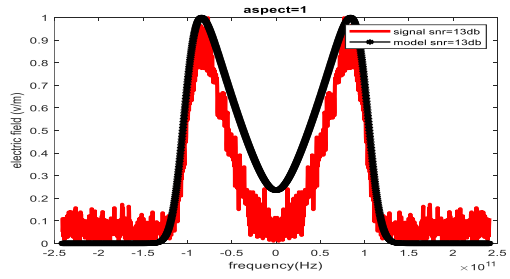
شکل (۶-ث). سیگنال دریافتی از دکوی مربّعی و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی زمان در حالت RMSE ثابت



شکل (۶-ج). سیگنال دریافتی از دکوی مربّعی و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی فرکانس در حالت RMSE ثابت

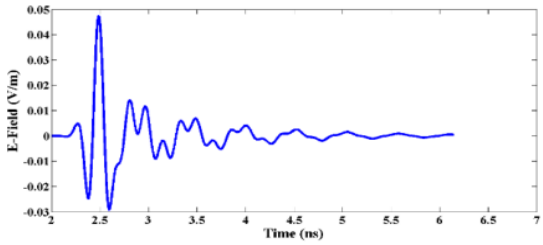


شکل (۶-ح). سیگنال دریافتی از دکوی مربّعی و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی زمان در حالت RMSE تطبیقی

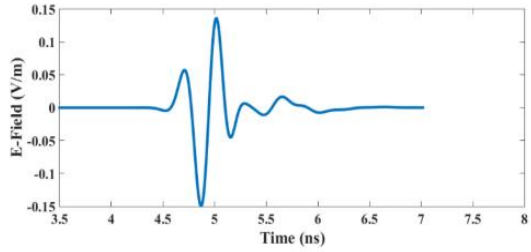


شکل (۶-خ). سیگنال دریافتی از دکوی مربّعی و مدل تخمینی آن در حوزه‌ی فرکانس در حالت RMSE تطبیقی

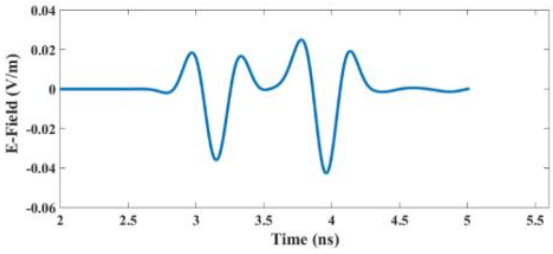
در شکل‌های (۶-الف) تا (۶-خ) منظور از سیگنال همان سیگنال شبیه‌سازی شده از هدف در نرم‌افزار CST است و منظور از مدل نیز مدل تخمین زده شده برای سیگنال مدّنظر است. به‌منظور راستی‌آزمایی و اطمینان‌سنجی از نتایج و روش مورداستفاده سعی می‌نماییم عملکرد خود را مطابق [۴] مورد ارزیابی قرار دهیم. در [۴] میدان الکتریکی دور اهدافی ساده‌ای همچون یک دیسک از جنس هادی الکتریکی کامل با قطر ۱۰۰mm و ضخامت ۳mm در باند فرکانسی ۸GHz -۰.۱، یک مکعب از جنس هادی الکتریکی کامل با طول و عرض و ارتفاع برابر با ۱۰۰mm در باند فرکانسی ۵GHz -۰.۱ و یک استوانه از جنس هادی الکتریکی کامل با ارتفاع ۷۵mm و قطر ۱.۸mm در بازه‌ی فرکانسی ۸GHz- ۱ در حوزه‌ی زمان ارائه شده و در شکل‌های (۷-الف) الی (۷-پ) قابل‌مشاهده است.



