

# مدل سازی و شبیه سازی ویژگی های راداری چف دریایی در فضای چندبعدی

نادعلی زارعی<sup>۱</sup>، استادیار، احمدرضا امین<sup>۲</sup>، استادیار؛ محمدمهدی نایبی<sup>۳</sup>، استاد؛ میثم رییس دانایی<sup>۴</sup>، استادیار؛ حبیباله اعلمی<sup>۵</sup>، دانشیار

۱- دانشکده برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران - zareina@ihu.ac.ir

۲- دانشکده برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران - aamin@ihu.ac.ir

۳- دانشکده برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران - nayebi@sharif.edu

۴- دانشکده برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران - mradanaee@ihu.ac.ir

۵- دانشکده برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران - halami@ihu.ac.ir

**چکیده:** امروزه چف به عنوان یکی از موثرترین تکنیک های جنگ الکترونیک، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. عدم امکان اجرای تست های آزمایشگاهی چف در اتاق آنتن، مطالعه رفتار آن را با مشکل مواجه کرده است. از این رو شبیه سازی رفتار چف حائز اهمیت خواهد بود. در این مقاله با در نظر گرفتن رادارهای متداول، مدل سازی و شبیه سازی ویژگی های چف دریایی برای هر کدام از حالت های جستجو و ردیابی رادار انجام شده است. برای حالت جستجوی رادار و یا سناریوی گمراه سازی چف فضاهای مختلف شش بعدی (6D) شامل، تغییرات RCS، گستردگی داپلر، تقارن در راستای فاصله، تنگی در راستای فاصله، اثر پلاریزاسیون، انحراف استاندارد نمونه ها در راستای فاصله مورد توجه قرار گرفته است. اما برای حالت ردیابی رادار و یا سناریوی فریبنده چف، مدل سازی و شبیه سازی فضای یک بعدی (1D) نویز فرآیند به همراه ماتریس کوواریانس پیشگویی کالمن انجام شده است. پیشنهاد استفاده از نویز فرآیند به عنوان ویژگی متمایز کننده هدف از چف در حالت ردیابی رادار، نوآوری این مقاله می باشد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن حالت جستجوی رادار شبیه سازی ویژگی های آن در فضای مختلف از دستاوردهای دیگر این مقاله است.

**واژه های کلیدی:** جنگ الکترونیک، دریایی، چف، چندبعدی، ویژگی.

## Modeling and Simulation of Naval Chaff Radar Features in MultiDimensional Space

NadAli Zarei<sup>1</sup>, Assistant professor; Ahmad Reza Amin<sup>2</sup>, Assistant professor; Mohammad Mahdi Nayebi<sup>3</sup>, Professor; Meysam Raees Danaee<sup>4</sup>, Assistant professor; Habibollah Aalami<sup>5</sup>, Associate professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein Comprehensive University, Tehran, Iran, Email: zareina@ihu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein Comprehensive University, Tehran, Iran, Email: aamin@ihu.ac.ir

3- Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: nayebi@sharif.edu

4- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein Comprehensive University, Tehran, Iran, Email: mradanaee@ihu.ac.ir

5- Faculty of Electrical Engineering, Imam Housein Comprehensive University, Tehran, Iran, Email: halami@ihu.ac.ir

**Abstract:** Today's Chaff as one of the most effective techniques of electronic warfare, has a particular importance. 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 and have importance role for study of its behavior. In this paper, By considering conventional radar, the modeling and simulation of various features of sea chaff for search and tracking modes are performed. For radar search mode, six-dimensional spaces (6Ds) including: The RCS (Radar Cross Section) fluctuation, doppler width, symmetry and sparsity in range axis, polarization effect and standard deviation in range axis have been considered. But for radar tracking mode, modeling and simulation of the process noise in the 1D dimensional space, along with the Kalman prediction covariance matrix has been accomplished. The suggestion to use of process noise as a distinctive feature of the target from chaff is the innovation of this paper. In addition, considering the radar search mode, modeling and simulating its features in various spaces are other achievements of this article.

**Keywords:** Electronic Warfare, Sea, Chaff, Multidimensional, Feature.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ و ۱۳۹۷/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۰

نام نویسنده مسئول: احمدرضا امین

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

## ۱- مقدمه

پیشنهاد شده است. در واقع ایده استفاده از نویز فرایند، به عنوان ویژگی متمایز کننده هدف از چف، نوآوری اصلی این مقاله است. این ایده تا کنون در کاربرد مورد بحث، به آن توجه نشده و جایی به چاپ نرسیده است.

بدین منظور در بخش دوم مقاله، مدل ریاضی ویژگی های راداری چف با کاربرد دریایی و در حالت های جستجو و ردیابی رادار مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، شبیه سازی هر کدام از ویژگی ها ارائه گردید. در نهایت، نتیجه گیری در بخش چهارم آمده است.

## ۲- ویژگی های راداری چف

ویژگی های راداری عواملی هستند که پارامترهای سیگنال در فضای تابش از جمله انرژی، فرکانس، پلاریزاسیون و ... را با توجه به زاویه دید به فضای بازتابش به هم مرتبط می سازند در واقع نوعی نگاشت از فضای تابش به فضای بازتابش خواهیم داشت [۱۹]. یک رادار برای اهداف گوناگون، سیگنال یکسانی را ارسال می کند و اهداف به دلیل اختلافات فیزیکی و ساختاری که با یکدیگر دارند، اثرات غیر مشابهی بر روی سیگنال خواهند گذاشت و از همین موارد اختلاف به عنوان ویژگی هایی، استفاده می گردد.

در کاربرد جنگ الکترونیک دریایی، برای خودمحافظی<sup>۱۱</sup> از کشتی یا هدف توسط چف، از دو سناریوی متداول گمراه سازی<sup>۱۱</sup> (پرتاب چف در حالت جستجوی رادار و در سلول های مجاور هدف) و فریبنده<sup>۱۲</sup> (پرتاب چف در حالت ردیابی رادار و در همان سلول هدف) استفاده می شود [۲۰، ۳].

