

## تشخیص هدف از چف در فضای چند بعدی

نادعلی زارعی<sup>۱</sup>، محمد مهدی ناییبی<sup>۲\*</sup>، احمدرضا امین<sup>۳</sup>، میثم رییس دانایی<sup>۴</sup>، حبیب‌اله اعلمی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، ۳ و ۴- استادیار، ۵- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)  
(دریافت: ۹۶/۰۱/۲۸؛ پذیرش: ۹۷/۰۲/۱۹)

### چکیده

از بین روش‌های مختلف جنگ الکترونیک در دریا، چف به دلیل ساده‌گی به کارگیری، هزینه کم ساخت و تاثیر آن بر رادار قربانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این‌که تاریخچه استفاده از چف به سال‌های ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد، کار تحقیقاتی چندانی برای تشخیص آن منتشر نشده است. عدم امکان اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی چف در اتاق آنتن، موضوعی است که مطالعه رفتار آن را برای پژوهشگران با مشکل مواجه کرده است. لذا شبیه‌سازی رفتار چف راهی مناسب و حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله شبیه‌سازی ویژگی‌های مختلف هدف و چف در فضای چند بعدی که هر کدام از ویژگی‌ها وابسته به هم باشند، ارائه شده است و از دستاوردهای این تحقیق می‌باشد. علاوه بر این، ساختار پردازشی مبتنی بر فرایند آموزش و آزمون طبقه‌بندی برای تشخیص هدف از چف ارائه شد. مقایسه دقت تشخیص طبقه‌بندی‌های مختلف در فضای چند بعدی و در مواجهه با داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی و نیز پیشنهاد طبقه‌بندی مناسب در کاربرد دریایی، از دستاوردهای دیگر این پژوهش می‌باشد.

### واژگان کلیدی

جنگ الکترونیک، چف، طبقه‌بندی، هدف

### ۱- مقدمه

روش‌های حوزه زمان مبتنی بر تقارن نمونه‌های نمایه فاصله<sup>۳</sup>، تشابه نمونه‌های هر پالس و تنکی به ترتیب در [۱، ۹] و [۱۰] بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزارهای الکترومغناطیسی بررسی شده است. در [۱۱] از DWT<sup>۴</sup> برای تحقق بانک فیلتر و فیلترینگ چف استفاده شده است.

در کاربرد دریایی و رادارهای متداول که مورد نظر این پژوهش است، روش‌های بررسی شده در فضای مجزا مطلوب نخواهند بود. چراکه معمولاً سیگنال‌های اختلال<sup>۵</sup> در جنگ الکترونیک، در یک بعد یا فضا به رادار قربانی حمله الکترونیکی می‌کنند. در این مقاله ویژگی‌های سه حوزه زمان، بسامد و قطبش به صورت توأم برای تشخیص هدف از چف مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از پنج ویژگی در فضای پنج بعدی (5D) و طبقه‌بندی‌های مختلف استفاده شده است تا در صورت ناپایداری یکی از ویژگی‌ها ناشی از جنگ الکترونیک، از سایر ویژگی‌ها برای بهبود دقت تشخیص استفاده شود. بدین منظور، در بخش دوم مقاله، مدل ریاضی ویژگی‌های هدف و چف ارائه شد. طبقه‌بندی‌های مورد استفاده و فضای چند بعدی در بخش سوم

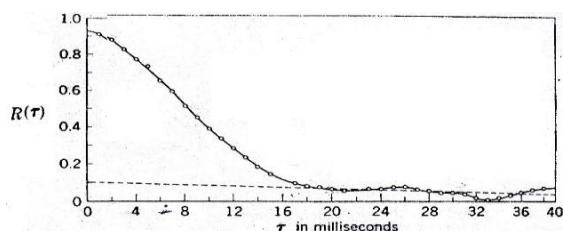
چف یکی از تداخل‌کننده‌های غیرفعال متداول بر علیه سامانه‌های راداری مختلف می‌باشد. نکته مثبت چف سادگی و هزینه کم ساخت، سهولت به کارگیری و تاثیرگذاری آن بر رادار قربانی - علی‌الخصوص رادارهای - دریایی است [۱]. تاریخچه استفاده از چف به جنگ جهانی دوم و سال‌های ۱۹۴۰ بر می‌گردد [۲]. علی‌رغم چنین قدمتی، کار تحقیقاتی چندانی برای تشخیص و یا مقابله با آن منتشر نشده است. با این وجود، موضوع تشخیص چف را در حوزه‌های زمان، بسامد و قطبش و نیز چند حسگری می‌توان مورد توجه قرار داد. بخاطر پیچیدگی رفتار چف به شرایط جوی و اتمسفر، روش‌های حوزه زمان و بسامد (به‌خصوص در کاربرد دریایی) قابل اطمینان نیستند [۳]. روش‌های مبتنی بر چند حسگری و چابکی قطبش<sup>۲</sup> دارای مشکلات پیاده‌سازی بوده و به تجهیزات پیچیده نیاز دارند. با این حال در [۴] از شبکه راداری در کاربرد هوایی برای تشخیص چف استفاده گردید. همچنین در [۵-۸] الگوریتم‌های مبتنی بر چابکی قطبش مورد بررسی قرار گرفته است.

3- Range Profile  
4- Discrete Wavelet Transform  
5- Jamming

\* نویسنده مسئول: nayebi@sharif.ir

1- Victim Radar  
2- Polarization Agile

در خصوص چف، تشدید برای دوقطبی‌های<sup>۲</sup> با طول  $L = \lambda/2$  اتفاق می‌افتد. RCS دوقطبی‌های  $\lambda/2$  با جهت‌های تصادفی به‌طور متوسط  $\sigma_d = 0.17\lambda^2$  می‌باشد [۱۶]. موقعی که تعداد زیادی از دوقطبی‌های چف به‌صورت تصادفی توزیع شده باشند، صرف‌نظر از نوع توزیع هر کدام از دوقطبی‌ها، pdf<sup>۳</sup> کل آن با توجه به قضیه حد مرکزی، دارای توزیع گوسی است [۱۷]. چراکه فرض استقلال در خصوص تک‌تک دوقطبی‌ها می‌تواند برقرار باشد. شکل (۱) تابع خودهمبستگی رفتار نمونه‌های ابر چف، حاصل از آزمایش واقعی با رادار باند X، را نشان می‌دهد [۱۸].



شکل (۱): نمایش تابع خودهمبستگی نمونه‌های ابر چف حاصل از آزمایش واقعی با رادار باند X [۱۸]

ملاحظه می‌گردد، نمونه‌های ابر چف دارای همبستگی زمانی در حدود 18 ms می‌باشند. این در حالی است که نمونه‌های حاصل از اهداف دریایی دارای همبستگی بسیار بیشتری هستند. بنابراین، از جهت تموج، وجه تمایز هدف و چف در میزان همبستگی نمونه‌های آنها می‌باشد. لازم به ذکر است، در این پژوهش از مدل‌های کاملاً همبسته و یا کاملاً ناهمبسته سورلینگ<sup>۴</sup> استفاده نشده است. بلکه مدل تعمیم‌یافته آن و یا تموج بینابین<sup>۴</sup> که به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد، مورد توجه قرار گرفته است.