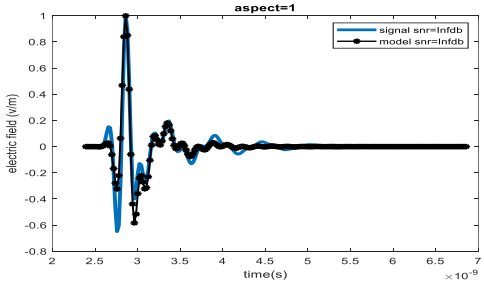
شکل (۷-الف): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی استوانه در حوزه‌ی زمان در نرم‌افزار CST [۵]



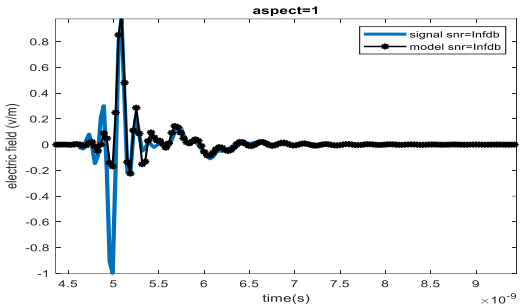
شکل (۷-ب): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی مکعب در حوزه‌ی زمان در نرم‌افزار CST [۵]



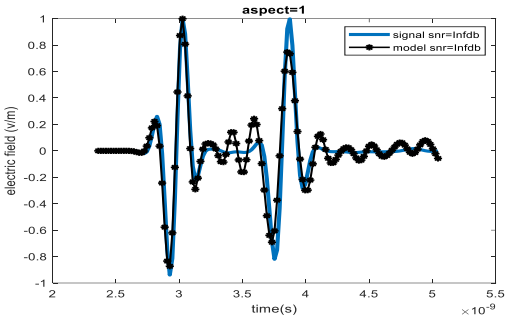
شکل (۷-پ): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی دیسک در حوزه‌ی زمان در نرم‌افزار CST [۵]



شکل (۷-ت): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی استوانه و تخمین آن در حوزه‌ی زمان



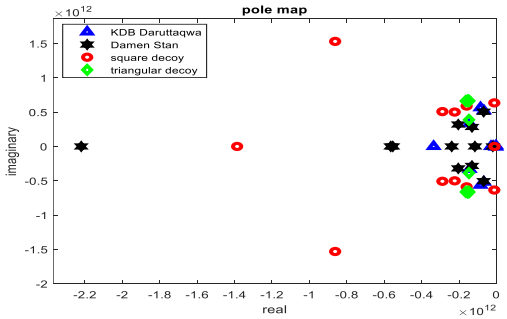
شکل (۷-ث): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی مکعب و تخمین آن در حوزه‌ی زمان



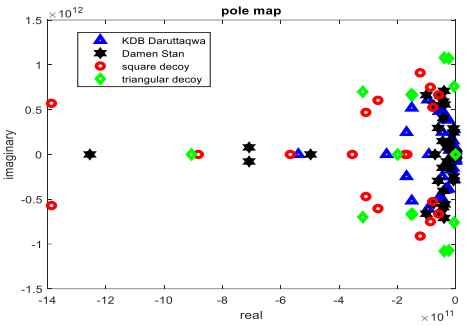
شکل (۷-ج): میدان الکتریکی دور شبیه‌سازی‌شده‌ی دیسک و تخمین آن در حوزه‌ی زمان

حال سعی می‌نماییم نتایج حاصله در [۵] را در نرم‌افزار CST به دست آورده و سپس اقدام به تخمین آن در نرم‌افزار متلب به‌صورت نرمالیزه می‌نماییم. نتایج در شکل‌های (۱۰-ت) الی (۱۰-ج) نمایش‌داده‌شده است.