با در نظر گرفتن سناریوی گمراه سازی چف، اولین ویژگی، سطح مقطع راداری و میزان تغییرات آن است. وابستگی<sup>۱۳</sup> RCS به پارامترهای پارامترهای مختلف ایجاب می کند تا سی<sup>۱۴</sup> بازگشتی به صورت تصادفی مدل گردد که همان مدل های سورلینگ هستند [۲۱-۲۳]. اگر  $S_k$  نمونه  $k$  ام سیگنال دریافتی و به صورت

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

باشند،  $\phi_k$  فاز شروع اولیه،  $\Omega_k$  فرکانس داپلر آن و  $A_k$  دامنه تصادفی نمونه ها هستند. در کار سورلینگ دامنه نمونه ها یا کاملاً همبسته (تموج آهسته) و یا کاملاً ناهمبسته (تموج سریع) فرض می شوند [۲۳-۲۲]. در واقع مدل های سورلینگ را می توان به عنوان ویژگی از جنبه تغییرات تصادفی RCS و میزان همبستگی آنها مورد توجه قرار داد.

در خصوص چف، رزونانس برای دیپل های<sup>۱۴</sup> با طول تقریبی  $L = \lambda/2$  اتفاق می افتد [۲۴] و ماکزیمم مقدار آن  $0.857\lambda^2 \text{ m}^2$  می باشد [۲۵]. همچنین RCS دیپل های  $\lambda/2$  با جهت های تصادفی به طور متوسط  $0.15\lambda^2 \text{ m}^2$  [۲۶] و یا  $0.17\lambda^2 \text{ m}^2$  [۲۷، ۲۰] می باشد. موقعی که تعداد زیادی از دیپل های چف به صورت تصادفی توزیع شده باشند، صرف نظر از نوع توزیع هر کدام از دیپل ها، pdf<sup>۱۵</sup> کل آن با توجه به قضیه حد مرکزی، دارای توزیع گوسی است [۲۸، ۲۹]. چراکه فرض استقلال در خصوص تک تک دیپل ها می تواند برقرار باشد. شکل

در جنگ الکترونیک، چف یکی از مهمترین تداخل کننده های پسو می باشد. تاریخچه استفاده از چف به جنگ جهانی دوم و سالهای ۱۹۴۰ بر می گردد [۱]. ترکیب چف با سایر روش های جنگ الکترونیک، اهمیت آن را برای پژوهشگران بیشتر کرده است. از جمله می توان به تکنیک جمینگ<sup>۱</sup> JAFF [۲] و مود کشیدن<sup>۲</sup> اشاره کرد [۳]. لذا چف یک حوزه تحقیقاتی مورد علاقه باقی مانده است [۴]. موضوع چف را در حوزه های زمان، فرکانس و پلاریزاسیون و نیز چند سنسوری می توان مورد توجه قرار داد. به خاطر پیچیدگی رفتار چف به شرایط جوی و اتمسفر، روش های حوزه زمان و فرکانس - بخصوص در کاربرد دریایی - قابل اطمینان نیستند [۵]. تکنیک های مبتنی بر چند سنسوری و چابکی پلاریزاسیون<sup>۳</sup> دارای مشکلات پیاده سازی بوده و به تجهیزات پیچیده نیاز دارند [۶]. با این حال در [۷] از شبکه راداری در کاربرد هوایی برای تشخیص چف استفاده گردید. در [۸] با ترکیب اطلاعات سنسور GPS/INS و رادار برای تشخیص محل هدف از چف استفاده گردید. همچنین می توان از ترکیب اطلاعات رادار و دوربین IR بهره برد. علاوه بر این، در [۹-۱۱، ۴] الگوریتم های مبتنی بر چابکی پلاریزاسیون مورد بررسی قرار گرفته است.

روش های حوزه زمان مبتنی بر تقارن نمونه های نمایه فاصله<sup>۴</sup>، تشابه نمونه های هر پالس و تنکی به ترتیب در [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] بر اساس داده های شبیه سازی شده توسط نرم افزارهای الکترومغناطیسی بررسی شده است. در [۱۵] از داده های شبیه سازی شده و واقعی حاصل از رادار دریایی در باند X و در راستای فاصله استفاده شده است. در [۱۶] از DWT<sup>۵</sup> برای تحقق بانک فیلتر و فیلترینگ چف استفاده شده است. در [۱۷] از معیار RCS برای تشخیص استفاده شده است. در [۱۸] از ایده<sup>۶</sup> ZMNL برای شبیه سازی ابر چف استفاده شده است.

معمولاً سیگنال های اخلا<sup>۷</sup> در جنگ الکترونیک، در یک بعد یا فضا به رادار قربانی حمله الکترونیکی می کنند. از جهت مقابله الکترونیکی، تحلیل سیگنال در فضای چندگانه حائز اهمیت است. در این مقاله با در نظر گرفتن حالت های جستجو و ردیابی رادارهای متداول دریایی، ویژگی های مختلف چف مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت جستجوی رادار، از چف در سناریوی گمراه سازی<sup>۸</sup> استفاده می گردد [۳-۲]. تغییرات RCS و یا تموج، گستردگی داپلر، تقارن در راستای فاصله، تنکی در راستای فاصله، اثر پلاریزاسیون و انحراف استاندارد نمونه ها در راستای فاصله شش بعد<sup>۹</sup> ویژگی ها در سناریوی گمراه سازی هستند که مدل سازی و شبیه سازی برای آنها انجام شده است. در این راستا، با کنار هم قرار دادن ویژگی های مجزا و تشکیل بردار ویژگی، فضای چندبعدی را می توان مورد توجه قرار داد تا در صورت ناپایداری یکی از ویژگی ها ناشی از جنگ الکترونیک، از سایر ویژگی ها برای مقابله الکترونیکی بهره برداری نمود. در حالت ردیابی رادار، چف در سناریوی فریبنده<sup>۱۰</sup> مورد استفاده قرار می گیرد [۲-۳]. در این مقاله برای حالت ردیابی رادار، نویز فرایند و اثر آن بر ماتریس کوواریانس پیشگویی کالمن، به عنوان ویژگی