دومین ویژگی، اثر داپلر می‌باشد. در خصوص چف، جرم و مشخصات آیرودینامیکی دوقطبی‌های آن، حرکت آزاد در اثر جریان‌های هوایی و شرایط باد را تضمین می‌کند [۱۸]. اما هدف به‌عنوان جسمی صلب و فشرده، فاقد چنین حرکت‌های آزاد است. چنین رفتاری موجب می‌گردد طیف پژواک دوقطبی‌های چف گستردگی قابل توجهی نسبت به طیف پژواک هدف داشته باشد. در واقع دامنه سیگنال‌های بازگشتی به‌طور تصادفی در زمان تغییر می‌کند و افت‌وخیزهای حاصله باعث پهن شدن طیف چف می‌شود. نتایج تحقیقات تجربی نشان می‌دهد، تابع چگالی طیفی مربوط به افت‌وخیزهای دامنه سیگنال برگشتی از ابر چف به فرم گوسی با رابطه (۲) است [۱۹].

معرفی شده است. در بخش چهارم، با در نظر گرفتن حالت جستجوی رادار و سناریویی که عمدتاً در آزمون‌های عملی اتفاق می‌افتد ساختار پردازشی پیشنهادی، مبتنی بر طبقه‌بندهای مختلف ارائه شد.

بررسی داده‌های واقعی حاصل از آزمایشات عملی رادار باند X برای هدف دریایی و نیز شبیه‌سازی بهم وابسته و متاثر از هم ویژگی‌های هدف و چف در بخش پنجم آمده است. علاوه بر این، مقایسه دقت تشخیص طبقه‌بندهای مربوطه با داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی حاصل از آزمایشات عملی، در این بخش آمده است. در نهایت در بخش ششم، بر اساس نتایج شبیه‌سازی الگوریتم با داده‌های واقعی در بخش پنجم، طبقه‌بند مناسب برای تشخیص هدف از چف در کاربرد دریایی انتخاب و پیشنهاد شده است.

## ۲- ویژگی‌های هدف و چف

ویژگی‌های راداری هدف یا چف عواملی هستند که مشخصه‌های سیگنال در فضای تابش از جمله انرژی، بسامد، قطبش و ... را با توجه به زاویه دید به فضای بازتابش بهم مرتبط می‌سازند. در واقع نوعی نگاشت از فضای تابش به فضای بازتابش خواهیم داشت [۱۲].

یک رادار برای اهداف گوناگون، سیگنال یکسانی را ارسال می‌کند و اهداف به‌دلیل اختلافات فیزیکی و ساختاری که با یکدیگر دارند، اثرات غیر مشابهی بر روی سیگنال ارسالی از رادار خواهند گذاشت و از همین موارد اختلاف به‌عنوان ویژگی‌هایی، برای بیان نوع هدف استفاده می‌گردد.

اولین ویژگی، سطح مقطع راداری و میزان تغییرات آن است. وابستگی<sup>۱</sup> RCS به مشخصه‌های مختلف ایجاب می‌کند تا  $\sigma$  هدف به‌صورت تصادفی مدل گردد که همان مدل‌های سورلینگ هستند [۱۳-۱۵]. فرض کنید  $S_k$  نمونه  $k$  ام سیگنال دریافتی و به‌صورت

$$S_k = A_k e^{j\phi_k} e^{j\Omega_k}, \quad k=0,1, \dots, N-1 \quad (1)$$

باشد که در آن،  $\phi_k$  فاز شروع اولیه،  $\Omega_k$  طیف آن و  $A_k$  دامنه تصادفی نمونه‌ها هستند. در کار سورلینگ دامنه نمونه‌ها یا کاملاً همبسته (تموج آهسته) و یا کاملاً ناهمبسته (تموج سریع) فرض می‌شوند [۱۳-۱۵]. در واقع مدل‌های سورلینگ را می‌توان به‌عنوان ویژگی هدف از جنبه تغییرات تصادفی RCS و میزان همبستگی آنها مورد توجه قرار داد.

2- Dipole

3- Probability Density Function

4- Moderate Fluctuation

1- Radar Cross Section

مکانی پژواک‌های بازگشتی، سومین ویژگی مورد توجه در این مقاله می‌باشد.

با فرض این‌که  $m$  امین پژواک هدف در راستای فاصله  $S_m(n)$  که  $n = 1, \dots, N_m$  و  $N_m$  طول  $S_m(n)$  است، در [۱] رابطه (۴) برای اندازه‌گیری میزان تقارن پژواک بازگشتی پیشنهاد شده است.

$$\xi_{sym} = \frac{1}{N_m/2} \sum_{n=1}^{N_m/2} \frac{S_m^2(W_m - n) - S_m^2(W_m + n)}{S_m^2(W_m - n) + S_m^2(W_m + n)} \quad (4)$$

که  $W_m$  محور تقارن می‌باشد. مسلماً هرچه  $\xi_{sym}$  به مقدار صفر نزدیک‌تر باشد، نمونه‌های دریافتی متقارن‌تر خواهند بود. اما برای هدفی مثل کشتی به دلیل وجود نقاط پخش‌شده مختلف (از جمله قوس جلو<sup>۴</sup> و عقب کشتی، توپخانه، سکوی فرماندهی<sup>۵</sup>، عرشه و سایر تجهیزات موجود روی آن)، سیگنال بازگشتی متقارن نخواهد بود.

تنکی<sup>۶</sup> پژواک‌های دریافتی در حوزه زمان ویژگی دیگری (چهارمین ویژگی) است که می‌توان مورد توجه قرار داد. توزیع پژواک‌های هدف بر حسب فاصله و یا زاویه، مشخصه و ساختار فیزیکی آن را نشان می‌دهد. پژواک‌های بازگشتی از هدف، معمولاً دارای پیک‌های تنکی هستند. در مقابل، موقعی که ابر چف در فضا شکوفا گردد، سیگنال بازگشتی دوقطبی‌ها از توزیع گوسی تبعیت می‌کنند. لذا مراکز پخش انتشار قوی دوقطبی‌ها در همه جای ابر چف وجود خواهند داشت. در نتیجه، پژواک ابر چف در زاویه و فاصله، نسبت به کشتی پیوسته و متراکم بوده و تنک نخواهد بود [۹].

مجموعه  $C_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  زیرمجموعه‌ای از فضای صفر و یک با  $n$  عناصر که  $m$  تای آن غیر صفر و  $m-n$  تای آن صفر است در نظر گرفته شود. فرض شود که  $m_i$  تعداد عناصرهای غیر صفر در مجموعه  $C_{m_i} = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  باشد، که در آن  $i = 1, 2, \dots, n$  است. رابطه (۵) تعریف می‌شود:

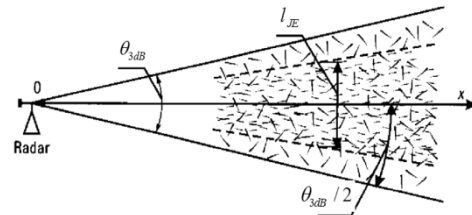
$$d(x_i) = \left| \frac{m_i - i}{m} \right|, \quad m \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

که در آن،  $d(x_i)$  اختلاف تنکی<sup>۷</sup> مجموعه  $C_n$  در نقطه  $x_i$  بوده و میزان تنکی در محدوده  $(x_1, x_i)$  را نشان می‌دهد. هر چه  $d(x_i)$  بزرگتر باشد،  $C_n$  تنک‌تر خواهد بود [۹].

