

## ارائه مدلی نزدیک به واقع، به منظور تولید سیگنال بازگشتی رادار پالسی از هدف و چف و راستی آزمایی آن با داده

### عملی

سید مهدی ضیایی<sup>۱</sup>، پوریا اعتضادی فر<sup>۲</sup>، یاسر نوروزی<sup>۳</sup>

دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران، Petezadifar@ihu.ac.ir

آستادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران

آستادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیر کبیر - تهران - ایران

### چکیده

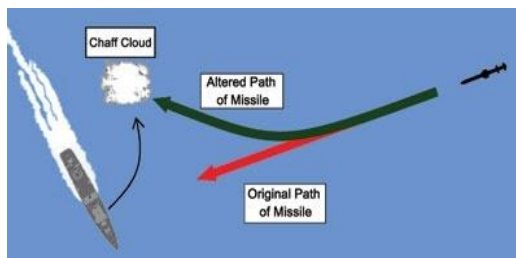
یکی از کارآمدترین روش‌ها برای مقابله با رادارهای رهگیر، ایجاد هدف جعلی به صورت پسیو مانند دکوی راداری یا پرتاب چف است. روش‌های مختلفی برای مقابله با فریب حاصل از چف مطرح شده‌است. در تمام مقالات نیاز است داده مربوط به سیگنال بازگشتی از هدف و چف در دست باشد. تهیه داده واقعی در این زمینه بسیار هزینه‌بر می‌باشد. بدین منظور در این مقاله سیگنال بازگشتی از هدف و چف با در نظر گرفتن تغییرات محیطی که منجر به تغییر در نوع شکوفایی چف می‌گردد؛ در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده است. در انتها، جهت راستی آزمایی مدل شبیه‌سازی شده، شباهت رفتاری آن با داده واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله اثرات جوی از قبیل سرعت، آشفتگی و چینه باد مد نظر واقع شده است. همچنین پارامترهای پالس از قبیل پهنای پالس، نوع کد، پهنای باند و غیره مورد ارزیابی واقع شد. از آنجایی که نتایج بدست آمده مطابقت قابل قبولی با داده بدست آمده از واقعیت دارد می‌توان از بستر ایجاد شده در این مقاله، برای بررسی روش‌های جداسازی چف و هدف استفاده نمود.

### کلیدواژه

چف، رهگیری، هدف، اقدامات متقابل الکترونیکی.

### مقدمه

وضعیت را نشان می‌دهد. بدین ترتیب قفل روی هدف اصلی شکسته شده و موشک به سمت هدف کاذب متمایل می‌گردد. برای مقابله با این فرایند، لازم است رادار به کمک ساختار مناسب‌تر و الگوریتم‌های هوشمندانه‌تری، شرایط تمایز بین هدف اصلی و کاذب را ایجاد نماید. در تحقیقات انجام گرفته روی چف و مقالات ارائه شده، ویژگی‌های چف در حوزه‌های مختلف از جمله دامنه یا RCS سیگنال، زمان، فرکانس و پلاریزاسیون بیان شده است. نتیجه این بررسی‌ها، استخراج ویژگی‌های متمایزکننده ابر چف و هدف است که در اینجا به اختصار به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.



شکل ۱. سناریوی گمراهی موشک با چف.

در اغلب موشک‌های ضد کشتی (و یا ضد پرنده) به منظور هدایت دقیق تا هدف و برخورد موشک به هدف با احتمال بالا، از هدایت‌کننده راداری استفاده می‌شود. این رادار می‌باید پس از جستجو و آشکارسازی هدف بر روی آن قفل نماید. به همین دلیل نوع این رادارها از نوع ردگیر است. به منظور مقابله با رادار ردگیر موشک، در ادبیات رایج جنگ الکترونیک روش‌های مختلف اختلال و فریب بیان شده است. میزان کارایی و توانمندی این روش‌ها در مقابل رادار به قابلیت‌های ECCM رادار موشک و نیز رفتار موشک در فازهای مختلف پرتاب بستگی دارد. از کارآمدترین روش‌ها در مقابل این نوع رادارها ایجاد هدف جعلی به صورت پسیو مانند دکوی راداری و یا پرتاب چف است. از آنجا که رادار هدایت‌کننده موشک در محدوده بیم خود به دنبال بزرگ‌ترین بازگشتی خواهد رفت، در صورتی که قدرت تمایزی بین هدف اصلی و جعلی نداشته باشد به سمت هدف جعلی که سطح مقطع راداری آن بزرگ‌تر از هدف اصلی است متمایل خواهد شد. شکل ۱ نمایی از این

اولین ویژگی سطح مقطع راداری و میزان تغییرات آن است. همبستگی زمانی نمونه‌های چف بسیار کمتر از نمونه‌های هدف می‌باشد. دومین ویژگی در حوزه فرکانس و داپلر برگشتی از چف است. طیف سیگنال برگشتی از چف گستردگی بیشتری نسبت به طیف برگشتی هدف واقعی دارد. سومین ویژگی مدل توزیع چف در فضا می‌باشد. سیگنال بازگشتی از چف در مکان (فاصله و زاویه) متقارن است. چهارمین ویژگی پیوسته و متراکم بودن سیگنال بازگشتی از چف در فاصله و زاویه است. این در حالی است که سیگنال برگشتی از هدف دارای پیک‌های تنک است. پنجمین ویژگی بحث اثر قطبش (پلاریزاسیون) است. نسبت مؤلفه قطبش اصلی به متقابل در برگشتی چف کمتر از یک کشتی است. بر اساس هریک از موارد ذکر شده می‌توان خطوط و آستانه تمایزی را بین چف و هدف واقعی در نظر گرفت و با ایجاد ساختار متناسب در رادار به دنبال تشخیص صحیح هدف بود. از این رو بر اساس این وجوه تمایز بیان‌شده روش‌هایی برای تشخیص چف از هدف ارائه گردیده که هریک به نوبه خود و از دیدگاه‌های مختلف دارای ضعف و قوت است.

هدف مقاله به دست آوردن مدلی مناسب برای شبیه‌سازی سیگنال چف می‌باشد. این مقاله با در نظر گرفتن ویژگی‌های آماری و رفتار طیفی سیگنال چف مدل مناسبی به دست می‌دهد که مطابقت قابل قبولی با داده واقعی دارند.

ساختار این متن به این صورت می‌باشد که در بخش دوم به تحقیقات و گزارشات پیشینان در زمینه شبیه‌سازی چف و جداسازی چف از هدف پرداخته می‌شود. در بخش سوم مدل ریاضی مورد استفاده برای چف و هدف، معرفی می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی آمده است و در مورد نتایج آن بحث گردیده است. در آخر نیز مباحث جمع‌بندی گردیده‌اند.