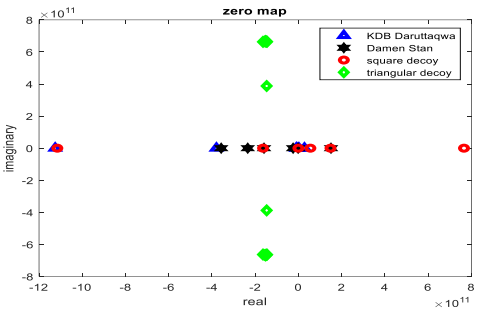
حال با مقایسه‌ی نتایج حاصله در [۵] با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌هایمان می‌توان به صحیح بودن نتایج و روش پی می‌بریم. اوّلین فضای ویژگی که به آن می‌پردازیم، مقایسه‌ی محلّ قرارگیری قطب‌ها و صفرهای به‌دست‌آمده است. بدین منظور در شکل‌های (۸-الف) تا (۸_ت)، محلّ قرارگیری قطب‌ها و صفرهای کشتی‌ها و دکوی‌ها در دو حالت RMSE ثابت و تطبیقی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



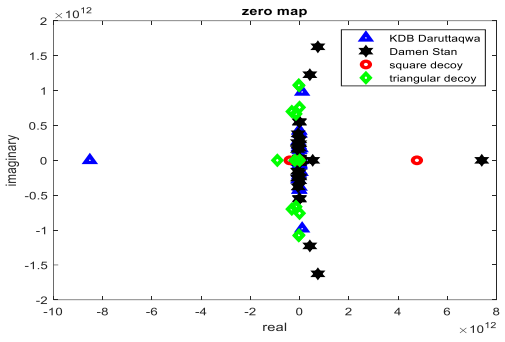
شکل (۸-الف). محلّ قرارگیری قطب‌های کشتی‌ها و دکوی‌ها در حالت RMSE ثابت در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB



شکل (۸-ب). محلّ قرارگیری قطب‌های کشتی‌ها و دکوی‌ها در حالت RMSE تطبیقی در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB



شکل (۸-پ). محلّ قرارگیری صفرهای کشتی‌ها و دکوی‌ها در حالت RMSE ثابت در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB

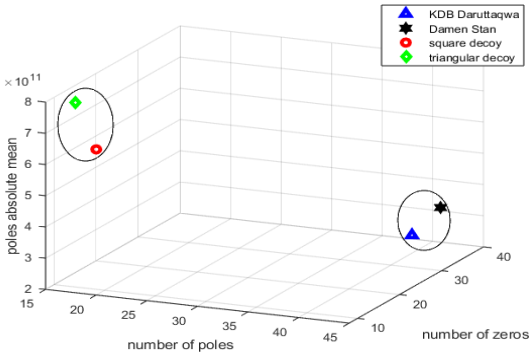


شکل (۸-ت). محلّ قرارگیری صفرهای کشتی‌ها و دکوی‌ها در حالت RMSE تطبیقی در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB

فضای ویژگی سه‌بعدی تعداد صفرها - تعداد قطب‌ها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها فضای ویژگی دیگر مورداستفاده در این تحقیق است که در شکل (۹) نمایش‌داده‌شده است. برای محاسبه‌ی میانگین اندازه‌ی قطب‌ها از رابطه‌ی (۱۴) استفاده شده است.

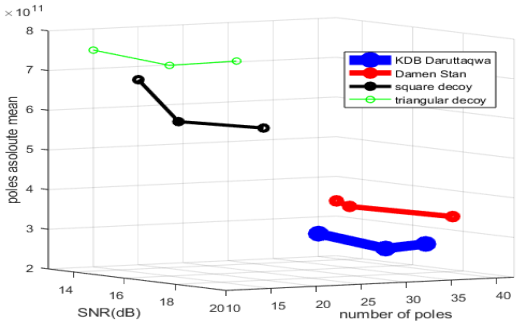
$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|X_i| \qquad (۱۴)$$

به‌نحوی که N نمایش‌دهنده‌ی تعداد تمامی قطب‌های حاصله و $|X_i|$ نیز نمایانگر اندازه‌ی هر قطب است.