پنجمین ویژگی مورد توجه در این مقاله، اثر قطبش است.

$$S(f) = \exp\left(-0.7 \left(\frac{f}{f_{0.5}}\right)^2\right) \quad (2)$$

که در آن،  $f_{0.5} = 4v_x / \lambda$  پهنای طیف نیم‌توان و  $v_x$  متوسط سرعت دوقطبی‌ها در جهت محور  $Ox$  و  $\lambda$  طول موج رادار می‌باشد. شکل (۲) مؤلفه‌های سرعت دوقطبی‌های چف در راستای محور  $Ox$  با انحراف استاندارد  $l_{JE}$  و راداری با پهنای پرتو  $\theta_{3dB}$  را نشان می‌دهد. نتیجه این‌که چف دارای پهنای طیف بیشتری نسبت به هدف خواهد بود.



شکل (۲): نمایش مؤلفه‌های سرعت دوقطبی‌های چف در راستای  $Ox$  [۱۹]

در خصوص مدل توزیع چف در فضا به‌عنوان سومین ویژگی، دوقطبی‌های آن به‌طور تصادفی و مطابق تلاطم‌های موجود، حرکتی به‌صورت افت‌وخیزهای تصادفی<sup>۱</sup> دارند. فرآیند حرکت آن از نوع مارکوف<sup>۲</sup> بوده و با تحلیل‌های احتمالی برای موقعیت قرارگیری دوقطبی‌ها در مکان  $x$  و زمان  $t$ ، می‌توان ثابت کرد [۱۹]:

$$p(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi B_x t}} \exp\left(-\frac{(x - A_x t)^2}{2B_x t}\right) \quad (3)$$

که،  $A_x$  و  $B_x$  به‌ترتیب ضرایب ثابت شیف و پخش‌شدگی در راستای محور  $x$  بوده و معادله فوکر-پلانک-کولموگوروف (FPK)<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. در واقع مدل توزیع چف دارای توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار متغیر با زمان و به ترتیب  $A_x t$  و  $B_x t$  می‌باشد که در آشکارسازی به‌صورت پالس به پالس، تقارن توزیع در هر پالس معلوم می‌باشد.

با فرض این‌که استقلال اغتشاشات اتمسفری در طول محورهای  $Ox$ ،  $Oy$  و  $Oz$  برقرار باشد، تابع چگالی احتمال فضایی به‌صورت رابطه  $p(v, t) = p(x, t) * p(y, t) * p(z, t)$  قابل بیان است [۱۹]. چنین نحوه توزیع چف در فضا موجب می‌گردد، سیگنال پژواک دریافت‌شده از ابر چف فرمی متقارن در راستای فاصله و زاویه سمت داشته باشد. در واقع تقارن

4- Bow and Stern

5- Bridge

6- Sparseness

7- Sparse Discrepancy

1- Random walk

2- Markovian

3- Fokker Planck Kolmogorov

باشد، منطقی است. در بدترین حالت، این مقدار باید بیشتر از مقدار ۷/۷۸۲ dB که در رابطه (۱۰) برای چف حاصل شده است، باشد.

لازم به ذکر است، سایر ویژگی‌ها، از جمله توان و سرعت هدف و چف با توجه به این که اهداف دریایی می‌توانند در حدود RCS و سرعت چف باشند، در بردار ویژگی دخالت داده نشده است. لذا ویژگی‌هایی در نظر گرفته شد که قابلیت اطمینان در تشخیص را فراهم آورند. همچنین پدیده گلینت<sup>۴</sup>، که توسط رادارهای با تفکیک‌پذیری بالا قابل تشخیص است [۱۳] مورد توجه قرار نگرفته است. چراکه در این تحقیق رادارهای متداول مفروض است.

### ۳- طبقه‌بندها و فضای چندبعدی

طبقه‌بند<sup>۵</sup> قسمتی از فرایند تشخیص است که نقش ایجاد خط تصمیم<sup>۶</sup> را به عهده دارد. در این مقاله صرف‌نظر از معیار طبقه‌بندی، به لحاظ ساختاری چهار طبقه‌بند خطی LDA<sup>۷</sup>، SVM<sup>۸</sup> خطی، KNN<sup>۹</sup> و بیز<sup>۱۰</sup> به‌عنوان طبقه‌بند بهینه مد نظر قرار گرفت. برای مسئله دو کلاسه و طبقه‌بند خطی، ابر صفحه<sup>۱۱</sup> تصمیم در فضای ویژگی<sup>۱</sup> بعدی در رابطه (۱۱) صدق می‌کند [۲۰]:

(۱۱)

$$g(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + w_0$$

که در آن،  $\mathbf{w}$  بردار وزن بوده و با بیشینه‌سازی نسبت FDR<sup>۱۲</sup> مبتنی بر حل مساله بهینه‌سازی حاصل می‌گردد.

در حالتی که جداپذیری کلاسه‌ها به‌صورت خطی نباشد، نمونه‌ها را به یک فضای با بعد بالاتر نگاشت داده، تا در فضای جدید ویژگی‌ها نمونه‌ها به‌صورت خطی از هم قابل تفکیک باشند. یعنی نگاشتی مانند  $z = \phi(\mathbf{x})$  داشته باشیم. چنین نگاشتی با توجه به قضیه مرسر<sup>۱۳</sup> برای بردار ویژگی  $\mathbf{x}$  در فضای هیلبرت وجود دارد. پس از نگاشت، SVM خطی منجر به حل مساله بهینه‌سازی مقید در فضای نگاشت خواهد شد:

اگر  $\sigma_{\max}$  بیشترین مقدار RCS ابر چف باشد و  $\theta_i$  جهت میدان مغناطیسی موج ارسالی رادار را نشان دهد، مولفه RCS چف را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۷]:

$$\sigma_{\theta,y} = \sigma_{\max} (\cos^2 \theta \cos \theta_i + \sin \theta \sin \theta_i \cos \theta \sin \varphi)^2 \quad (۶)$$

$$\sigma_{\theta,x} = \sigma_{\max} (\sin \theta_i \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos \theta_i \cos \theta \sin \theta \sin \varphi)^2 \quad (۷)$$

با فرض اینکه دوقطبی‌های چف به‌صورت کره شکوفا شده باشند، برای متوسط مولفه‌های RCS خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta,y} &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (\cos^2 \theta \cos \theta_i + \sin \theta \sin \theta_i \cos \theta \sin \varphi)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (۸) \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \left( \frac{4}{5} - \frac{1}{15} \sin^2 \theta_i \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta,x} &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (\sin \theta_i \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos \theta_i \cos \theta \sin \theta \sin \varphi)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (۹) \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \left( \frac{2}{15} + \frac{4}{15} \sin^2 \theta_i \right) \end{aligned}$$

اگر تعریف کنیم،  $\frac{\bar{\sigma}_{\theta,y}}{\bar{\sigma}_{\theta,x}} = \tan^2 \gamma$  که  $\gamma$  زاویه قطبش است و با فرض قطبش عمودی که  $\theta_i = 0$  می‌باشد، داریم:

$$\frac{\bar{\sigma}_{\theta,y}}{\bar{\sigma}_{\theta,x}} = \frac{\bar{\sigma}_{yy}}{\bar{\sigma}_{xx}} = \tan^2 \gamma = 6 = 7.782 \text{ dB} \quad (۱۰)$$