## تحقیقات پیشینان

در [۱] آقای میکائیل بندایان و همکارانش، با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده به شبیه‌سازی سیگنال بازگشتی از توده چف در حوزه طیف و نیز توزیع سطح مقطع راداری آن در محیط دریایی پرداخته‌اند. این مقاله اهمیت بسیاری در شناخت ویژگی‌های چف دارد. در [۲] جین دان و همکاران، سیگنال برگشتی از چف را بر اساس سیگنال با مدولاسیون خطی فرکانس مدل‌سازی کرده‌اند. در این مقاله سعی شده با در نظر گرفتن مشخصات آماری و توزیع زمان-فرکانس چف مدل مناسبی از آن شبیه‌سازی گردد. در [۳] ویژگی‌های چگالی طیف توان (PSD) ابر چف مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، نویسنده، مدلی آماری برای توصیف رفتار طیف و پلاریزاسیون سیگنال بازگشتی رادار که از ابر چف بدست آمده

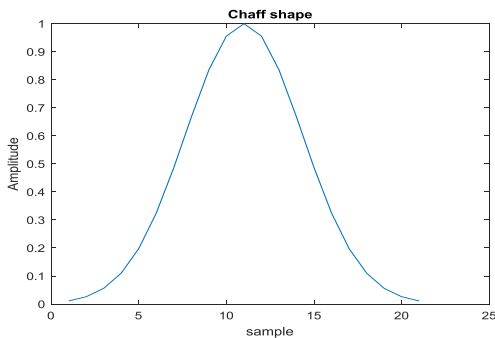
است، ارائه شده است. در [۴] روشی برای مدل‌سازی چف با در نظر گرفتن تمام ویژگی‌های آن پیشنهاد می‌دهد. این ویژگی‌ها، شامل ویژگی‌های حرکتی، ویژگی‌های آماری و رفتار غیرایستانت سیگنال چف می‌باشد. این مدل، برای استفاده در محیط‌های دریایی و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در [۵] مارکوس، روشی را برای مدل‌سازی سطح مقطع راداری (RCS) چف پیشنهاد می‌دهد. این روش مبتنی بر تحلیل تجربی داده‌های واقعی می‌باشد و در نهایت می‌تواند RCS چف را برای هر فرکانس و پلاریزاسیونی به صورت تابعی از مکان، زمان و ویژگی‌های فیبر چف بدست آورد. در [۶] ژیان‌لی و همکارانش به مدلی ریاضی برای جیمینگ چف و ویژگی‌های آماری RCS آن پرداخته‌اند. در [۷] بی‌نان و همکارانش نتایج مطالعات خود را بر روی سیگنال بازگشتی از ابر چف که با استفاده از یک رادار ناهمدوس بدست آمده منتشر نموده‌اند. در نهایت، طی این تحقیق، دو سطح مقطع بازگشتی پلاریمتریکی عمود بر هم بدست آمده است. در [۸ و ۹] مدل‌های عمومی برای مشخصات RCS چف که از رادارهای bi-static بدست آمده‌اند ارائه شده است. در [۸] پالرمو و همکارانش، نتایج بدست آمده از اعمال روش‌های variational برای محاسبه RCS دوقطبی‌های چف در رادارهای bi-static را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده با داده واقعی بدست آمده در رنج ۸۰ کیلومتری مقایسه شده است. در [۹] از این فرضیه استفاده می‌کند که ابر چف از تعداد زیادی پراکنده‌ساز<sup>۱</sup> تشکیل شده است و پراکندگی سطح مقطع ابر چف از میانگین تجمیعی دوقطبی‌های چف بدست می‌آید. در مقالات [۱۰ و ۱۱] به بررسی ویژگی‌های چف نسبت به گذر زمان و ویژگی‌های چف می‌پردازند.

در [۱۲] شنجین فو و همکاران، روشی بر اساس ویژگی‌های چف در حوزه زمان و فرکانس پیشنهاد کرده‌اند که در آن سه الگوریتم متمایز جهت تشخیص چف از هدف ارائه شده است. روش اول تحت عنوان متوسط ضریب همبستگی گری (AGCD) بر اساس میزان همبستگی بین نمونه‌های برگشتی چف و هدف به دنبال تشخیص این دو از هم می‌باشد. روش دوم بیان‌شده تحت عنوان تطبیق مکانی بر اساس تصویرنگاشت یافته از بازگشت چف روی صفحه و بررسی وجود ارتفاع در سیگنال بازگشتی چف و استفاده از افزایش رنج پیش‌آمده، مسئله جداسازی و تشخیص را پیشنهاد کرده است. در الگوریتم سوم به بررسی داپلر ضعیف برای هدف به دلیل گردش و تغییرات زاویه ایی شناور و نیز گستردگی داپلر برای ذرات چف به‌عنوان معیاری برای جداسازی چف و هدف می‌پردازد. آقای چانگ و همکاران در [۱۳] استفاده از اطلاعات پلاریزاسیون را برای تشخیص و جداسازی هدف و چف پیشنهاد

## مدل چف

پارامترهایی که بایستی برای مدل سازی چف مدنظر قرار گیرد شامل رفتار زمانی در یک پالس و رفتار در پالس های متوالی است.

در یک پالس، مدل چف با استفاده از شکل زمانی ابر ایجاد شده با سرعت پرتاب و در فاصله پرتاب شده از شناور اصلی مدل می شود. از آنجایی که ذرات چف به صورت ابرگونه در فضا ظاهر می شوند شکل آن (شکل ۲) در فضا را می توان به صورت گوسی در نظر گرفت.

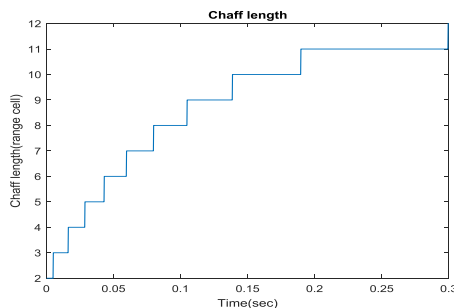


شکل ۱. شکل زمانی مدل چف

این ابر در طول زمان با ثابت زمانی پرتاب بزرگتر می شود و به مقدار نهایی خود می رسد [۱]. طول ابر چف پس از آن ثابت در نظر گرفته می شود.

مشاهده می کنیم که این ابر چف با سرعت در نظر گرفته شده برای آن از شناور فاصله می گیرد.

رفتار چف در پالس های متوالی را می توان با استفاده از مدل طیفی [۱۹]، نوسانات سورلینگ [۱]، مدل داپلر و تغییرات دامنه [۷] مدل کرد.