تحلیل های احتمالی برای موقعیت قرارگیری دیپل ها در مکان  $x$  و زمان  $t$ ، می توان ثابت کرد [۲۷]:

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

که  $A_x$  و  $B_x$  به ترتیب ضرایب ثابت شیفت و پخش شدگی در راستای محور  $x$  بوده و معادله فوکر-پلانک-کولموگروف (FPK) نامیده می شود. در واقع مدل توزیع چف دارای توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار متغیر با زمان و به ترتیب  $A_x t$  و  $B_x t$  می باشد.

با فرض اینکه استقلال اغتشاشات اتمسفری در طول محورهای  $Ox$ ،  $Oy$  و  $Oz$  برقرار باشد، تابع چگالی احتمال فضایی به صورت رابطه  $p(v, t) = p(x, t) * p(y, t) * p(z, t)$  قابل بیان است [۲۷]. چنین نحوه توزیع چف در فضا موجب می گردد، سیگنال پژواک دریافت شده از ابر چف فرمی متقارن در راستای فاصله و زاویه سمت داشته باشد. در واقع تقارن مکانی پژواک های بازگشتی، سومین ویژگی مورد توجه در این مقاله می باشد.

با فرض اینکه  $m$  امین پژواک هدف در راستای فاصله  $S_m(n)$  که  $n = 1, \dots, N_m$  و طول  $S_m(n)$  است، در [۱۵] رابطه (۴) برای اندازه گیری 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 می باشد. مسلماً هر چه  $\xi_{sym}$  به مقدار صفر نزدیکتر باشد، نمونه های دریافتی متقارن تر خواهند بود.

تنکی<sup>۱۸</sup> پژواک های دریافتی ویژگی دیگری - چهارمین ویژگی - است که می توان مورد توجه قرار داد. برای هدفی مثل کشتی، پژواک های بازگشتی، معمولاً دارای پیک های تنکی هستند. در مقابل، موقعی که ابر چف در فضا شکوفا گردد، سیگنال بازگشتی دیپل ها از توزیع گوسی تبعیت می کنند. لذا مراکز پس انتشار قوی دیپل ها در همه جای ابر چف وجود خواهند داشت. در نتیجه، پژواک ابر چف در زاویه و فاصله، نسبت به کشتی پیوسته و مترامک بوده و تنک نخواهد بود [۱۳].

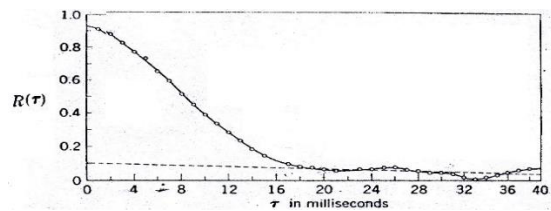
مجموعه  $C_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  زیر مجموعه ای از فضای صفر و یک با  $n$  المان که  $m$  تای آن غیر صفر و  $n-m$  تای آن صفر است را در نظر بگیرید. فرض کنید که  $m_i$  تعداد المان های غیر صفر در مجموعه  $C_{m_i} = \{x_1, x_2, \dots, x_{m_i}\}$  باشد، که در آن  $i = 1, 2, \dots, n$  است. تعریف می کنیم:

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

$d(x_i)$  اختلاف تنکی<sup>۱۹</sup> مجموعه  $C_n$  در نقطه  $x_i$  بوده و میزان تنکی در محدوده  $(x_1, x_n)$  را نشان می دهد. هر چه  $d(x_i)$  بزرگتر باشد،  $C_n$  تنک تر است و بالعکس [۱۳].

پنجمین ویژگی مورد توجه، اثر پلاریزاسیون است. اگر  $\sigma_{max}$  بیشترین مقدار RCS دیپل چف باشد و  $\theta_t$  جهت میدان مغناطیسی

(۱) تابع خودهمبستگی رفتار نمونه های ابر چف، حاصل از تست واقعی با رادار باند  $x$ ، را نشان می دهد [۲۸].



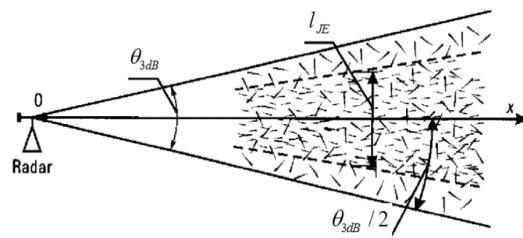
شکل (۱): نمایش تابع خودهمبستگی نمونه های ابر چف حاصل از تست واقعی با رادار باند  $x$  [۲۶]

ملاحظه می گردد، نمونه های ابر چف تا حدود 18 ms تغییرات آرام و کندی دارند. همچنین در این لحظه تابع خودهمبستگی دارای مقدار  $R(\tau) = 0.1$  می باشد. لذا نمونه های ابر چف دارای همبستگی زمانی در حدود 18 ms هستند.

دومین ویژگی، گستردگی داپلر می باشد. جرم و مشخصات آیرودینامیکی دیپل های چف، حرکت آزاد آنها در اثر جریان های هوایی و شرایط باد را تضمین می کند [۲۸]. اما هدف به عنوان جسمی صلب فاقد چنین حرکت های آزاد است. چنین رفتاری موجب می گردد طیف پژواک دیپل های چف گستردگی قابل توجهی - یا طول زمانی همبستگی دامنه نمونه ها کم - داشته باشد. پهنای طیف ابر چف در حدود چند ده هرتز بوده و در سرعت وزش باد بالا تا چند صد هرتز نیز می رسد [۳۰]. در واقع دامنه سیگنال های بازگشتی به طور تصادفی در زمان تغییر می کند و افت و خیزهای حاصله باعث پهن شدن طیف چف می شود. نتایج تحقیقات تجربی نشان می دهد، تابع چگالی طیفی مربوط به افت و خیزهای دامنه سیگنال برگشتی از ابر چف به فرم گوسی با رابطه (۲) است [۲۷].