که در واقع نسبت مولفه قطبش اصلی<sup>۱</sup> ابر چف به مولفه قطبش متقابل<sup>۲</sup> آن بوده و بدین معنی است که اگر رادار موج قطبش شده خطی عمودی ارسال کند این نسبت به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

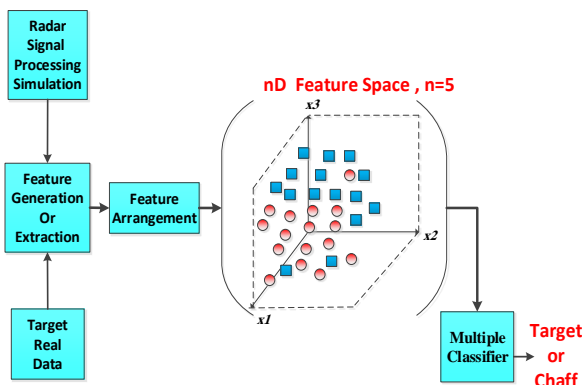
اما در مورد هدفی مثل کشتی، به‌دلیل پیچیدگی ماتریس پس‌انتشار آن، محاسبه نسبت  $\bar{\sigma}_{\theta,y} / \bar{\sigma}_{\theta,x}$  ساده نبوده و با کمک نرم‌افزارهای الکترومغناطیسی و یا آزمایش‌های عملی برای اهداف خاص قابل استخراج است. متأسفانه، داده‌های آزمایشی متعلق به مشخصات دپلاریزاسیون<sup>۳</sup> کشتی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در سال ۱۹۶۵، نیروی دریایی آمریکا نسبت مولفه قطبش اصلی به مولفه قطبش متقابل هواپیمای C-54 را در باند X و چند زاویه سمت مورد آزمایش قرار داد و به این نتیجه رسید که نسبت مذکور مقدار ۷-۱۲dB است [۷]. معمولاً شعاع انحنای کشتی بزرگتر از هواپیما می‌باشد، بنابراین، فرض این که مولفه قطبش اصلی ۱۲ dB بزرگتر از مولفه قطبش متقابل برای کشتی

4- Glint  
5- Classifier  
6- Decision line  
7- Linear Discriminatin Analysis  
8- Support Vector Machine  
9- K Nearest Neighbor  
10- Bayes  
11- Hyper Planes  
12- Fisher's Discriminant Ratio  
13- Mercer

1- Co Polarization  
2- Cross Polarization  
3- Depolarization

پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

در چنین سناریویی از الگوریتم‌های پردازشی مرسوم در حوزه زمان و بسامد نمی‌توان برای تشخیص چف استفاده کرد. در واقع مشخصه‌های فاصله و سرعت (و یا داپلر) امکان تشخیص و تفکیک هدف را فراهم نمی‌آورند. بلکه باید از سایر ویژگی‌ها در دیگر فضاها - از جمله فضای ویژگی چندبعدی پیشنهاد شده در این مقاله - و یا ساختارهای پردازشی جدید - از جمله طبقه‌بندهای پیشنهاد شده با فرایند آموزش و آزمون<sup>۶</sup> - بهره برد. طرح بلوکی پیشنهادی، در شکل (۳) آمده است.



شکل (۳): نمایش طرح پیشنهادی تشخیص در فضای چندبعدی

در این طرح، ابتدا ویژگی‌های موردنظر از شبیه‌ساز و پردازشگر سیگنال مربوطه و یا داده‌های واقعی حاصل از آزمایش رادار باند  $x$ ، استخراج می‌گردد. با تشکیل فضای چندبعدی، بردار ویژگی‌ها به ورودی طبقه‌بندها اعمال شده و تشخیص هدف از چف با شبیه‌سازی حلقه مونت کارلو محقق می‌گردد.

## ۵- داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌ها

در این پژوهش از دو مجموعه داده ورودی برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. مجموعه اول، داده‌های حاصل از آزمایش‌های واقعی رادار در دریا می‌باشد. این داده‌ها در دو دسته برای دو کشتی متفاوت با طول تقریبی ۲۰۰ m و در تعدادی اسکن رادار اخذ شده است. دسته اول مربوط به ۱۶ اسکن که برای فرایند آموزش و دسته دوم مربوط به ۲۷ اسکن، برای فرایند آزمون طبقه‌بندها مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۴) هر کدام از داده‌های پژواک مذکور در دو اسکن متوالی و در سلول‌های فاصله را نشان می‌دهد.

$$\text{Min} \quad \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (12)$$

$$\text{st} \quad y_i (w^T x_i + w_0) - 1 \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

که پاسخ آن به صورت زیر می‌باشد:

$$w = \sum_{i=1}^{N_s} \lambda_i [y_i x_i], \quad \lambda_i \neq 0 \quad (13)$$

که در آن،  $N_s$  تعداد بردارهای پشتیبان مسئله،  $y_i$  برچسب هر کدام از ویژگی‌های  $x_i$  و  $\lambda_i$  ضرایب لاگرانژ می‌باشند [۲۱].

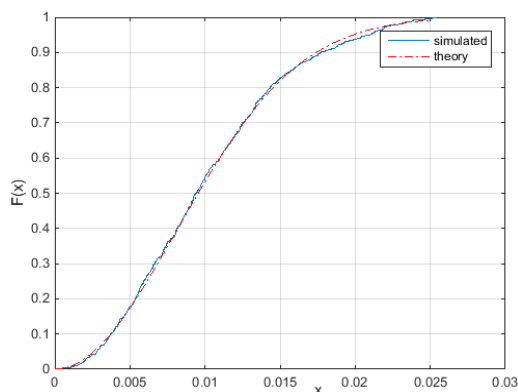
در SVM غیرخطی از تابع نگاشت کرنل<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. ضمناً اگر تابع نگاشت<sup>۲</sup> درجه دو به صورت  $f(x) = \langle x \cdot Ax \rangle + \langle x \cdot B \rangle + C$  به کار گرفته شود و سپس طبقه‌بند خطی مورد استفاده قرار گیرد، طبقه‌بند تربیعی<sup>۳</sup> خواهیم داشت.

با کنار هم قرار دادن هر کدام از ویژگی‌های که در بخش قبلی بیان گردید، می‌توان با ایجاد بردار فضای 5D به عنوان فضای چندبعدی و نیز طبقه‌بندهای ذکر شده، تشخیص در چند بعد را تحقق داد.