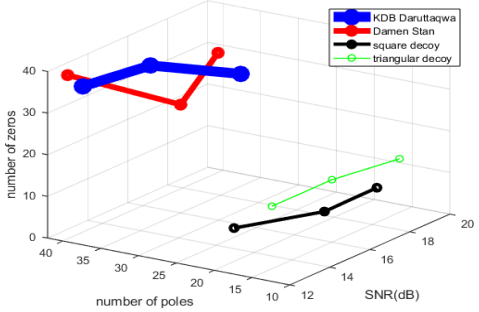


شکل (۹). فضای ویژگی سه‌بعدی تعداد صفرها - تعداد قطب‌ها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در حالت RMSE تطبیقی در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB

به‌منظور اثبات کارایی فضای ویژگی سه‌بعدی یاد شده، این فضای ویژگی را در سه نسبت سیگنال به نویز ۱۶،۱۳ و ۱۹ dB آزمایش نمودیم و اثبات شد در هر سه نسبت سیگنال به نویز امکان استفاده از این فضای ویژگی برای تمایز کشتی از دکوی غیرفعال دریایی وجود دارد. در شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به این موضوع پرداخته شده است.

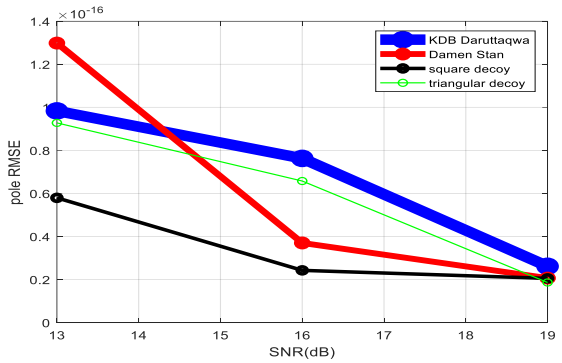


شکل (۱۰-الف). تغییرات تعداد قطب‌ها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در نسبت‌های سیگنال به نویز مختلف در حالت RMSE تطبیقی



شکل (۱۰-ب). تغییرات تعداد صفرها و قطب‌ها در نسبت‌های سیگنال به نویز مختلف در حالت RMSE تطبیقی

در شکل (۱۱) به بررسی تغییرات RMSE در تخمین قطب‌ها در SNRهای مختلف نسبت به حالت چشم‌پوشی از اثر نویز در حالت RMSE تطبیقی پرداخته شده است. بدین منظور مقادیر RMSE به‌دست‌آمده از تخمین قطب‌ها ازهرجهت را محاسبه و سپس نرمالیزه می‌نماییم. در مرحله‌ی بعد میانگین مقادیر نرمالیزه شده را محاسبه نموده و چون این مقدار می‌تواند عددی مختلط باشد، در پایان اندازه‌ی آن را محاسبه نمودیم. طبق شکل (۱۱) RMSE با افزایش SNR روندی کاهشی دارد. RMSE به‌دست‌آمده در SNR=19dB نسبت به SNR=13dB برای کشتی دارالتّقوا ۷۴ درصد، برای کشتی damen stan ۸۴ درصد، برای دکوی مربّعی ۶۵ درصد و برای دکوی مثلّثی ۶۰ درصد کاهش‌یافته است؛ لذا هرچه SNR بالاتر باشد، دقّت تخمین بالاتر خواهد بود.



شکل (۱۱). تغییرات خطای RMSE در تخمین قطب‌ها در نسبت‌های سیگنال به نویز مختلف نسبت به حالت چشم‌پوشی از اثر نویز در حالت RMSE تطبیقی