شکل ۲. رنج سل های چف

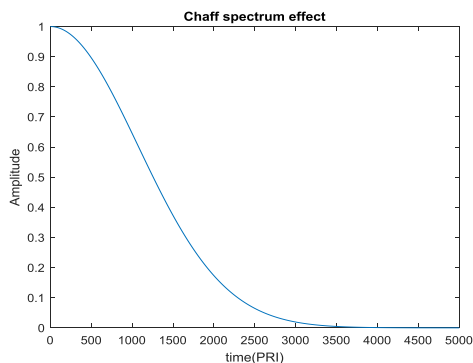
برای مدل سازی طیف چف، طیف فرکانسی چف را به صورت گوسی در نظر می گیریم [۱۹].

$$S_{chaff} = \left( \frac{P_{chaff}}{\sqrt{2\pi}\alpha_{chaff}} \right) e^{-\frac{(f-f_{chaff})^2}{2\alpha_{chaff}^2}} \quad (1)$$

می دهد. در این مقاله مؤلفه اکوی هدف و چف در پلاریزاسیون های مختلف محاسبه و با مقایسه نسبت مؤلفه پلاریزاسیون اصلی ابر چف به مؤلفه پلاریزاسیون متقابل آن، با همین نسبت در هدف اصلی، چف را شناسایی می نماید. در [۱۴] گوانگفو و همکاران با بررسی میزان تنگی<sup>۲</sup> و تراکم سیگنال برگشتی از هدف و چف در حوزه زمان و فرکانس به بررسی تفاوت این دو می پردازند. بر اساس این تحقیق ابتدا مشخص می گردد که سیگنال بازگشتی از هدف در بعد زمان تنگ تر از چف و در فرکانس متراکم تر<sup>۳</sup> می باشد. سپس با اندازه گیری میزان تنگی نمونه های برگشتی، آستانه مناسبی را به عنوان معیار تصمیم گیری انتخاب می نماید. در [۱۵] آقای لیو و همکاران، ضمن معرفی چگونگی رفتار چف پرتابی متمرکز<sup>۴</sup> به تشریح چگونگی تخمین زاویه هدف در حضور اختلال چف می پردازند. چف متمرکز در ابتدا در سلول رنج و زاویه هدف قرار دارد. در این حالت دو هدف غیرقابل تفکیک در زاویه در بیم اصلی قرار دارند. در این مقاله دو روش برای تخمین زاویه ورود سیگنال هدف در این شرایط ارائه شده است. روش اول روش ماکزیمم احتمال<sup>۵</sup> با جستجوی عددی دوبعدی مطرح می گردد که علی رغم دقت مناسب، بار محاسباتی زیادی دارد. در ادامه با توجه به هر دو مسئله دقت و میزان محاسبات، یک روش بهبود یافته ماکزیمم احتمال<sup>۶</sup> ارائه می گردد. آقای جونگ وان یو در [۱۶] به جهت تشخیص اهداف مربوط به هواشناسی مانند توده ابر بارانزا در رادار هواشناسی از سایر اهداف، به بررسی تشخیص توده چف به کمک روش طبقه بندی فازی درختی<sup>۷</sup> پرداخته است. در [۱۷-۱۸] آقای زارعی و همکاران، ابتدا به بررسی ویژگی های متناظر چف و هدف پرداخته اند و سپس به کمک طبقه بندی های مختلف اقدام به جداسازی و تشخیص این دو از هم نموده و در نهایت به منظور افزایش دقت و ضریب اطمینان تشخیص روش ترکیبی و چند بعدی را برای جداسازی و تمایز چف از هدف ارائه کرده اند. البته بدیهی است که نگاه چند بعدی به موضوع سبب کاهش خطا و بهبود دقت می شود ولی در هر صورت حجم بالایی از پردازش ها و ساختار پیچیده ای را تحمیل می نماید. از طرفی کماکان تاثیر شرایط محیطی و نوع هدف در زمان تصمیم گیری مساله ای مهم می باشد.

## مدلسازی ریاضی چف

- <sup>۲</sup> Sparseness
- <sup>۳</sup> dense
- <sup>۴</sup> Chaff centroid jamming
- <sup>۵</sup> maximum likelihood
- <sup>۶</sup> Improved maximum likelihood
- <sup>۷</sup> Tree-initialized fuzzy classifier



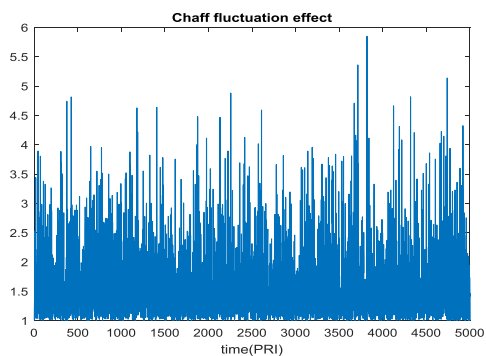
شکل ۴. سیگنال چف با توجه به پارامترهای سرعت باد، جهت نسبی بیم آنتن و اثرات shear و turbulence

از آنجایی که هدف متحرک است، چف تولید شده در آن نیز دارای حرکت است. اثر این حرکت در طیف داپلر ظاهر می‌شود. فرکانس داپلر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (8)$$

این مقدار نیز به صورت فرکانس داپلر در مدل چف در نظر گرفته می‌شود.

دامنه چف در طی زمان دارای نوساناتی است که طبق مقاله [۱] با مدل سورلینگ با درجه آزادی ۲ در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی یک توزیع Chi-square با درجه آزادی ۲ برای آن در نظر می‌گیریم که نمونه‌ای از سیگنال به فرم نشان داده شده در شکل ۶ می‌باشد.



شکل ۵. نمونه‌ای از اثرات نوسان چف

دامنه چف در طول زمان به این صورت عوض می‌شود که ابتدا در مدت زمان کوتاهی افزایش می‌یابد. به این زمان، زمان انفجار می‌گویند. سپس با گذشت زمان دامنه آن، به صورت نمایی کاهش می‌یابد [۷].

$$RCS_a = 0.18\lambda^2 N$$

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{RCS_0}\right)}$$

$$f = \frac{1}{3} (1 + 2(\cos \alpha_T \cos \alpha_R + \cos \beta \sin \alpha_T \sin \alpha_R)^2) \quad (9)$$

$$B(t) = \begin{cases} 1, & t \leq \tau \\ 1, & \tau < t \leq \tau_{IF} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan(t - \tau_{IF} - \Delta), & \tau_{IF} < t \leq \tau_{EF} \end{cases}$$

که در این رابطه  $P_{chaff}$  برابر توان دریافتی متوسط چف،  $f_{chaff}$  فرکانس داپلر متوسط چف و  $\alpha_{chaff}$  انحراف استاندارد آن است. توان متوسط دریافتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{chaff} = \int \frac{P_t G^2 \lambda^2 \bar{x}}{(4\pi)^3 R^4 L_r L_s} dV \quad (2)$$

که در آن  $\bar{x}$  برابر متوسط سطح مقطع راداری چف است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\bar{x}_{chaff} = 22 \times 10^{-9} \lambda W_c \quad (3)$$

در این رابطه  $W_c$  برابر چگالی حجمی چف بر حسب  $g/km^3$  است. فرکانس متوسط داپلر چف از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$f_{votume} = \frac{0.2 V_{wind} \cos(\phi_a - \phi_w)}{\lambda} \quad (4)$$

در این رابطه  $V_{wind}$  برابر سرعت باد و  $\phi_a$  برابر زاویه زینت بیم آنتن و  $\phi_w$  جهت وزش باد است.

انحراف استاندارد طیف چف هم از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$\alpha_{votume} = \frac{0.2 \sqrt{\sigma_{shear}^2 + \sigma_{turb}^2}}{\lambda} \quad (5)$$

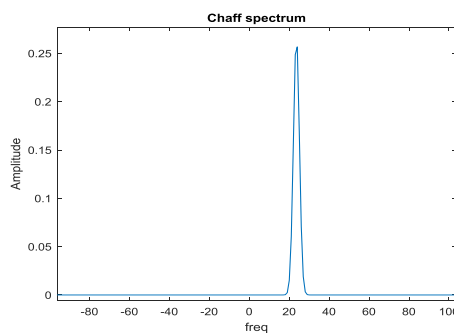
که در آن  $\sigma_{turb}^2$  و  $\sigma_{shear}^2$  به ترتیب اثرات shear (تغییر سرعت باد بر حسب ارتفاع) و turbulence باد هستند [۷].

$$\sigma_{turb} = 0.42KR\varphi \quad (6)$$

که  $R$  برابر فاصله تا رادار و  $\varphi$  عرض بیم ارتفاع آنتن رادار است.