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

که پهنای طیف نیم توان و  $f_{0.5} = 4v_x/\lambda$  متوسط سرعت دوقطبی ها در جهت محور  $Ox$  و  $\lambda$  طول موج رادار می باشد. شکل (۲) هندسه و مؤلفه های سرعت دوقطبی های چف در راستای محور  $Ox$  با انحراف استاندارد  $I_{JE}$  و راداری با پهنای پرتو  $\theta_{3dB}$  را نشان می دهد [۲۷].



شکل (۲): نمایش مؤلفه های سرعت دوقطبی های چف در راستای  $Ox$  [۲۷]

در خصوص مدل توزیع چف در فضا به عنوان سومین ویژگی، دیپل های آن به طور تصادفی و مطابق تلاطم های موجود، حرکتی به صورت افت و خیزهای تصادفی دارند. فرآیند حرکت آن از نوع مارکوف<sup>۱۶</sup> بوده و با

با فرض اینکه  $V$  سرعت شعاعی هدف یا چف و  $\lambda$  طول موج راداری باشد، فرکانس داپلر دریافتی توسط آن را می‌توان به صورت  $f = 2v / \lambda$  نوشت. با مشتق‌گیری داریم:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{2(\partial v / \partial t)}{\lambda} = \frac{2a}{\lambda} \quad (13)$$

با فرض اینکه در رادار از فیلتر منطبق استفاده شده باشد و بنابراین خواهد بود.  $\Delta t = 1 / \Delta f = 1 / B$ ،  $\Delta f = B$  و در نتیجه برای شتاب دریافتی توسط رادار، رابطه

$$a = \frac{\lambda}{2} B^2 \quad (14)$$

برقرار است که  $B$  پهنای باند طیف سیگنال دریافتی می‌باشد. با توجه به اینکه پهنای باند با مدت زمان همبستگی سیگنال نسبت عکس دارد، در مقایسه چف با هدف خواهیم داشت:

$$a_c = \left(\frac{B_c}{B_t}\right)^2 a_t = \left(\frac{\tau_t}{\tau_c}\right)^2 a_t \quad (15)$$

که  $a_c$ ،  $a_t$  و  $\tau_c$  به ترتیب شتاب چف، شتاب هدف و طول زمان همبستگی چف هستند. هدف، برخلاف چف، صلب بوده و فاقد حرکت‌های آزاد در اثر جریان‌های هوایی و شرایط باد است [۲۷]. لذا طول زمانی همبستگی بیشتری نسبت به چف دارد. در واقع  $\tau_t > \tau_c$  می‌باشد. بنابراین، با توجه به رابطه (۱۵)، در مورد شتاب هدف و چف  $a_c > a_t$  خواهد بود. چنین رفتار شتابی موجب می‌گردد برای ماتریس کوواریانس حالت هدف و چف  $Q_c > Q_t$  برقرار باشد. بنابراین می‌توان گفت، اهداف دریایی که حرکت آهسته دارند دارای مؤلفه  $Q$  کوچکی هستند. در مقابل، اهدافی که دینامیک آن‌ها سریعاً تغییر می‌کند - از جمله چف - مؤلفه  $Q$  بزرگی دارند. در اینصورت با توجه به رابطه (۱۲) و وابستگی  $Q$  به ماتریس کوواریانس خطای  $MSE[n | n-1]$  (برای هدف و چف، عبارت

$$\text{Trace}(P_c[n | n-1]) < \text{Trace}(P_t[n | n-1]) \quad (16)$$

برقرار خواهد بود. در واقع خطای  $MSE$  ماتریس کوواریانس پیشگویی چف بزرگ‌تر از هدف می‌باشد. نامساوی (۱۶) را می‌توان به‌عنوان ویژگی هفتم مورد توجه قرار داد.

لازم به ذکر است، سایر ویژگی‌های مورد توجه - از جمله توان و سرعت چف - با توجه به اینکه اهداف دریایی می‌توانند در حدود RCS و سرعت چف باشند، در بردار ویژگی دخالت داده نشده است. در واقع سرعت افقی ابر چف با سرعت کشتی یکسان فرض شده است. در [۲۷] بر اساس نتایج آزمایشات عملی، سرعت متوسط چف مقدار 11 m/s گزارش شده است. بنابراین، سرعت کشتی در بدترین حالت که طیف چف و هدف همپوشانی داشته باشند، مقدار 11 m/s خواهد بود. با کنار هم قرار دادن هر کدام از ویژگی‌ها و ایجاد بردار فضای چند بعدی، می‌توان به ویژگی‌های چندگانه دست یافت.

موج ارسالی رادار را نشان دهد، مؤلفه RCS آن را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۰-۱۱].

$$\sigma_{\theta,y} = \sigma_{\max} (\cos^2 \theta \cos \theta_t + \sin \theta \sin \theta_t \cos \theta \sin \varphi)^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta,x} = \sigma_{\max} (\sin \theta_t \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos \theta_t \cos \theta \sin \theta \sin \varphi)^2 \quad (7)$$

با فرض اینکه دیپل‌های ابر چف به صورت کره شکوفا شده باشند، برای متوسط مؤلفه‌های RCS آن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta,y} &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (\cos^2 \theta \cos \theta_t + \sin \theta \sin \theta_t \cos \theta \sin \varphi)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (8) \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \left( \frac{4}{5} - \frac{1}{15} \sin^2 \theta_t \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta,x} &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (\sin \theta_t \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos \theta_t \cos \theta \sin \theta \sin \varphi)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (9) \\ &= \frac{\sigma_{\max}}{4\pi} \left( \frac{2}{15} + \frac{4}{15} \sin^2 \theta_t \right) \end{aligned}$$