در جداول (۱) و (۲) به مقایسه‌ی تخمین تابع تبدیل در دو حالت RMSE ثابت و تطبیقی بر اساس تعداد قطب‌ها، تعداد صفرها، مجموع زمان پردازش و خطای RMSE برای تمامی ۶ جهت پرداخته شده است. طبق جداول مذکور، اگر در بدبستان بین دقّت تخمین و زمان پردازش، دقّت تخمین را برگزینیم حالت تطبیقی اگرچه زمان پردازش بیش‌تری صرف می‌نماید؛ اما در عوض دقّت بالاتر و تعدّد فضای ویژگی متمایزکننده را در اختیار قرار می‌دهد. بر خلاف حالت تطبیقی، حالت RMSE ثابت گرچه دقّت و فضای ویژگی متمایزکننده‌ی کم‌تری در اختیار قرار می‌دهد؛ اما زمان پردازش در این حالت برای مجموع ۶ جهت برای برخی از اهداف تا ۹۷ درصد کاهش‌یافته است؛ لذا در مواردی که می‌توان از دقّت تخمین صرف‌نظر نمود و زمان پردازش کم‌تر مدّنظر باشد، حالت ثابت می‌تواند گزینه بهتری باشد؛ امّا در این حالت تنها فضای ویژگی محلّ قرارگیری صفرها و قطب‌ها در صفحه مختلط را در اختیار داریم. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسّط پردازنده‌ی AMD Ryzen 3 7320u و RAM=8GB DDR4 انجام شده است.

جدول (۱): نتایج حاصله به‌صورت RMSE تطبیقی در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB در تمامی ۶ جهت

نام هدف	مجموع تعداد قطب‌ها	مجموع تعداد صفرها	زمان پردازش کل (ثانیه)	میانگین RMSEها از زوایای مختلف
دارالتّقوا	۴۰	۳۵	۱۲۶.۷۱۱	۰.۷۲۸۹
Damen Stan	۴۲	۳۷	۱۸۸.۲۶	۰.۷۵۶۲
دکوی مربّعی	۲۰	۸	۱۶.۴۱۳	۱.۰۶۹۷
دکوی مثلّثی	۱۵	۱۵	۱۰.۵۴	۰.۹۸۲۶

جدول (۲): نتایج حاصله به‌صورت RMSE ثابت در نسبت سیگنال به نویز ۱۳dB در تمامی ۶ جهت

نام هدف	مجموع تعداد قطب‌ها	مجموع تعداد صفرها	زمان پردازش کل (ثانیه)	حدّ آستانه‌ی RMSE در زوایای مختلف
دارالتّقوا	۱۲	۶	۶	۵
Damen Stan	۱۲	۶	۶	۵
دکوی مربّعی	۱۲	۶	۶	۵
دکوی مثلّثی	۱۲	۶	۶	۵

نتیجه‌گیری

در کاربردهای نظامی، باتوجه‌به رادارگریز بودن اهداف، بازتاب‌های آینه‌ای از آن‌ها به دلیل مواد جاذب به‌کاررفته به‌شدت تضعیف می‌شوند. به همین خاطر استفاده از تشدیدهای طبیعی مختلط یا همان قطب‌های اهداف به‌عنوان یک ویژگی متمایزکننده امروزه بسیار موردتوجه قرار گرفته است. در این مقاله با استفاده از روش شناسایی سیستم در نسبت‌های سیگنال به نویز ۱۳،۱۶ و ۱۹ dB به پیشنهاد فضای ویژگی جدید مبتنی بر تابع تبدیل برای تمایز اهداف دریایی اعّم از دو مدل کشتی و دو مدل دکوی غیرفعال دریایی در دو حالت RMSE ثابت و تطبیقی پرداختیم. فضای ویژگی الگوی قرارگیری صفرها و قطب‌ها، فضای ویژگی سه‌بعدی تعداد صفرها، تعداد قطب‌ها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها فضاهای ویژگی پیشنهادی در این مقاله بودند. دریافتیم در حالت RMSE تطبیقی، یک کشتی به‌عنوان یک هدف پیچیده‌تر تابع تبدیل پیچیده‌تری نیز داراست و لذا دارای تعداد صفر و قطب‌های بیش‌تری است. همچنین میانگین اندازه‌ی قطب‌های یک کشتی نیز بسیار کم‌تر از دکوی غیرفعال دریایی است. در این مقاله به‌منظور تحلیل اثربخشی فضاهای ویژگی پیشنهادی، تغییرات تعداد قطب‌ها، صفرها و میانگین اندازه‌ی قطب‌ها در سه SNR مختلف بررسی شد. نشان داده شد که حالت RMSE تطبیقی نسبت به حالت ثابت گرچه دقّت و فضای ویژگی بیش‌تری در اختیار قرار می‌دهد؛ اما در عوض زمان پردازش بیش‌تری صرف می‌نماید. همچنین اثبات شد که فضای ویژگی پیشنهادی با افزایش SNR تخمین را بادقت بالاتری انجام خواهد داد.