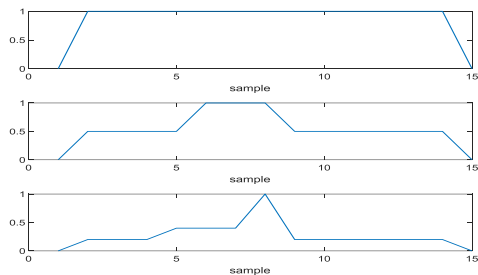
$$\sigma_{turb} = \begin{cases} 1 & 0.3 \leq h \leq 3.6 \\ 0.7 & h > 3.6 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $h$  ارتفاع چف است. طبق رابطه فوق نمودار PSD چف به صورت نشان داده شده در شکل زیر است.



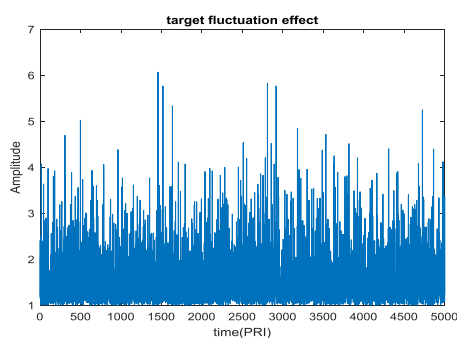
شکل ۳. طیف توان چف

در این نمودار مقدار سرعت باد برابر ۲۰ متر بر ثانیه، جهت نسبی وزش باد به بیم آنتن برابر ۴۵ درجه و اثرات shear و turbulence باد به ترتیب برابر ۰.۷ و ۱ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به PSD فوق شکل سیگنال چف به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۷. شکل زمانی هدف بستگی به شکل کشتی

برای مدل‌سازی نوسانات<sup>۸</sup> دامنه هدف در طول زمان از مدل‌های سورلینگ استفاده می‌شود که نمونه‌ای از آن در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۸. نوسانات هدف در حوزه‌ی زمان

از آنجایی که هدف متحرک است، باید اثر این حرکت را در طیف داپلر ایجاد نمود.

### مدل رادار

برای مدل کردن سیگنال بازگشتی از چف و هدف در گیرنده رادار، بایستی پارامترهای رادار را در مدل در نظر بگیریم. پارامترهای راداری شامل فرکانس کاری، توان ارسالی و گین آنتن ارسال و دریافت، سطح نویز دریافتی رادار و پارامترهای شکل موج رادار است.

فرکانس کاری رادار برابر ۱۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شده و مقادیر توان ارسالی، گین ارسالی و دریافتی با توجه به اثر یکسان بر روی هدف و چف به صورت نرمالیزه شده در نظر گرفته شده‌اند.

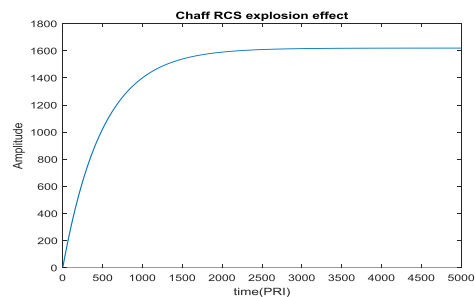
در این مدل شکل موج رادار در حالت‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- شکل موج مربعی ساده: این شکل موج با پارامتر عرض پالس، سیگنال ارسالی رادار را مدل می‌کند.

در این رابطه  $N$  برابر تعداد المان‌های چف است.  $\alpha_T$  برابر زاویه بین محور  $Z$  و پلاریزاسیون میدان الکتریکی برخورد کننده به چف است.  $\alpha_R$  برابر زاویه بین محور  $Z$  و پلاریزاسیون میدان الکتریکی برخورد کننده به گیرنده است و  $\beta$  زاویه بین فرستنده و گیرنده است.

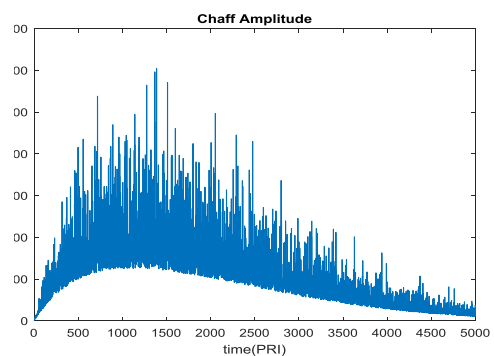
$\tau_{IF}$  برابر زمان شروع ریزش چف و  $\tau_{EF}$  برابر زمان انتهایی ریزش چف است.

در زمان انفجار چف، دامنه آن به صورت نشان داده شده در شکل ۷ تغییر می‌کند.



شکل ۷. تغییرات دامنه‌ی چف در زمان هدف

در این نمودار، ثابت زمانی انفجار چف برابر ۰,۳ ثانیه در نظر گرفته شده است. مقدار  $f$  هم برابر ۱ (معادل رادار مونواستاتیک و پلاریزاسیون هم راستای  $Z$ ) لحاظ شده است. مقدار افت دامنه هم با مدل چگالی طیفی اشاره شده در بالا ترکیب شده است. در نهایت، پس از در نظر گرفتن تمام اثرات گفته شده، نمودار تغییرات دامنه بر حسب زمان به صورت نشان داده شده در شکل ۸ می‌باشد.



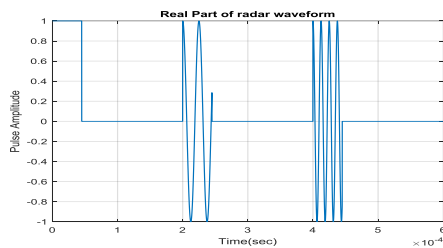
شکل ۶. تغییرات دامنه چف بر حسب زمان

### مدل هدف

از آنجایی که اهداف دریایی نسبت به رزولوشن رادار، گسترده در نظر گرفته می‌شوند لازم است که شکلی برای کشتی در نظر گرفته شود. شکل ۹ این موضوع را نمایش می‌دهد. شکل زمانی هدف بستگی به شکل کشتی دارد. در شکل زیر برای حالتی که کشتی یک‌تکه، دو تکه یا سه تکه فرض شود، شکل در نظر گرفته شده نمایش داده شده است.

<sup>۸</sup> Fluctuation

در واقع در این شکل موج، فرکانس مرکزی رادار در هر پالس به اندازه B افزایش پیدا می کند. شکل موج با ۳ گام در شکل زیر مشاهده می شود.



شکل ۱۲. نمونه‌ای از سیگنال Stepped LFM مورد تحقیق در این مقاله

در ادامه با استفاده از مدل های ارایه شده برای چف، هدف و رادار، سیگنال برگشتی از چف و هدف در گیرنده رادار را مدل می کنیم.

### شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد مدل های ارایه شده برای چف، در این بخش، پالس رادار به هدف و چف تابیده شده و بازگشتی مورد بررسی قرار می گیرد. در ابتدا می خواهیم عملکرد پالس های مختلف را در تفکیک برگشتی از هدف و چف بررسی نماییم. در ادامه سیگنال بازگشتی از یک رادار واقعی، با سیگنال شبیه سازی شده با مدل ارایه شده مقایسه می شود.

### خروجی شبیه سازی در سناریوهای مختلف

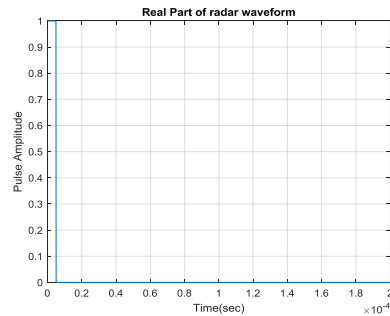
در اینجا سناریویی را در نظر می گیریم که یک شناور در زمان صفر، چف را در فاصله ای پرتاب کرده و خودش از محل دور می شود.

پارامترهای شناور را به ترتیب نشان داده شده در جدول ۱ در نظر می گیریم:

جدول ۱. پارامترهای هدف.

مقدار	پارامتر
50m	طول شناور
100m <sup>2</sup>	سطح مقطع راداری شناور
15 m/s	سرعت شناور

پارامترهایی که برای چف در نظر می گیریم در جدول ۲ نشان داده است.



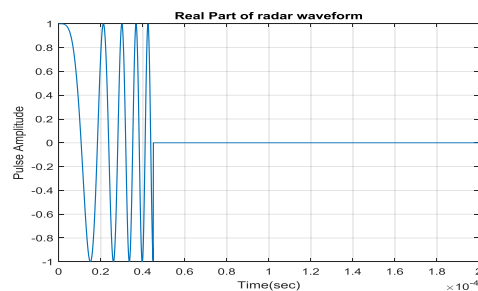
شکل ۹. نمونه‌ای از سیگنال پالسی، مورد تحقیق در این مقاله

- شکل موج LFM: این شکل موج با عرض پالس، پهنای باند، جهت سویپ فرکانس و پوش پالس ارسالی مشخص می شود. رابطه این شکل موج به ترتیب زیر است [۲۰]:

$$s(t) = \exp(j\varphi(t)) \quad (10)$$

$$\varphi(t) = 2\pi(f_0 t \pm Kt^2), -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}$$

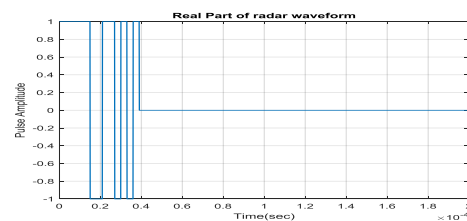
که در آن  $f_0$  فرکانس مرکزی و  $K$  نرخ افزایش فرکانس است. نمونه این شکل موج در شکل ۱۲ نشان داده شد است.



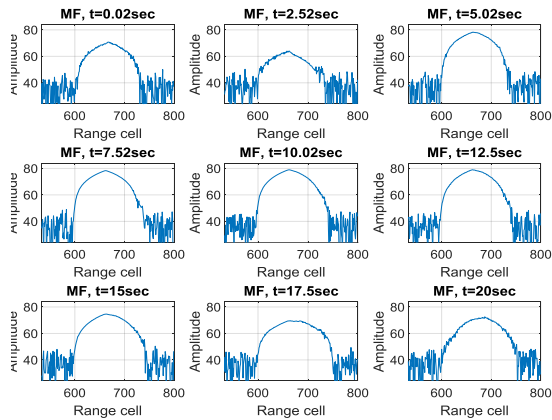
شکل ۱۰. نمونه‌ای از سیگنال LFM مورد تحقیق در این مقاله

- شکل موج فازی: برای این شکل موج، نوع کد فازی و تعداد چپ های آن در نظر گرفته می شود. نمونه ای از این نوع کد، کد بارکر [۲۱] است که کد ۱۳ تایی آن در شکل ۱۳ نشان داده شد است.
- شکل موج Stepped LFM: در این شکل موج پارامترهای عرض پالس، تعداد گام های LFM و پهنای باند پارامترهای تعیین کننده شکل موج است. فرکانس این شکل موج به ترتیب زیر تعیین می شود [۲۲].

$$f_n = f_c + \left[ (n-1) - \frac{N}{2} + 0.5 \right] B \quad (11)$$

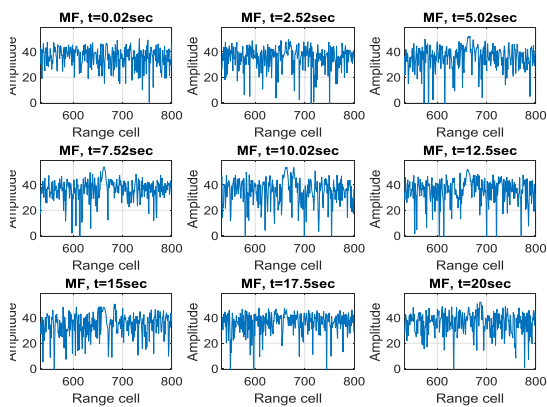


شکل ۱۱. نمونه‌ای از سیگنال فازی مورد تحقیق در این مقاله



شکل ۱۳. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال مربعی با عرض پالس 6.5 usec

با کم کردن عرض پالس به 0.5 usec برای داشتن پهنای باند مناسب، شکل سیگنال‌های برگشتی به فرم نشان داده شده در شکل ۱۶ است.



شکل ۱۴. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال مربعی با عرض پالس 0.5 usec

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در این حالت میزان SNR برای آشکارسازی هدف مناسب نیست.

### شکل موج LFM

پارامترهای شکل موج ارسالی رادار به ترتیب نشان داده شده در جدول ذیل در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵. پارامترهای شکل موج ارسالی رادار - LFM.

مقدار	پارامتر
6.5 us	عرض پالس
2 MHz	پهنای باند
مربعی/گوسی	پوش سیگنال

سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای پوش سیگنال مربعی به ترتیب نشان داده شده در شکل زیر است.

جدول ۲. پارامترهای چف.

مقدار	پارامتر
1	تعداد گلوله چف شلیک شده
T=1s	زمان پرتاب چف
50m	فاصله اولیه پرتاب چف
150m	طول نهایی ابر چف
1m/s	سرعت اولیه چف
100000	تعداد المان‌های گلوله چف
162m <sup>2</sup>	سطح مقطع متوسط چف
0.2s	ثابت زمانی انفجار چف

شرایط محیطی اولیه باد نیز به ترتیب نشان داده شده در جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. پارامترهای شرایط محیطی اولیه باد.

مقدار	پارامتر
8m/s	سرعت باد
1	انحراف استاندارد shear
0.7	انحراف استاندارد turbulence

فرکانس مرکزی رادار برابر ۱۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. در ادامه اثر شکل موج‌های مختلف راداری در برگشتی از هدف و چف در سناریوی آرایه شده را بررسی می‌کنیم.