با فرض پلاریزاسیون عمودی که  $\theta_t = 0$  می‌باشد، داریم:

$$\frac{\bar{\sigma}_{\theta,y}}{\bar{\sigma}_{\theta,x}} = \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{yx}} = 6 \equiv 7.782 \text{ dB} \quad (10)$$

که در واقع نسبت مؤلفه پلاریزاسیون اصلی<sup>۲۰</sup> ابر چف به مؤلفه پلاریزاسیون متقابل<sup>۲۱</sup> آن بوده و بدین معنی است که اگر رادار موج پلاریزاسیون شده عمودی ارسال کند این نسبت به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

از آنجا که نحوه توزیع ابر چف در راستای فاصله به صورت گوسی است، تغییرات نمونه‌های آن در این راستا هموار خواهد بود. در مورد اهدافی مثل کشتی، به دلیل وجود بخشهای مختلف بر روی آن، تغییرات نمونه‌های هدف در راستای فاصله سریع خواهد بود [۳۱]. بنابراین، انحراف استاندارد نمونه‌های هدف و چف در راستای فاصله و یا تموج در راستای فاصله را می‌توان به‌عنوان ویژگی ششم در نظر گرفت.

همچنانکه اشاره شد، سناریوی دیگر به‌کارگیری چف بر علیه رادارهای دریایی، سناریوی فرینده می‌باشد [۲۰-۳، ۲]. در این سناریو، با جداسدن چف از هدف، ردیاب چندگیتی رادار، به‌طور همزمان هر دو را، بر اساس معادلات بازگشتی فیلتر کالمن، ردیابی خواهد کرد. در فیلتر کالمن از بردار حالت (۱۱) برای بیان رفتار حرکتی هدف استفاده می‌شود [۳۲].

$$S[n] = FS[n-1] + Gu[n] \quad (11)$$

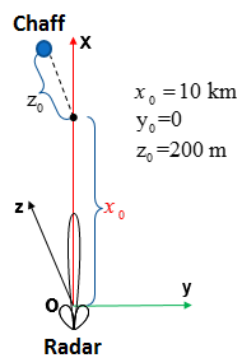
که  $u[n]$  نشان دهنده رفتار فیزیکی فرایند و در مورد هدف، معرف آهنگ تغییرات شتاب و  $F$  ماتریس انتقال حالت<sup>۲۲</sup> و  $G$  ضریب برداری نویز فرایند می‌باشد. همچنین  $u[n]$  دارای توزیع گوسی با میانگین صفر، واریانس  $\sigma_u^2$  و ماتریس کوواریانس  $Q[n]$  می‌باشد. ضمناً ماتریس کوواریانس خطای  $MSE$  پیشگویی به صورت [۳۲]

$$P[n | n-1] = FP[n-1 | n-1]F^T + GQG^T \quad (12)$$

که  $H$  ماتریس مشاهدات<sup>۲۳</sup> می‌باشد.

### ۳- شبیه سازی ها

همچنانکه در بخش های قبل اشاره شد، در حالت جستجوی رادار از سناریوی گمراه سازی چف استفاده می شود. در حالت ردیابی رادار نیز سناریوی فریبنده چف مورد استفاده قرار می گیرد. در این بخش ابتدا ویژگی های مورد نظر برای حالت جستجوی رادار را بررسی می کنیم. سپس به ویژگی مورد توجه در حالت ردیابی می پردازیم. لازم به ذکر است، هندسه سناریوی رادار و چف مطابق شکل (۳) فرض گردید. در واقع رادار در موقعیت مبدأ مختصات قرار دارد. چف شکوفا شده نیز در فاصله  $x_0 = 10 \text{ km}$  و در ارتفاع  $z_0 = 200 \text{ m}$  واقع شده است.



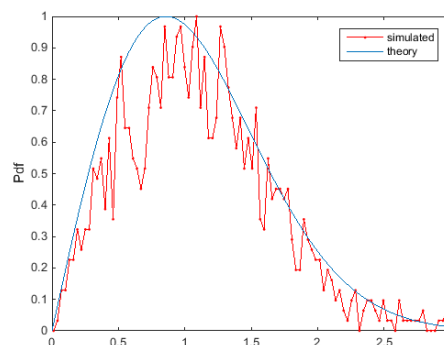
شکل (۳): نمایش هندسه سناریوی مورد نظر برای شبیه سازی

برخی پارامترهای راداری بکار رفته در این پژوهش در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مقادیر برخی پارامترهای رادار برای شبیه سازی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۰ متر	طول رزولوشن رادار	۸-۱۲ گیگاهرتز	باندکاری
۲۵ دسی بل	بهره آنتن	۱۰۰ وات	توان ارسالی
۲ کیلوهرتز	نرخ ارسال پالس	افقی	پلاریزاسیون
		۱۱ متر بر ثانیه	سرعت هدف

لازم به ذکر است، در شبیه سازی فرض گردید چف شکوفا شده است. شکل (۴) رفتار pdf دامنه چف که رایلی می باشد و مقایسه آن با تئوری را نشان می دهد.



شکل (۴): شبیه سازی pdf دامنه دیپل های چف و مقایسه آن با تئوری

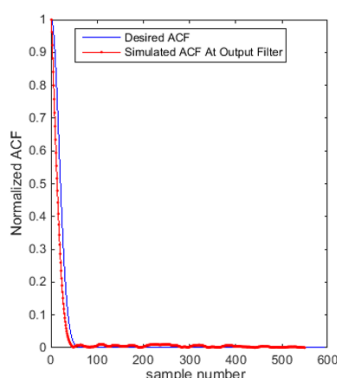
انطباق pdf نمونه های تولید شده چف بر مدل تئوری رایلی مشهود است و صحت شبیه سازی انجام شده را نشان می دهد.

