

روشی جدید برای شبیه‌سازی کلاتر دریا و هدف برای کاربرد در یک شبیه‌ساز محیط رادار روزنه مصنوعی (SAR) جلونگر

رضا ترینیا^۱، مرتضی کازرونی^{۲*}، محسن فلاح^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۵/۰۷/۲۶، پذیرش: ۹۶/۰۵/۱۶)

چکیده: در این مقاله ابتدا ایده جدید چگونگی به دست آوردن تصویر الکترومغناطیسی دوبعدی اجسام بزرگ بررسی می‌شود. سپس هدف گسترده در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و نتایج پردازش می‌شوند تا تصویر دوبعدی مدل هدف استخراج گردد. بنابراین، برای اولین بار، شبیه‌ساز رادار روزنه مصنوعی (SAR)، قابلیت شبیه‌سازی واقعی اهداف گسترده را به دست می‌آورد. بخش بعدی شبیه‌سازی کلاتر دریاست که برای اولین بار با توجه به نیاز رادار SAR به بازگشتی کلاتر برای استخراج مرکز و نرخ داپلر و ملاحظه حرکت دریا برای رادار جلونگر، انجام شده است. مزیت این روش لحاظ نمودن اثر حرکت رادار در داده‌های خام است؛ زیرا الگوریتم‌های پردازشی SAR از اطلاعات خام راداری برای تخمین سرعت و شتاب رادار استفاده می‌نمایند. همچنین، با توجه به حرکت امواج دریا، کلاتر دارای پهنای باند قابل توجهی در راستای سمت است. از این ویژگی برای به‌کاربردن ایده جدیدی که مزیت آن کاهش تعداد نقاط کلاتر مورد نیاز شبیه‌سازی می‌باشد، استفاده شده است.

کلید واژه‌ها: رادار روزنه مصنوعی (SAR)، کلاتر دریا، شبیه‌ساز رادار روزنه مصنوعی، تصویر دوبعدی سطح مقطع راداری.

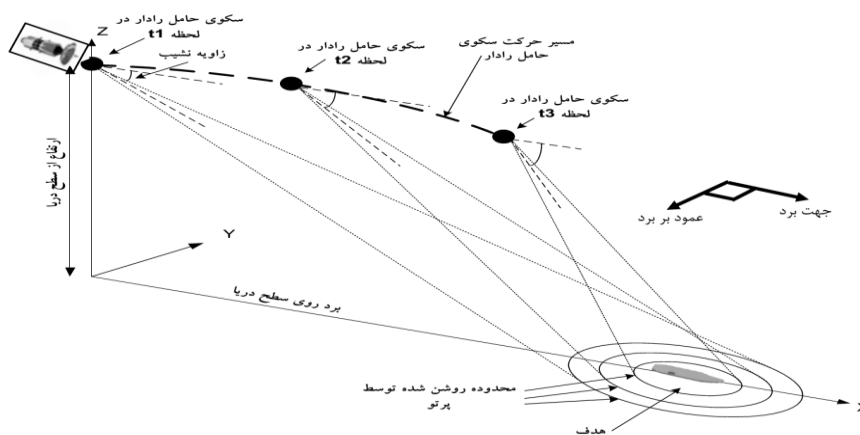
۱- مقدمه

رادارهای روزنه مصنوعی (SAR^۱) نوع ویژه‌ای از رادار هستند که برای تشخیص هدف از دو روش فشرده‌سازی استفاده می‌کنند که یکی شامل فشرده‌سازی در برد و دیگری فشرده‌سازی در جهت عمود بر برد است. برای افزایش تفکیک‌پذیری در جهت عمود بر برد از حرکت رادار استفاده می‌شود. در تئوری با دانستن مسیر دقیق حرکت رادار و جهت دقیق آنتن می‌توان تصویر راداری را با الگوریتم‌های مختلف به دست آورد ولی در عمل در ابزارهای اندازه‌گیری خطای قابل ملاحظه‌ای وجود دارد [۱]. بنابراین ایده بهتر استفاده از خود داده‌های خام محیط برای تخمین پارامترهای حرکت رادار است. بازگشتی رادار شامل کلاتر و هدف می‌شود. پس برای شبیه‌سازی کامل رادار روزنه مصنوعی شبیه‌سازی، کلاتر یک نیاز اساسی است. زیرا الگوریتم‌های تخمین مرکز داپلر و فوکوس خودکار با استفاده از داده‌های خام بازگشتی از صحنه عمل می‌کنند [۲-۱]. در این جا هدف شبیه‌سازی کلاتر دریا است. برای شبیه‌سازی کلاتر دریا تلاش‌های گسترده‌ای صورت گرفته است. بعضی از مقالات فقط تصویر راداری آب دریا را شبیه‌سازی نموده‌اند [۳] که با توجه به