پیشنهادها

در تحقیقات آینده قصد داریم به تحلیل اثربخشی و ارائه‌ی معیارهای بیش‌تر پیرامون فضاهای ویژگی ارائه‌شده‌ی این مقاله بپردازیم.

مراجع:

[1] A. Gallego and F. Roman, "Hardware Suitability of Complex Natural Resonances Extraction Algorithms in Backscattered Radar Signals," *Algorithms,* vol. 16, p. 370, 07/31 2023, doi: 10.3390/a16080370.

[2] 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*, 14-15 Nov. 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAPC.2011.6113978.

[3] S. Li, C. O. Hargrave, and H. S. Lui, "Resonance-based Radar Target Classification using the Matrix Pencil Method and the Cauchy Method," in *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, 4-10 Dec. 2021 2021, pp. 1341-1342, doi: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704603.

[4] 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)*, 16-18 Dec. 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCS.2013.6723933.

[5] A. Akbarpour and S. Chamaani, "Estimation of Target Circumferential Size by Backscattered Wave," *IET Microwaves, Antennas & Propagation,* vol. 13, 07/17 2019, doi: 10.1049/iet-map.2018.5003.

[6] 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*, 9-12 Sept. 2013, pp. 335-340, doi: 10.1109/RADAR.2013.6652009.

[7] 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.

[8] P. Sathe and A. Bhattacharya, "Late-Time Estimation Methods to Achieve Resonance Based

10.1155/2024/2233923.

[19] M. Rosenthal and R. Vick, "IEMI Analysis of Civil Drones: Extraction of Complex Natural Resonances from Polarimetric Radar Cross-Section Measurements," in *2023 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 9-13 Oct. 2023, pp. 265-265, doi: 10.1109/ICEAA57318.2023.10297809.

[20] 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.

[21] 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.

[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 *2020 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2020, pp. 1-4 doi: 10.1109/COLCOM50121.2020.9219764.

[23] T. K. Sarkar, *Application of Conjugate Gradient Method to Electromagnetics and Signal Analysis*. Elsevier, 1991.

[24] I. Vagias and D. Bacci, "deployable radar decoy," (in English), united kingdom Patent Appl. 1707142.4, 2018.

[25] H.Haoliang and C.Seiwei, "Electromagnetic Scattering Characteristics and Radar Identification of Sea Corner Reflectors: Advances and Prospects," *Journal of Radars,* vol. 12, no. 4, p. 738, 2023, doi: 10.12000/jr23100.

[26] E. J. Rothwell and K. M. Chen, "A hybrid E-pulse/least squares technique for natural resonance extraction," *Proceedings of the IEEE,* vol. 76, no. 3, pp. 296-298, 1988, doi: 10.1109/5.4413.

[27] R. Kumaresan and D. Tufts, "Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing,* vol. 30, no. 6, pp. 833-840, 1982, doi: 10.1109/TASSP.1982.1163974.

[28] V. Jain, "Filter analysis by use of pencil of functions: Part I," *IEEE Transactions on Circuits and Systems,* vol. 21, no. 5, pp. 574-579, 1974, doi: 10.1109/TCS.1974.1083919.

[29] T. K. Sarkar and O. Pereira, "Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine,* vol. 37, no. 1, pp. 48-55, 1995, doi: 10.1109/74.370583.

[30] Y. Hua and T. K. Sarkar, "On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise," *IEEE Transactions on Signal Processing,* vol.

Radar Target Recognition," in *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, 10-15 July 2022, pp. 87-88, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9887036.