لازم به ذکر است در تحلیل موج - به عنوان رفتار اولین ویژگی - از انحراف استاندارد نمونه های شکل (۴) که به توان نمونه ها نرمالیزه شده است، می توان استفاده نمود.

میزان همبستگی نمونه های چف - به عنوان دومین ویژگی - با توجه به شکل (۱) مقدار 18 ms است. بدین منظور از تابع خود همبستگی گوسی به فرم (۱۳) که طول زمانی همبستگی و k مقدار متناظر آن می باشد، در شبیه سازی بکار رفته است.

$$ACF(\tau) = e^{-\alpha \tau^2}, \quad \alpha = (1/\tau^2) \ln(1/k) \quad (13)$$

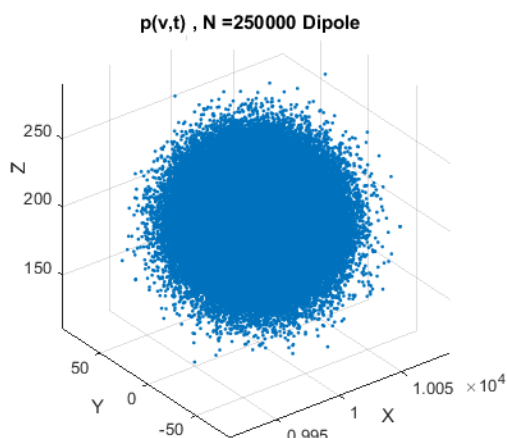
شکل (۵) رفتار تابع خود همبستگی نمونه های تولید شده برای چف و مقایسه آن با تئوری را نشان می دهد.



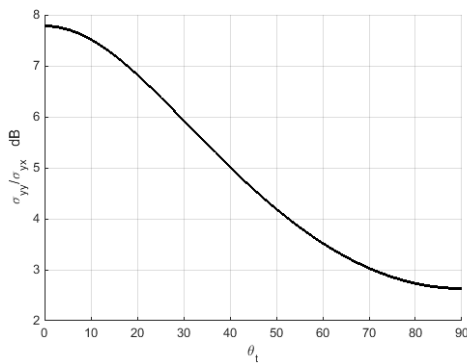
شکل (۵): نمایش خود همبستگی نمونه های تولید شده چف و

مقایسه آن با تئوری برای  $\tau = 18 \text{ ms}$

ملاحظه می گردد، نمونه های تولید شده در حوزه فرکانس نیز بر مدل طیف خواسته شده منطبق است. شکل (۶) شبیه سازی نحوه توزیع دیپل های ابر چف در مکان و با واریانس  $400 \text{ m}^2$  در مکان و در موقعیت  $[x,y,z] = [10000, 0, 200] \text{ m}$  در راستای هر کدام از مولفه ها و تعداد  $N = 250000$  دیپل را نشان می دهد.



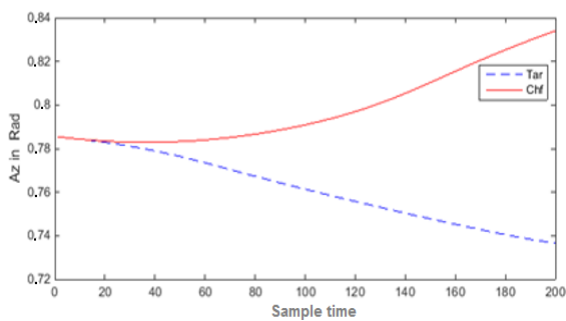
شکل (۶): شبیه سازی نحوه توزیع دیپل های ابر چف در مکان



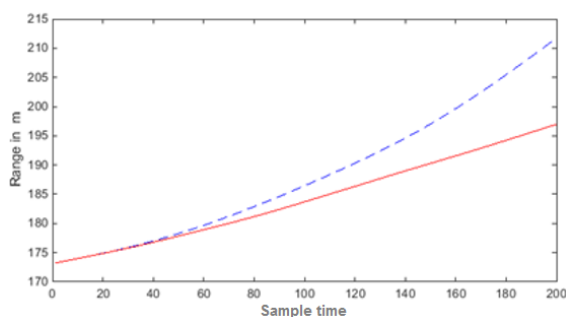
شکل (۸): نسبت  $\bar{\sigma}_{\theta_y} / \bar{\sigma}_{\theta_x}$  به ازای مقادیر مختلف  $\theta_t$  برای چف ملاحظه می‌گردد، حداکثر مقدار نسبت مذکور در پلاریزاسیون عمودی بوده (به ازای  $\theta_t = 0$ ) و برای سایر پلاریزاسیون‌های خطی، این نسبت کمتر است.

در مورد ویژگی ششم، با توجه به شکل (۷) برای نمونه‌های راستای فاصله می‌توان به محاسبه انحراف استاندارد در این راستا پرداخت. در واقع ویژگی مذکور مربوط به تغییرات دامنه نمونه‌های شکل (ب-۷) می‌باشد. لازم به ذکر است، ویژگی تنکی با توجه به رابطه (۵) به میزان گسترده و یا تنک بودن هر پیک دریافتی در راستای فاصله مربوط می‌شود.

هفتمین ویژگی که به سناریوی فریبده چف مربوط است، تریس ماتریس کوواریانس کالمن می‌باشد. شکل (۹) شبیه‌سازی بردار حالت هدف و چف از لحظه پرتاب چف را نشان می‌دهد.