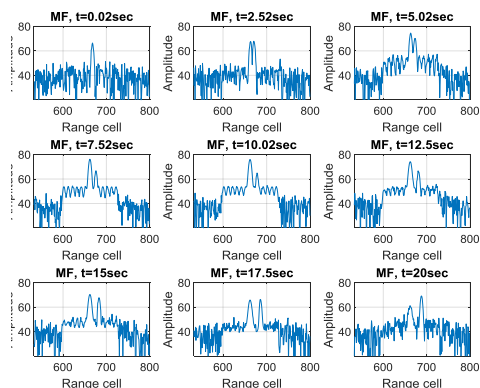
### شکل موج مربعی

پارامترهای شکل موج ارسالی رادار را به فرم نشان داده شده در جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. پارامترهای شکل موج ارسالی رادار - مربعی.

مقدار	پارامتر
6.5/0.5 us	عرض پالس
مربعی	نوع کد

پس از شبیه‌سازی موارد گفته شده در بالا، سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای عرض پالس 6.5 usec (در بازه‌ی ۲۰ ثانیه‌ای) به فرم نشان داده شده در شکل ۱۵ می‌باشد.



شکل ۱۹. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال بارکر با عرض پالس 6.5 usec و تعداد ۱۳ چیپ

### تغییر شرایط محیطی

با توجه به تاثیر شرایط محیطی بر مدل چف و در نتیجه سیگنال برگشتی از چف، اثر این شرایط را بر روی سیگنال برگشتی در شرایط شکل موج های فرکانسی و فازی بررسی می کنیم.

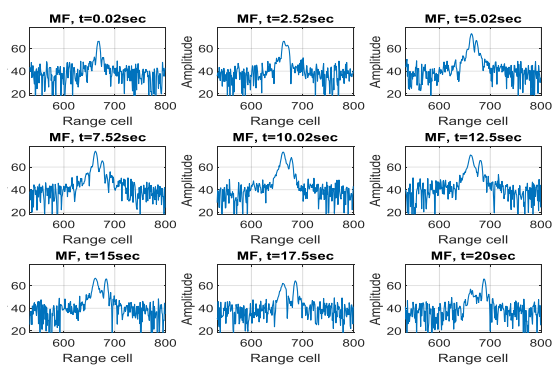
### تاثیر سرعت باد

پارامترهای شبیه سازی سرعت باد به ترتیب نشان داده شده در جدول زیر می باشد.

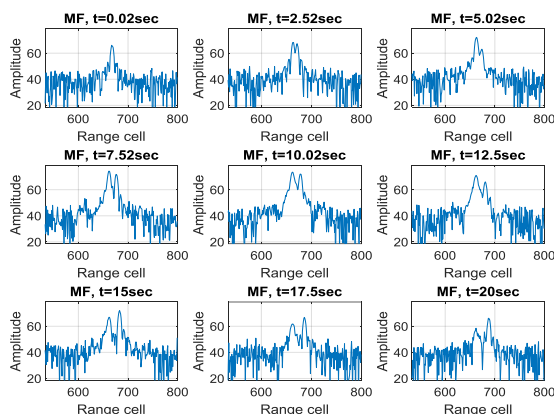
جدول ۷. پارامترهای باد برای شکل موج ارسالی رادار - LFM/بارکر.

مقدار	پارامتر
0/30 m/s	سرعت باد
1	انحراف استاندارد shear
0.7	انحراف استاندارد turbulence
LFM/بارکر	نوع کد
6.5 usec	عرض پالس

سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای شکل موج LFM برای فرم نشان داده شده در شکل ۲۰ است.

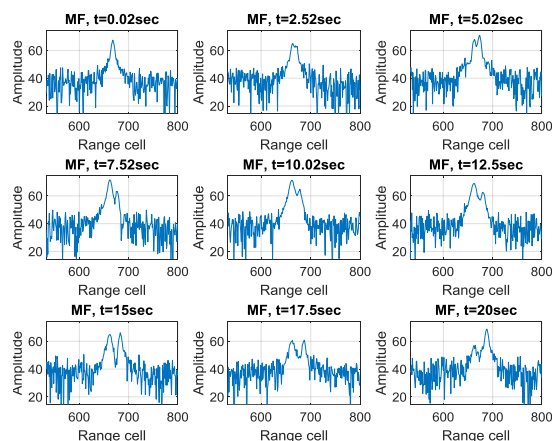


شکل ۲۰. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با عرض پالس 6.5 usec



شکل ۱۸. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با پوش مربعی با عرض پالس 6.5 usec

سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای پوش سیگنال گوسی به ترتیب نشان داده شده در شکل ۱۸ است.



شکل ۱۸. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با پوش گوسی با عرض پالس 6.5 usec

همانطور که در دو شکل ۱۷ و ۱۸ مشاهده می شود، عملکرد تفکیک در پوش مربعی بهتر از پوش گوسی است.

### شکل موج فازی بارکر

پارامترهای شکل موج ارسالی رادار را به ترتیب زیر در نظر می گیریم:

جدول ۶. پارامترهای شکل موج ارسالی رادار - بارکر.

مقدار	پارامتر
6.5(0.5) us	عرض پالس(چیپ)
بارکر	نوع کد
۱۳	تعداد چیپ

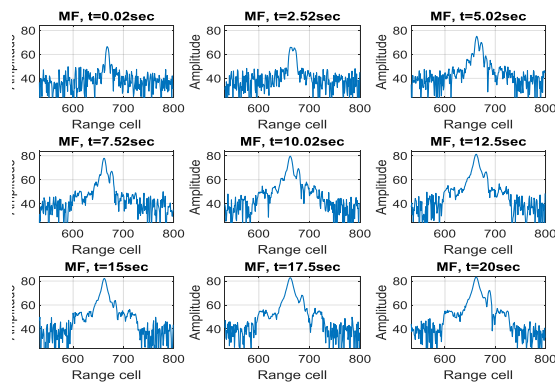
سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار به فرم نشان داده شده در شکل ۱۹ است.

پارامترهای شبیه سازی نوسانات باد به ترتیب نشان داده شده در جدول زیر می‌باشد.

جدول ۸. پارامترهای باد برای شکل موج ارسالی رادار - LFM/بارکر.

مقدار	پارامتر
0/30 m/s	سرعت باد
0.1/2	انحراف استاندارد shear
0.1/2	انحراف استاندارد turbulence
بارکر/LFM	نوع کد
6.5 usec	عرض پالس

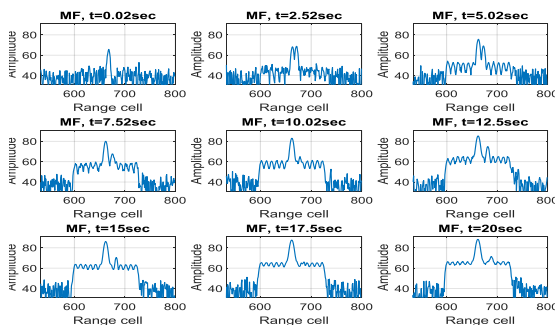
در ابتدا مقدار انحراف استاندارد shear و turbulence را برابر 0.1 در نظر می‌گیریم. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای شکل موج LFM برای فرم نشان داده شده در شکل ۲۴ است.