## ۴- سناریوی موردنظر و روش پیشنهادی

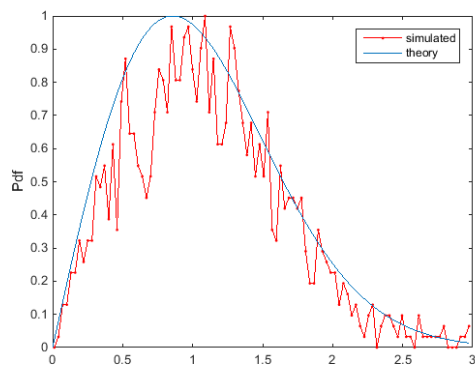
در کاربرد دریایی، برای خودمحافظی<sup>۳</sup> و یا ایجاد هدف کاذب توسط چف، از روش‌هایی مثل سرگردان کردن<sup>۴</sup> (پرتاب چف در حالت جستجوی رادار و در سلول‌های مجاور) و فریب دادن<sup>۵</sup> (پرتاب چف در حالت ردیابی رادار و در همان سلول حاوی هدف) استفاده می‌شود [۲۲]. با در نظر گرفتن حالت جستجوی رادار در آزمایش‌های عملی پس از شکوفایی چف، با توجه به شرایط جوی و جهت و سرعت حرکت اهداف دریایی و باد حالتی می‌تواند اتفاق بیفتد، در حالیکه، هدف و چف با سرعت شعاعی یکسانی حرکت می‌کنند، فاصله آنها از رادار نیز یکسان شده و فقط در زاویه سمت اختلاف جزئی داشته باشند. سناریوی دیگر مربوط به زمانی است که هدف و چف هر دو در پرتو رادار، اما در فاصله با اختلاف ناچیز (به عنوان مثال در حد چند سلول فاصله) قرار گیرند. از بین دو سناریوی مذکور، سناریوی دوم بدترین شرایطی است که در حالت جستجوی رادار و در آزمایش‌های عملی می‌تواند اتفاق بیفتد و در این مقاله به منظور ارزیابی الگوریتم‌های

- 1- Kernel
- 2- Quadratic
- 3- Self-Protection
- 4- Distraction
- 5- Seduction



شکل (۶): شبیه‌سازی CDF مدل بینابین سورلینگ هدف و مقایسه آن با تئوری

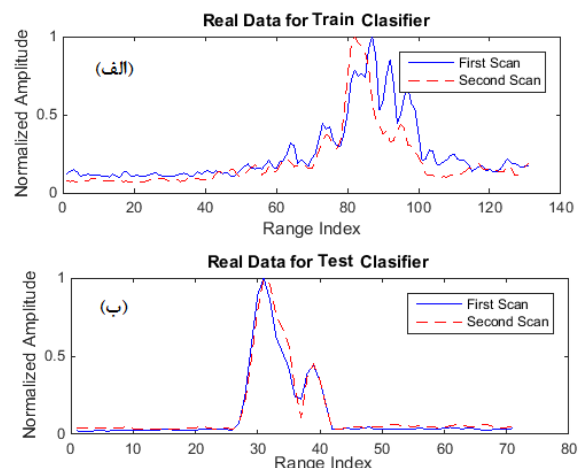
در خصوص چف، شکل (۷) رفتار pdf دامنه آن را که رایلی می‌باشد، و مقایسه آن با تئوری را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمایش شبیه‌سازی pdf دامنه دوقطبی‌های چف و مقایسه آن با تئوری

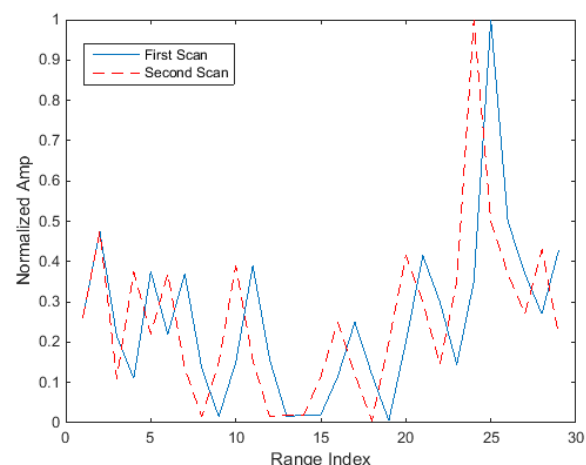
لازم به ذکر است در تحلیل توجع، به‌عنوان رفتار اولین ویژگی از انحراف استاندارد نمونه‌ها که به میانگین نرمالیزه شده است، استفاده گردید.

تفاوت نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده هدف و چف در میزان همبستگی نمونه‌های آنها نیز می‌باشد که با توجه به شکل (۱) برای چف مقدار ۱۸ ms انتخاب گردیده است. در خصوص هدف، با توجه به اینکه گستردگی طیف آن باید کمتر از چف باشد، میزان همبستگی نمونه‌های آن بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، با توجه به این‌که مدل بینابین سورلینگ (نه همبستگی کامل نمونه‌ها و نه کاملاً ناهمبسته بودن آنها) برای هدف فرض شده است، طول زمان همبستگی ۱۰۰ میلی ثانیه برای هدف در نظر گرفته شده است. لازم به بیان است که کل زمان مشاهده و دریافت پژواک ۴۰۰ میلی ثانیه در شبیه‌سازی تعریف شد. بدین‌منظور از تابع خودهمبستگی گوسی به فرم (۱۴) که  $\tau$  طول زمانی همبستگی و  $k$  مقدار متناظر آن می‌باشد، در شبیه‌سازی به‌کار رفته است.



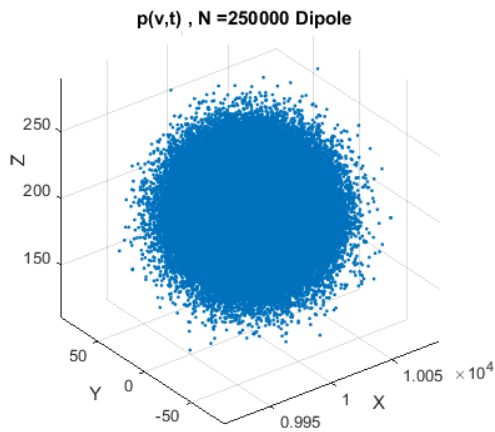
شکل (۴): نمایش داده‌های واقعی نرمالیزه شده پژواک دو کشتی در دو اسکن متوالی (الف) کشتی اول (ب) کشتی دوم

مجموعه دوم، داده‌های شبیه‌سازی‌شده پژواک کشتی، حاصل از نرم‌افزار الکترومغناطیسی می‌باشد که در [۹] به‌کار رفته است. در این مقاله در داده‌های مذکور، نسبت به [۹] تغییرات اسکن به اسکن موقعیت پس انتشار در راستای فاصله در آن گنجانده شد تا داده‌ها به واقعیت و آنچه در عمل اتفاق می‌افتد، مطابقت بهتری داشته باشند (همچنان‌که در شکل (۴-الف) دیده می‌شود). این نکته در [۹] مورد توجه قرار نگرفته و فقط نویز به آن افزوده گردیده است. شکل (۵) داده‌های پژواک شبیه‌سازی‌شده در دو اسکن متوالی و در سلول‌های فاصله و بدون حضور نویز را نشان می‌دهد.