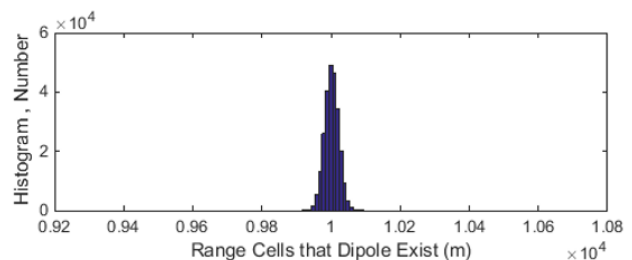
الف) زاویه سمت



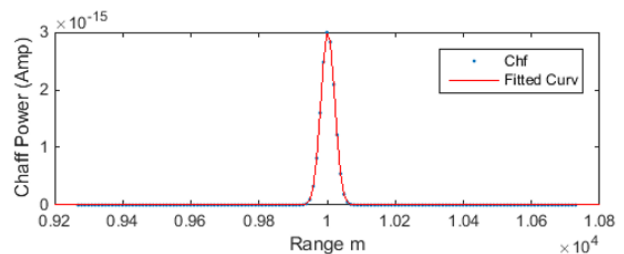
ب) فاصله

شکل (۹): بردار حالت هدف (خط چین) و چف (خط ممتد) در مختصات قطبی

شبیه‌سازی شکل (۶) بر مبنای هندسه سناریوی شکل (۳) و نحوه توزیع دیپل‌های چف مبتنی بر رابطه (۳) را نشان می‌دهد. در مواجهه رادار با چنین ابری، سیگنال پژواک بازگشتی فرمی متقارن خواهد داشت. تعداد دیپل‌هایی که در هر کدام از سلول‌های فاصله رادار قرار می‌گیرند، در شکل (الف-۷) نشان داده شده است. نمایش پژواک حاصل از دیپل‌هایی که در هر کدام از سلول‌های رادار قرار گرفته‌اند، بر اساس معادله استاندارد رادار و با پارامترهای جدول (۲)، در شکل (ب-۷) آمده است.



الف)



ب)

شکل (۷): الف) تعداد دیپل‌های ابر چف شکل (۶) در سلول‌های فاصله ب) پژواک حاصل از ابر چف شکل (۶) در سلول‌های فاصله

رفتار تقارن پژواک‌های بازگشتی از چف در راستای فاصله به‌عنوان سومین ویژگی، مشهود است. در واقع اگر محل پیک نمونه‌ها را به‌عنوان محور تقارن در نظر بگیریم، نسبت به محور مذکور تقارن نمونه‌های دریافتی در راستای فاصله برقرار است. لازم به ذکر است، با شبیه‌سازی تابش سیگنال رادار با مشخصات جدول (۱) به ابر چف شکل (۶)، شکل (ب-۷) حاصل گردید.

در خصوص ویژگی و یا فضای تنکی، با توجه به شکل (۷)، که پژواک شبیه‌سازی چف شکوفا شده در فاصله 10 km را نشان می‌دهد، بر اساس رابطه (۶) می‌توان به ارزیابی میزان تنکی - به‌عنوان چهارمین ویژگی - پرداخت. با این وجود، با توجه به شکل (ب-۷) عدم وجود پیک‌های تنک در نمونه‌های چف مشهود است. چنین رفتار چف ناشی از این است که دیپل‌های ابر چف در همه جای پترن رادار قرار دارند و بازتابی را ایجاد می‌کنند.

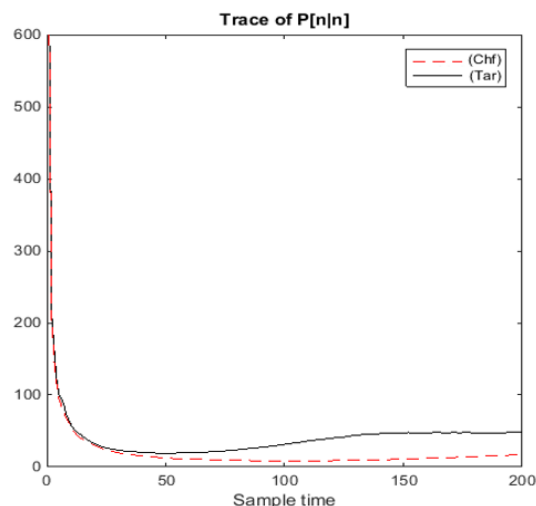
در مورد فضای پلاریزاسیون - به‌عنوان پنجمین ویژگی - با توجه به اینکه رادارهای متداول فاقد قابلیت کار با پلاریزاسیون‌های مختلف هستند، شبیه‌سازی نشده است. اما شکل (۸) منحنی نسبت پلاریزاسیون اصلی به متعامد به ازای مقادیر مختلف  $\theta_t$  بر اساس روابط (۸) و (۹) را نشان می‌دهد.

این ویژگی می توان هدف و چف را در سناریوی فریبنده چف متمایز نمود.

### مراجع

- [1] 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.
- [2] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense systems*, 2nd ed., Artech House, 2001.
- [3] D. Adamy, *A first Course in Electronic Warfare*, Artech House, 2001.
- [4] B. Tang. and 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, no. 13, pp. 1451-1460, 2012.
- [5] B. Liu and W. Chang, "Research on Vesel and Chaff Echo Characteristics for Wideband Coherent Radar", Progress in Electromagnetics Research C, pp. 145-159, Oct. 2013.
- [6] C. F. Lin, "Modern Navigation, Guidance, and Control Processing", Prentice Hall, 1991.
- [7] G. Zhan, et al. "Research on K-L transform based on wavelet transform for anti-chaff-jamming." Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), International Conference on. IEEE, 2011.
- [8] Y. Yang, et al., "Detection of chaff centroid jamming aided by GPS/INS", IET Radar, Sonar & Navi. Vol. 7, pp. 130-142, 2013.
- [9] X. Shao and 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] G. Tang and 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.
- [14] F. Xiongjun and Y. Honghua and J. Changyong and G. Meiguo, "Chaff Jamming Recognition for Anti- vessel End-guidance Radars", International Congress on Image and Signal Processing, CISP '09, 2009.
- [15] N. Zarei and M.M. Nayeibi and A.R. Amin and R.D. Meysam and H. Aalami, "Discrimination of Target and Chaff in Marine Applications Based On Symmetry Feature", IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, Ukraine, August 29-31, 2017.
- [16] E. Ilkka and K. Arto, "Chaff Clutter Filtering from Radar Data with Discrete Wavelet Transform", IEEE Radar Conference, 2008.
- [17] P. Sun, et al. "On Spreading Chaff Cloud for Countering the Terminal Guidance Missile", Proceedings of IEEE CIE International Conference on Radar, Vol. 1, pp. 845-849, 2011
- [18] M. Jianchun, et al. "Math Model Building and Echo Simulation of Chaff Clouds Jamming." IET International Radar Conference. 2009.
- [19] G. Galati, *Advanced Radar Techniques and Systems*, Peter Peregrinus Ltd. On behalf of the IEE, UK, 1993.
- [20] Scheleher D. C., *Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, 1999.
- [21] M.I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. MC Graw Hill, Singapore 2001.