[9] A.F.Rodriguez, L.S.Rodrigo, E.L.Guillen, J.M.Ascariz, J.M.Jimenez, and L.Boquete, "Coding Prony's method in MATLAB and applying it to biomedical signal filtering," *BMC Bioinformatics,* vol. 19, no. 1, p. 451, 2018, doi: 10.1186/s12859-018-2473-y.

[10] K. R. Menon, N. Balakrishnan, and K. Ramchand, "Discriminating complex bodies with minor variations using e-pulse," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,* vol. 44, no. 1, pp. 408-416, 2008, doi: 10.1109/TAES.2008.4517019.

[11] X. Ma, Z. Zhou, K. Liu, J. Zhang, and W. Raza, "Poles Extraction of Underwater Targets Based on Matrix Pencil Method," *IEEE Access,* vol. 8, pp. 103007-103019, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999419.

[12] C. w. Chuang and D. L. Moffatt, "Natural Resonances of Radar Targets Via Prony's 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.

[13] L. Man, X. Wei, C. Dong, and Z. Xiao, "Poles Extracting and Analyzing of Complex Stealth Target Based on Matrix Pencil Method," in *2014 IEEE International Conference on Computer and Information Technology*, 11-13 Sept. 2014 2014, pp. 894-898, doi: 10.1109/CIT.2014.123.

[14] G. A. Lazarakos, "Radar target identification by natural resonances: Evaluation of signal processing algorithms," Monterey California. Naval Postgraduate School, 1991.

[15] W.D.Wei, S.Yi, M.X.Yi, and W.S.Gang, "Natural resonance frequency extraction using an early-time and late-time responses combined technique," in *2004 Second International Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (IEEE Cat. No.04EX925)*, 2004, pp. 201-204, doi: 10.1109/UWBUS.2004.1388101.

[16] N. Chantasan, A. Boonpoonga, and S. Burintramart, "Radar target identification using Cauchy method," in *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 19-21 March 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/iEECON.2014.6925932.

[17] 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.

[18] 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:

39, no. 4, pp. 892-900, 1991, doi: 10.1109/78.80911.

[31] W. C. Chen, "Radar target identification based on complex natural resonances," PhD Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, 2015.

[32] Z. Jing, H. Pan, Y. Li, and P. Dong, "Non-Cooperative Target Tracking, Fusion and Control: Algorithms and Advances," Springer International Publishing.

[33] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tulley, *Radar Cross Section*. Institution of Engineering and Technology, 2004.

[34] C. Hargrave, I. Vaughan, L. Clarkson, and H. S. Lui, "Late-time resonance window estimation in radar," in *7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPCS.2013.6723933.

[35] S. M. Rao, *Time domain electromagnetics*. San Diego: Academic Press, 1999.

[36] Z. Jian, T. D. Abhayapala, and R. A. Kennedy, "Role of pulses in ultra wideband systems," in *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, 2005, pp. 565-570, doi: 10.1109/ICU.2005.1570050.

[37] C. E. Baum, E. J. Rothwell, K. M. Chen, and D. P. Nyquist, "The singularity expansion method and its application to target identification," *Proceedings of the IEEE,* vol. 79, no. 10, pp. 1481-1492, 1991, doi: 10.1109/5.104223.

زیرنویس‌ها

1 Singularity Expansion Method
2 Complex Natural Resonances
3 Autoregressive
4 Autoregressive moving average
5 Prony method
6 Matrix Pencil Method
7 Cauchy method
8 Vector fitting Cauchy Method
9 Root Mean Square Error
10 High Resolution Range Profile
11 Extinction pulse
12 Kumarsean_Tufts
13 Pencil of function
14 Extended data matrix
15 Total Least Squares
16 Hermitian
17 Gaussian monocycles
18 Wavelet
19 Gaussian doublet
20 Rayleigh monocycles
21 Manchester monocycles
22 Computer Simulation Technology
23 Solidworks
24 KDB Daruttaqwa
25 Perfect Electric Conductor