شکل ۲۴. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با عرض

پالس 6.5 usec

برای شکل موج بارکر نیز، سیگنال‌های برگشتی در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

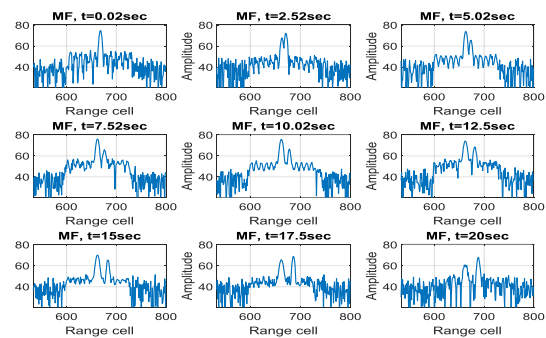


شکل ۲۵. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال بارکر با عرض

پالس 6.5 usec

حال مقدار انحراف استاندارد shear و turbulence را برابر ۲ در نظر می‌گیریم. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای شکل موج LFM برای فرم نشان داده شده در شکل ۲۶ است.

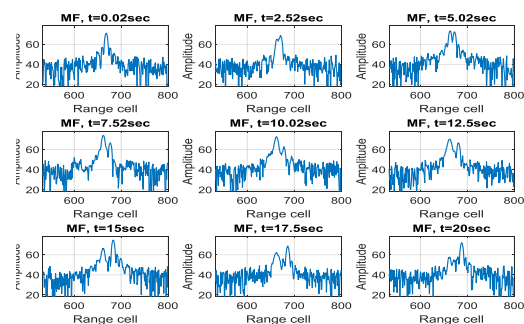
برای شکل موج بارکر نیز، سیگنال‌های برگشتی در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۱. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال بارکر با عرض

پالس 6.5 usec

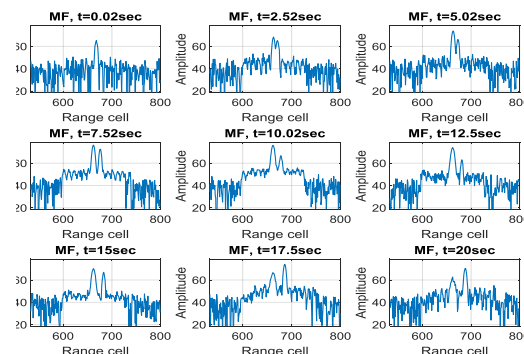
حال سرعت باد را برابر 30 m/s در نظر می‌گیریم. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای شکل موج LFM به فرم نشان داده شده در شکل ۲۲ است.



شکل ۲۲. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با

عرض پالس 6.5 usec

در این حالت، برای شکل موج بارکر نیز، سیگنال‌های برگشتی در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

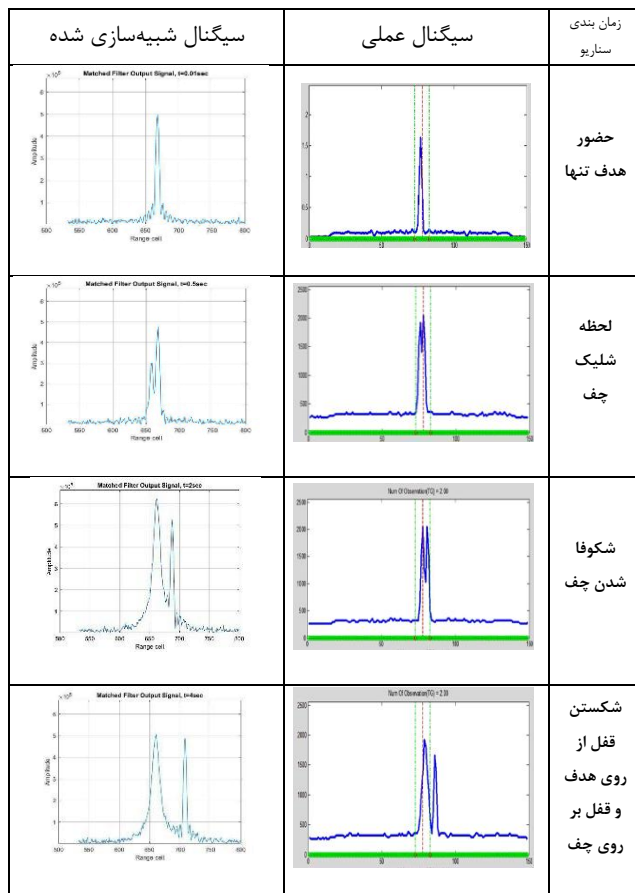


شکل ۲۳. سیگنال‌های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال بارکر با

عرض پالس 6.5 usec

## تأثیر نوسانات باد

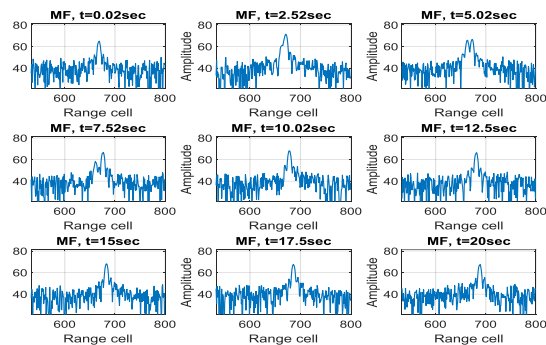
در شکل زیر نتایج استخراج شده از گیرنده رادار و نتایج شبیه سازی در کنار یکدیگر نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی و خروجی واقعی وجود دارد.



### نتیجه گیری

همان طور که گفته شد در بسیاری از کاربردهای مربوط به ECCM، نیاز به مدل سازی درست سیگنال چف می باشد. در این مقاله با در نظر گرفتن ویژگی های آماری، داپلر و شکل موج های مختلف، سیگنال بدست آمده از هدف و چف شبیه سازی شده اند. سپس اثر شرایط مختلف محیطی و شکل موج های مختلف رادار بر روی سیگنال چف بررسی شده اند. در ادامه به تحلیل شبیه سازی خواهیم پرداخت.

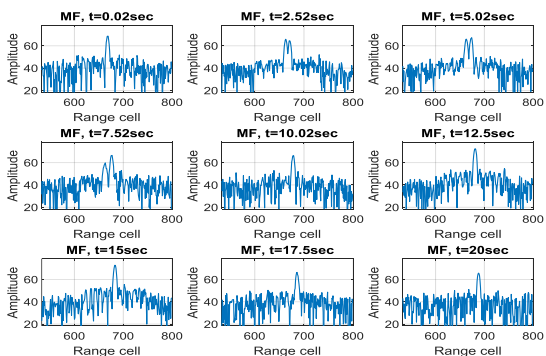
- در شرایط ثابت شبیه سازی مشاهده می کنیم که با استفاده از کد مربعی ساده، میزان SNR برای دریافتی هدف و چف کم است و به همین دلیل نیاز است از شکل موج های راداری کد شده استفاده کنیم. با مقایسه عملکرد کد فرکانسی LFM با کد فازی بارکر مشاهده می کنیم که عملکرد تفکیک کد فازی بارکر بهتر از LFM است و زودتر می تواند هدف و چف را تفکیک کند.