ملاحظه می گردد، از نمونه زمانی سی ام به بعد هدف و چف در حال جدا شدن هستند. با جداشدن هدف و چف، هر کدام به صورت همزمان توسط فیلترهای کالمن مجزا ردیابی می شوند. شکل (۱۰) منحنی تریس خطای MSE ماتریس کوواریانس تخمین دو فیلتر کالمن را نشان می دهد.



شکل (۱۰): تریس ماتریس کوواریانس تخمین فیلتر کالمن هدف و چف

ملاحظه می گردد، تریس ماتریس کوواریانس فیلتر کالمن مربوط به چف مقدار بزرگتری نسبت به فیلتر کالمن مربوط به هدف دارد. لازم به ذکر است برای شبیه سازی کالمن از مدل  $CA^{24}$  با  $T=256$  ms و

$$G1 = \begin{bmatrix} T^3 & T^2 & T \\ 6 & 2 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad G = G1 \otimes I_{3 \times 3} \quad (13)$$

$$F1 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = F1 \otimes I_{3 \times 3}$$

و برای چف  $\sigma_{\text{chf}}^2 = 50 \text{ m}^2$  استفاده گردید. همچنین برای هدف  $\sigma_{\text{tar}}^2 = 3 \text{ m}^2$  در نظر گرفته شده است [۳۳].

### ۴- نتیجه گیری

تست های آزمایشگاهی چف در اتاق آنتن قابل انجام نیست. همچنین اجرای تست های میدانی و عملیاتی - آن هم در کاربرد دریایی - بسیار هزینه بر می باشد. لذا تحقیق در مورد چف برای پژوهشگران با مشکل مواجهه است. چنین موضوعاتی اهمیت شبیه سازی رفتار چف را نشان می دهد. در این مقاله با در نظر گرفتن دو حالت جستجو و ردیابی رادار، شبیه سازی رفتار چف در کاربرد دریایی مورد مطالعه قرار گرفته است. در حالت جستجوی رادار شبیه سازی رفتار چف در فضای ویژگی شش بعدی (6D) انجام شده و از دستاوردهای این مقاله می باشد. در حالت ردیابی رادار، استفاده از ویژگی نویز فرایند به همراه ماتریس کوواریانس پیشگویی کالمن به عنوان نوآوری در این مقاله ارائه شده است. نتایج شبیه سازی شکل های (۹) و (۱۰) نشان می دهد توسط

- [27] S. A. Vakin and L. N. Shustov and R. H. Dunwel, *Fundamentals of Electronic Warfare*, Artech House, 2001.
- [28] D.C. Schleher, *MTI and Pulsed Doppler Radar*, Artech House, 1991.
- [29] A. Papoulis, *Probability Random Variables and Stochastic Processes*, 3rd ed. MC Graw-Hill, New York, 1990.
- [30] W.J. Estes, "Spectral Characteristics of Radar Echoes from Aircraft dispensed chaff", IEEE Trans. AES, Vol. 21, pp. 8-20, 1985.
- [31] S. He, et al., "Investigation of Range Profiles from a Simplified Ship on Rough Sea Surface and Its Multipath Imaging Mechanisms", International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2012, pp. 1-6, 2012.
- [32] S. M. Kay, *Fundamentals Of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.
- [33] J. R. Rao, *Multi-sensor data fusion with MATLAB*, CRC Press, 2010.
- [۲۲] محمد مهدی نایی، آشکارسازی سیگنال رادار در کلاتر و نویز، پایان نامه برای اخذ درجه دکترا در رشته مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۲.
- [۲۳] محمدرضا تابان، آشکارسازی سیگنال رادار در حالت غیرگوسی، پایان نامه برای اخذ درجه دکترا در رشته مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۷۷.
- [24] M. V. Maksimov and M. P. Bobnev and L. N. Shustov and B. K. Krivitskiy and G.I. Gorgonov and V.A. Ilin and B.M. Stepanov, *Radar Antijamming*, Artech House, 1979.
- [25] F. E. Nathanson and J. P. Reilly and M. N. Cohen, *Radar Design Principles*, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [26] G. R. Curry, *Radar System Performance Modeling*, 2nd ed., Artech House, 2005.

## زیر نویس‌ها

<sup>13</sup> Radar Cross Section

<sup>14</sup> Dipole

<sup>15</sup> Probability Density Function

<sup>16</sup> Markovian

<sup>17</sup> Fokker Planck Kolmogorov

<sup>18</sup> Sparseness

<sup>19</sup> Sparse Discrepancy

<sup>20</sup> Co Polarization

<sup>21</sup> Cross Polarization

<sup>22</sup> Transition state

<sup>23</sup> Observation model

<sup>24</sup> Constant Acceleration

<sup>1</sup> Jamming with chaff

<sup>2</sup> Dump Mode

<sup>3</sup> Polarization Agile

<sup>4</sup> Range Profile

<sup>5</sup> Discrete Wavelet Transform

<sup>6</sup> Zero Memory Non Linearity

<sup>7</sup> Jamming

<sup>8</sup> Distraction

<sup>9</sup> Seduction

<sup>10</sup> Self-Protection

<sup>11</sup> Distraction

<sup>12</sup> Seduction