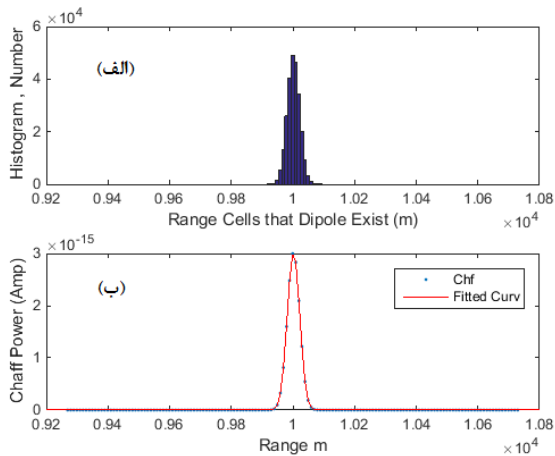
شکل (۵): نمایش داده‌های پژواک شبیه‌سازی‌شده کشتی در دو اسکن متوالی و بدون حضور نویز در راستای فاصله

از بین مدل‌های مختلف سورلینگ، مدل تعمیم‌یافته آن با توجع بینابین و توزیع دامنه pdf رایلی شبیه‌سازی گردید. شکل (۶) مقایسه CDF<sup>۱</sup> نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده و تئوری برای هدف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی نحوه توزیع دوقطبی‌های ابر چف در مکان

در مواجهه رادار با چنین ابری، سیگنال پژواک بازگشتی فرمی متقارن خواهد داشت. تعداد دوقطبی‌هایی که در هر کدام از سلول‌های فاصله رادار قرار می‌گیرند، در شکل (۱۱-الف) نشان داده شده است. نمایش پژواک حاصل از دوقطبی‌هایی که در هر کدام از سلول‌های رادار قرار گرفته‌اند، بر اساس معادله استاندارد رادار و با مشخصه‌های جدول (۱)، در شکل (۱۱-ب) آمده است.



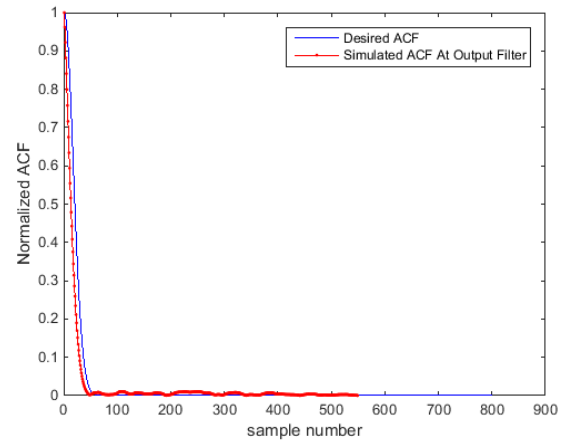
شکل (۱۱): (الف) تعداد دوقطبی‌های ابر چف شکل (۱۰) در سلول‌های فاصله (ب) پژواک حاصل از ابر چف شکل (۱۰) در سلول‌های فاصله

رفتار تقارن پژواک‌های بازگشتی از چف در راستای فاصله به‌عنوان سومین ویژگی، مشهود است. در خصوص هدفی مثل کشتی، رفتار پژواک آن بر حسب فاصله شعاعی متقارن نبوده و یا میزان تقارن سیگنال‌های بازگشتی از کشتی کمتر از چف خواهد بود. چنین رفتاری از شکل‌های (۴-۵) مشهود است. چنین اختلافی امکان تشخیص هدف از چف در فضای مذکور بر اساس رابطه (۴) را فراهم می‌آورد.

در خصوص ویژگی و یا فضای تنکی، با توجه به شکل (۱۲)، که پژواک واقعی و نرمالیزه شده هدف و شبیه‌سازی چف شکوفا شده در فاصله ۱۰ km را نشان می‌دهد، بر اساس رابطه (۵)

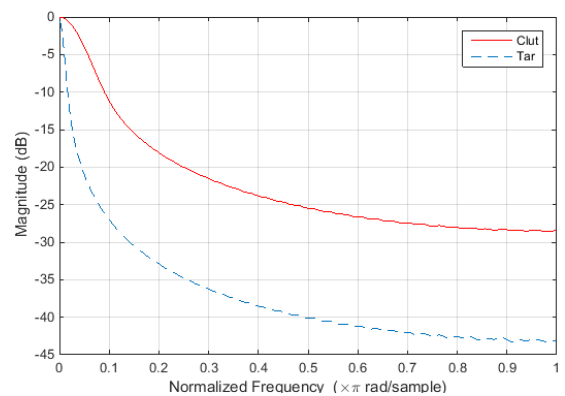
$$ACF(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}, \quad \alpha = (1/\tau^2) \ln(1/k) \quad (14)$$

شکل (۸) خودهمبستگی نمونه‌های تولیدشده برای چف و مقایسه آن با تئوری را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نمایش خود همبستگی نمونه‌های تولید شده چف و مقایسه آن با تئوری برای  $\tau = 18 \text{ ms}$

از آنجا که رفتار همبستگی نمونه‌ها، طیف آنها را نیز نشان می‌دهد، شکل (۹) رفتار طیف چف (PSD<sup>۱</sup>) و مقایسه آن با طیف هدف را نشان می‌دهد.

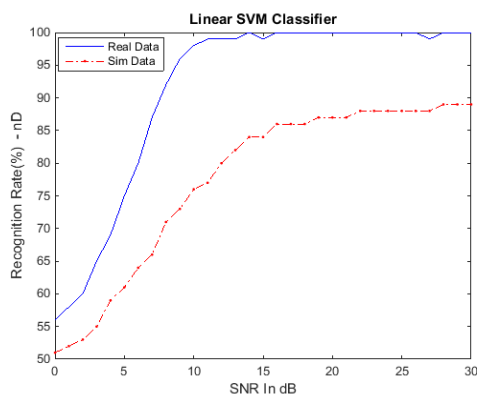


شکل (۹): PSD طیف چف و هدف شبیه‌سازی شده

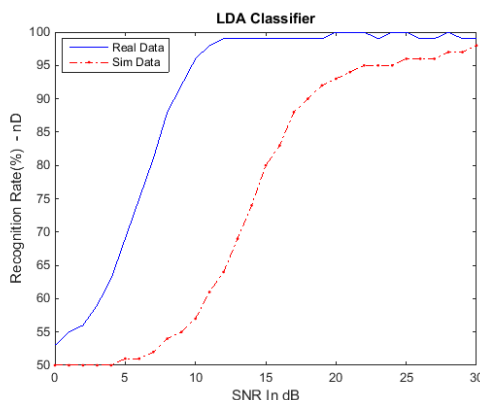
ملاحظه می‌گردد، چف دارای پهنای طیف گسترده‌تری نسبت به هدف است که این ناشی از زمان همبستگی کمتر تعریف‌شده برای چف می‌باشد و صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده را نشان می‌دهد. بنابراین، دومین ویژگی را می‌توان پهنای طیف و یا زمان همبستگی نمونه‌ها در نظر گرفت.

شکل (۱۰) شبیه‌سازی نحوه توزیع دوقطبی‌های ابر چف در مکان و در موقعیت  $[x,y,z]=[10000,0,200] \text{ m}$  و واریانس  $400 \text{ m}$  در راستای هر کدام از مولفه‌ها و تعداد  $N=25000$  دوقطبی را نشان می‌دهد.

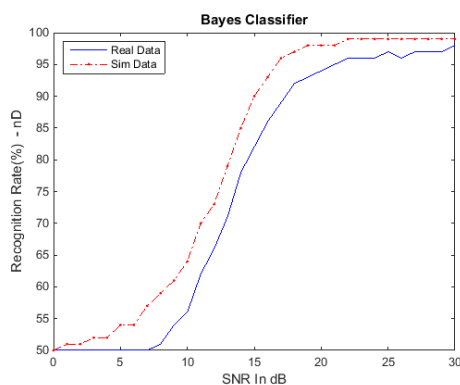
پیشنهادی می‌باشد. نتایج دقت تشخیص طبقه‌بندی‌های مختلف در فضای چندبعدی (4D) و با داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده، در شکل‌های (۱۷-۱۴) نشان داده شد. مقایسه عملکرد طبقه‌بندی‌ها با یکدیگر و با داده‌های واقعی در شکل (۱۸) آمده است. ضمناً نسبت توان سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده هدف، چف و نویز در جدول (۱) آمده است.