شکل ۲۶. سیگنال های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال LFM با

عرض پالس 6.5 usec

برای شکل موج بارکر نیز، سیگنال های برگشتی در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۷. سیگنال های برگشتی در گیرنده رادار برای سیگنال بارکر با عرض

پالس 6.5 usec

### مقایسه خرجی شبیه سازی با داده واقعی

برای به منظور صحت سنجی مدل های ارائه شده و شبیه سازی صورت گرفته، خروجی شبیه سازی با سیگنال واقعی استخراج شده از یک رادار مقایسه شده است. پارامترهای شبیه سازی شده و مدل عملی در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۹. پارامترهای سیستم و مدل عملی.

پارامتر	مقدار
فرکانس کاری	10 GHz
شکل موج ارسالی	LFM
عرض پالس	20us
پهنای باند	2 MHz
ابعاد هدف	15 m
سرعت هدف	15 m/s
سطح مقطع راداری هدف	50m <sup>2</sup>
تعداد المان های چف	1000000
سرعت باد	5 m/s
انحراف استاندارد shear	1
انحراف استاندارد turbulence	0.7

- [8] C.J.Palermo, L.H.Bauer, Bistatic Scattering Cross Section of Chaff Dipoles with Application to Communication, Proceedings of the IEEE, 53, 8, Aug. 1965
- [9] S.L.Borison, Bistatic Scattering Cross Section of a Randomly-Oriented Dipole, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 15, issue 2, pp. 320-321, Mar. 1967.
- [10] B.C.F.Butters, Chaff, IEEE Proceedings vol. 129, Pt. F, No. 3, June 1982.
- [11] R.G.Wickliff, R.J.Garbacz, The Average Backscattering Cross Section of Clouds of Randomized Resonant Dipoles, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Volume 22, Issue 3, May 1974.
- [12] Fu, Xiongjun, Honghua Yan, Changyong Jiang, and Meiguo Gao. "Chaff jamming recognition for anti-vessel end-guidance radars." In 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, pp. 1-5. IEEE, 2009.
- [13] Gang, Cui, Shi Longfei, Ma Jiazhi, and Liu Jian. "Identification of chaff interference based on polarization parameter measurement." In 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), pp. 392-396. IEEE, 2017
- [14] Guangfu, Tang, Zhao Ke, Zhao Hongzhong, and Zhu Zhenzhen. "A novel discrimination method of ship and chaff based on sparseness for naval radar." In 2008 IEEE Radar Conference, pp. 1-4. IEEE, 2008
- [15] Liu, Yemin, Shiqi Xing, Yongcai Liu, Yongzhen Li, and Xuesong Wang. "Maximum Likelihood Angle Estimation of Target in the Presence of Chaff Centroid Jamming." IEEE Access 6 (2018): 74416-74428
- [16] Yu, Jungwon, Hansoo Lee, Yeongsang Jeong, and Sungshin Kim. "Identifying chaff echoes in weather radar data using tree-initialized fuzzy rule-based classifier." In 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), pp. 2317-2324. IEEE, 2016
- [17] Zarei, NadAli, Habibollah Aalami, Mohammad Mahdi Nayebi, Ahmad Reza Amin, and Meisam Reeis Danaei. "Discrimination of target and chaff in marine applications based on symmetry feature." In 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), pp. 131-135. IEEE, 2017.
- [18] نادعلی زارعی، محمد مهدی نالی، احمد رضا امین، میثم ری‌س دانالی، حبیب‌الله اعلمی. "تشخیص هدف از چف در فضای چند بعدی." مجله علمی پژوهشی رادار دانشگاه امام حسین (ع)، سال پنجم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۱-۱۰
- [19] Sylvain Gauthier, Edwin Riseborough, Tim J. Nohara and Graeme Jones, Multifunction

همانطور که مشاهده می شود، تغییر در سرعت میانگین باد، تاثیر زیادی بر روی بازگشتی چف ندارد و همچنان عملکرد بارکر هم بهتر است. اما می بینیم که با تغییر در انحراف استاندارد shear و turbulence باد برگشتی بسیار تغییر می کند. بدین ترتیب که با کاهش این انحراف استاندارد، برگشتی چف در زمان مقدار بسیار بیشتری می گیرد. از سویی با افزایش این انحراف استاندارد، بازگشتی چف به سرعت افت کرده و پس از ۱۰ ثانیه دیگر بازگشتی چف مشاهده نمی شود. در این شرایط نیز عملکرد تفکیک کد بارکر بهتر است.

در نهایت مطابقت این مدل ها، با داده‌های واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که میزان مطابقت داده شبیه‌سازی شده با داده واقعی قابل قبول است، می‌توان از شبیه‌سازی این مقاله به عنوان بستری مناسب برای بررسی روش‌های مختلفی که به مدل‌سازی سیگنال چف و هدف نیاز دارند، استفاده نمود.

## مراجع

- [1] Bendayan, Michael, and Alain Garcia. "Signal modeling of chaff in naval environment simulation." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 51, no. 4 (2015): 3161-3166.
- [2] Dan, Jin, Cha Hao, and Zuo Lei. "A Simulation Study of Chaff Echo Signal Based on LFM." International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition 9, no. 4 (2016): 131-140.
- [3] G.A.Ioannidis, Model for Spectral and Polarization Characteristics of Chaff, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-15, p. 723-726, Sept. 1979.
- [4] Hong, Zhu, Pan Yu-jian, Wang Qing-ping, Tai Ning, and Yuan Naichang. "An anti-chaff jamming method for millimeter wave wideband coherent radar based on range Doppler feature." In 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), pp. 1-6. IEEE, 2015
- [5] S.W.Marcus, Dynamics and Radar Cross Section Density of Chaff Cloud, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems vol. 40, No. 1, Rafael Israel, January 2004
- [6] W.Xianli, S.Qi, L.Teng, Chaff Jamming Effect to Radar and Math Model Building, IEEE, 2006.
- [7] D. D. Ducata, G. Foglia, D. Pistoia and A. Sindico, "A comprehensive model for chaff characterization," 2009 European Radar Conference (EuRAD), 2009, pp. 485-488.

- [22] Chua, Ming Yam & Koo, Voon & Lim, Heng Siong & Sri Sumantyo, Josaphat. (2017). Phase Coded Stepped Frequency Linear Frequency Modulated Waveform Synthesis Technique for Low Altitude Ultra Wideband Synthetic Aperture Radar. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2017.2700994
- Radar Simulator (MFRSIM), TECHNICAL MEMORANDUM ,DRDC Ottawa TM 2002-165, December 2002
- [20] Patel, Kiran & Neelakantan, Usha & Gangele, Shalini & Vacchani, J. & Desai, N.. (2012). Linear frequency modulation waveform synthesis. 10.1109/SCEECS.2012.6184744
- [21] J. Soba, A. Munir and A. B. Suksmono, "Barker code radar simulation for target range detection using software defined radio," 2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2013, pp. 271-276, doi: 10.1109/ICITEED.2013.6676251