شکل (۱۴): نمایش دقت تشخیص طبقه‌بند SVM خطی در فضای چندبعدی با داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده

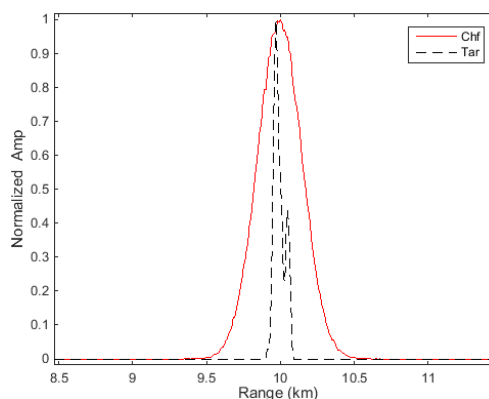


شکل (۱۵): نمایش دقت تشخیص طبقه‌بند LDA در فضای چندبعدی با داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده



شکل (۱۶): نمایش دقت تشخیص طبقه‌بند بیز در فضای چندبعدی با داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده

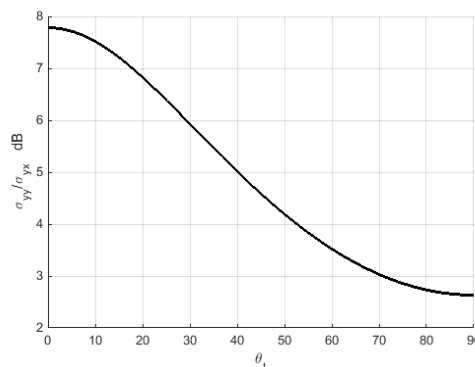
می‌توان به ارزیابی میزان تنگی به‌عنوان چهارمین ویژگی به تشخیص آنها پرداخت.



شکل (۱۷): نمایش پژواک واقعی هدف و شبیه‌سازی چف شکوفاشده و نرمالیزه شده در فاصله ۱۰ km

لازم به ذکر است، با شبیه‌سازی تابش سیگنال رادار با مشخصات جدول (۱) به ابر چف شکل (۱۰)، شکل (۱۱-ب) حاصل گردید و نرمالیزه شده آن - برای مقایسه با داده واقعی رادار - در شکل (۱۲) آمده است.

در مورد فضای قطبش، شکل (۱۳) منحنی نسبت قطبش اصلی به متعامد به‌ازای مقادیر مختلف  $\theta_i$  بر اساس روابط (۸) و (۹) برای چف را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نسبت  $\bar{\sigma}_{\theta_y} / \bar{\sigma}_{\theta_x}$  به‌ازای مقادیر مختلف  $\theta_i$  برای چف

ملاحظه می‌شود، حداکثر مقدار نسبت مذکور در قطبش عمودی بوده (به‌ازای  $\theta_i = 0$ ) و برای سایر قطبش‌های خطی، این نسبت کمتر است. ضمناً این نسبت در مورد هدف، بیش از مقادیر حاصله برای چف می‌باشد. لازم به ذکر است به‌دلیل پیچیدگی، اثر قطبش شبیه‌سازی نشده است. علاوه بر این، رادار تحت آزمایش نیز فاقد چنین قابلیت (کار با قطبش‌های مختلف) بوده است. لذا شبیه‌سازی‌های تشخیص، در فضای چهار بعد (4D) از پنج بعد بررسی‌شده در بخش دوم، انجام شده است.

بخش دوم شبیه‌سازی‌ها مربوط به الگوریتم و طرح



برخی مشخصه‌های راداری برای شبیه‌سازی ویژگی‌ها در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مقادیر برخی مشخصه‌های راداری برای شبیه‌سازی

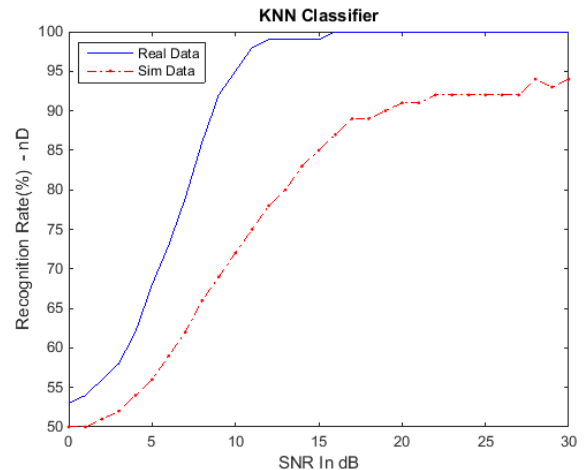
مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۱۰ متر	طول تفکیک فاصله	۸-۱۲ گیگاهرتز	باند فرکانسی
۲۵ دسی‌بل	بهره آنتن	۱۰۰ وات	توان
۲ کیلوهرتز	نرخ ارسال پالس	۴۰۰ میلی‌ثانیه	طول زمانی مشاهده
۶۵ نانوثانیه	طول پالس	۲۰۰ متر	طول هدف
۲۵ دسی‌بل	آموزش	نسبت چف	نسبت چف
۳۰ دسی‌بل	آزمون	به نوبت	به نوبت
۱۰۰ میلی‌ثانیه	نسبت چف	۱۰۰ میلی‌ثانیه	نسبت چف
۱۸ میلی‌ثانیه	نسبت چف	۱۸ میلی‌ثانیه	نسبت چف
۲۰ دسی‌بل	آموزش	نسبت سیگنال	نسبت سیگنال
۳۰ تا ۳۰ دسی‌بل	آموزش	نسبت سیگنال	نسبت سیگنال
۳۰ تا ۳۰ دسی‌بل	آموزش	نسبت سیگنال	نسبت سیگنال
۳۰ تا ۳۰ دسی‌بل	آموزش	نسبت سیگنال	نسبت سیگنال

لازم به ذکر است، در شبیه‌سازی فرض گردید چف شکوفا شده، به نحوی که نسبت چف به نویز ثابت بوده و توان هدف متغیر بوده است.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت اجرای آزمون‌های آزمایشگاهی چف در اتاق آنتن و نیز عدم دسترسی به نرم‌افزار تولید داده‌های ابر چف، شبیه‌سازی آن حائز اهمیت است. در این تحقیق شبیه‌سازی رفتار ابر چف در فضای ویژگی چهاربعدی (4D) که ویژگی‌ها مرتبط به هم هستند، انجام شده و از دستاوردهای این پژوهش می‌باشد. در خصوص هدف، برای نمونه‌های در راستای سلول‌های فاصله از داده شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار الکترومغناطیسی که در [۹] به کار رفته است، مورد استفاده قرار گرفت. برای این که داده‌ها به واقعیت و آنچه در عمل اتفاق می‌افتد، مطابقت بهتری داشته باشند، در موقعیت نمونه‌های پس انتشار پژواک، تغییر تصادفی ایجاد گردید. نکته‌ای که در [۹] مورد توجه قرار نگرفته است. ضمناً نمونه‌های هدف در راستای زمان و یا یک سلول خاص راداری، مطابق تحلیل‌های انجام شده در بخش دوم شبیه‌سازی شد.

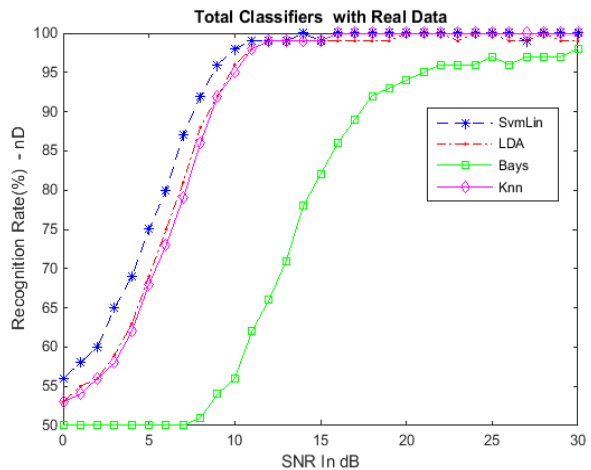
سامانه‌های راداری با کاربرد دریایی که از روش‌های پردازشی مرسوم در حوزه زمان و یا بسامد استفاده می‌کنند، فاقد امکان تشخیص هدف از چف هستند. تحقیقات این مقاله مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی و واقعی حاصل از آزمایش‌های عملی رادار باند X نشان می‌دهد، توسط پردازشگر مبتنی بر فرایند آموزش و آزمون طبقه‌بندها در فضای چندبعدی می‌توان به این منظور با دقت مطلوب دست یافت. استفاده از طبقه‌بندها در فضای چندبعدی برای تشخیص، از دستاوردهای دیگر این پژوهش می‌باشد. در این راستا نتایج شکل (۱۸) نشان می‌دهد، طبقه‌بند



شکل (۱۷): نمایش دقت تشخیص طبقه‌بند KNN در فضای چندبعدی با داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده

لازم به ذکر است برای شبیه‌سازی طبقه‌بند KNN از تعداد ۵ همسایه نزدیک‌تر استفاده شده است.

شکل‌های (۱۷-۱۴) نشان می‌دهد، به جز برای طبقه‌بند بیز، دقت تشخیص بهتری برای سایر طبقه‌بندها در مواجهه با داده‌های واقعی حاصل شده است. چنین کارایی عملکردی ناشی از تغییرات واقعی در دامنه و محل نقاط پس انتشار پژواک می‌باشد که ارزش اطلاعاتی بیشتری نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده دارد.



شکل (۱۸): مقایسه دقت تشخیص طبقه‌بندهای مختلف

در فضای چندبعدی با داده‌های واقعی

با توجه به شکل (۱۸) ملاحظه می‌شود در کاربرد مورد نظر، از بین طبقه‌بندهای مختلف بیز، LDA، KNN و SVM، طبقه‌بند SVM دقت تشخیص بهتری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، افت دقت تشخیص طبقه‌بند بیز نسبت به سایر طبقه‌بندها ناشی دوری شرایط بهینگی ویژگی‌ها (گوسی بودن ویژگی) در داده‌های واقعی می‌باشد.

- [6] G. A. Ioannidis, "Model for spectral and polarization characteristics of chaff," IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, vol. 5, no. 5, pp. 723-726, Sep. 1979.
- [7] S. Xianhe and D. Hai, "Echo theoretical analysis from chaff cloud and research polarization targets recognition," IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology ICMMT '07, April 2007.
- [8] B. Tang, H. M. Li, and X. Q. Sheng, "Jamming recognition method based on the full polarization scattering matrix of chaff clouds," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 6, Issue: 13, pp. 1451-1460, Oct. 2012.
- [9] G. Tang, K. Zhao, H. Zhao, and Z. Zhu, "A novel discrimination method of ship and chaff based on sparseness for naval radar," IEEE Radar Conference, RADAR'08, 2008.
- [10] F. Xiongjun, Y. Honghua, J. Changyong, and G. Meiguo, "Chaff Jamming Recognition for Anti- vessel End-guidance Radars," International Congress on Image and Signal Processing, CISP '09, 2009.
- [11] E. Ilkka and K. Arto, "Chaff Clutter Filtering from Radar Data with Discrete Wavelet Transform," IEEE Radar Conference, 2008.
- [12] G. Galati, "Advanced Radar Techniques and Systems," Peter Peregrinus Ltd. On behalf of the IEE, UK, 1993.
- [13] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems," 3rd ed. MC Graw Hill, Singapore, 2001.
- [14] M. M. Nayebi, "Detection of Radar Targets in Clutter plus Noise," Ph. D. Thesis, Tarbiat Modarres Univ., Feb. 1984.
- [15] M. R. Taban, "Detection of Radar Signal in Non Gaussian Condition," Ph. D. Thesis, Isfahan Univ. of Technology, 1989.
- [16] D. C. Scheleher, "Electronic Warfare in the Information Age," Artech House, 1999.

SVM کارایی عملکرد مناسبتری داشته و به عنوان طبقه‌بند انتخابی برای تشخیص هدف از چف در کاربرد دریایی پیشنهاد می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

نگارنده بدین وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت مهندسی رستافن ارتباط بخاطر در اختیار قراردادن داده‌های واقعی اعلام می‌دارد.

### ۷- مراجع

- [1] G. Tang, et al., "Symmetry measurement of radar echoes and its application in ship and Chaff discrimination," IET International Conference on Radar, pp. 138-141, 2009.
- [2] C. F. Brian and B. Sc. Butters, "Chaff," IEE Proceedings F-communications, Radar and Signal Processing, vol. 129, no. 3, pp. 197-201, Jun. 1982.
- [3] B. Liu and W. Chang, "Research on Vesel and Chaff Echo Characteristics for Wideband Coherent Radar," Progress in Electromagnetics Research C, pp. 145-159, 2013.
- [4] G. Zhan, et al., "Research on K-L transform based on wavelet transform for anti-chaff-jamming," Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011.
- [5] X. Shao, D. Hai, and X. Jinghong, "A recognition method depended on enlarge the difference between target and chaff," International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2007.

---

## **Discrimination of the Target and Chaff in Multi-dimensional Space**

**N. A. Zarei, M. M. Nayebi\*, A. R. Amin, M. Raees Danaei, H. Aalami**

Sharif University of Technology

(Received: 17/04/2017, Accepted: 09/05/2018)

### **Abstract**

Abstract: Among the various techniques of electronic warfare in the sea, Chaff is very particular due to its easy application, low-cost manufacturing and its impact on the victim radar. Despite the fact that the use of Chaff is dated back to the 1940s, the significant research has not been published on its recognition. It is difficult to study the behavior of Chaff because of the impossibility of Chaff tests in an anechoic chamber. Therefore, the simulation would be a suitable alternative for the study of its behavior. In this paper, the simulation of various features of the target and Chaff are presented in a multi-dimensional space whose features are dependent together. This multi-dimensional space is used to propose a processing structure, based on train and test of the various classifiers, for discrimination between Chaff and the target. Moreover, the comparison between discrimination capability of various classifiers using simulated and real data is carried out and the suitable classifier is concluded for sea applications.

**Keywords:** Electronic Warfare, Chaff, Classifier, Target

---

\* Corresponding author E-mail: nayebi@sharif.ir