نیاز به داده‌های خام راداری مورد نظر این مقاله نیست. در دسته دیگر از کارهای انجام‌شده کلاتر دریا برای رادارهای ثابت مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است [۴-۷]. از این دست تحقیقات می‌توان پدیده کلاتر دریا را به خوبی شناسایی کرد. با توجه به تحرک دائمی آب دریا مقدار بازگشتی از آن با زمان تغییر می‌کند پس نیاز است تا این تحرک در شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. اگر سطح آب دریا به سطوح کوچک‌تری تقسیم شود، هریک از این سطوح کوچک در هر زمان با سرعت لحظه‌ای خاص خود حرکت می‌کنند که این موجب ایجاد فرکانس داپلرهای مختلف برای هر سطح کوچک می‌شود. بنابراین، سیگنال بازگشتی از کلاتر دریا دارای یک پهنای باند متناسب با تحرک دریا است که این موضوع در [۴-۶] هم ذکر شده و می‌تواند در کاهش زمان صرف‌شده برای شبیه‌سازی کلاتر به کار رود. اما در بعضی تحقیقات شبیه‌سازی کلاتر دریا به طور ویژه برای رادار SAR انجام شده است [۹-۱۲]. این کار می‌تواند با استفاده از روش‌های حوزه زمان یا حوزه فرکانس صورت پذیرد [۱۲]. از آن جا که سطح آب متحرک می‌باشد، اعمال این حرکت یکی از چالش‌های مهم الگوریتم‌های تولید داده‌های خام راداری است. روش‌های به کار رفته در مراجع شامل SAR کنارنگ^۲

* نویسنده پاسخگو: kazerooni@mut.ac.ir

در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا به چگونگی به دست آوردن تصویر دوبعدی هدف پرداخته و سپس شبیه‌سازی کلاتر انجام می‌شود. شکل (۱) نمای کلی شبیه‌ساز را نشان می‌دهد که در آن رادار و یک کشتی در آب دریا دیده می‌شود. جهت برد به معنی جهتی است که به طور شعاعی از رادار دور و یا نزدیک می‌شود. فقط برای رادارهای روزنه مصنوعی کنارانگر که دارای لوچی نباشند در مرکز پرتو آنتن جهت برد عمود بر جهت حرکت رادار است. اما اگر اندکی از مرکز پرتو فاصله بگیریم یا این‌که رادار دارای لوچی یا جلونگر باشد جهت برد بر جهت حرکت عمود نخواهد بود. تعریف جهت برد همان تعریف برد هدف است یعنی فاصله هدف تا رادار. بنابراین سطحی که در آن برد تا رادار یکسان باشد یک کره با برد مورد نظر و مرکزیت مرکز فاز آنتن رادار است. بلکه به‌طور معمول جهت برد را معیار قرار می‌دهند و جهت برد-مقاطع^۵ یعنی عمود بر برد را تعریف می‌کنند. در رادارهای جلونگر جهت برد تقریباً در امتداد بردار سرعت و در جهت حرکت است. بنابراین، این تعریف با رادارهای کنارانگر متفاوت است. در این جا برای اختصار تصویر جهت برد روی زمین، جهت برد نامیده می‌شود. جهت برد و جهت عمود بر برد در شکل (۱) نشان داده‌اند.



شکل (۱): نمای کلی شبیه‌سازی شامل کشتی و آب دریا

در مسیر کلاتر، پهنای باند کلاتر دریا نیز در داده‌های خام اعمال می‌شود. وقتی موج رادار به جسم متحرکی برخورد کرده و بازتاب پیدا کند موجب شیفت فرکانس مرکزی موج بازتابش نسبت به موج تابشی می‌شود که به آن اثر داپلر می‌گویند. اگر سطح آب دریا را به سطوح ریزتر تقسیم شود هر ریزسطح با سرعت لحظه‌ای خاص خود در حرکت است، بنابراین داپلرهای مختلفی دارند و این موجب ایجاد پهنای باند کلاتر دریا می‌شود. نقشه RCS کلاتر از تابع تصادفی و نقشه RCS هدف از روش بخش ۲ به دست می‌آید.

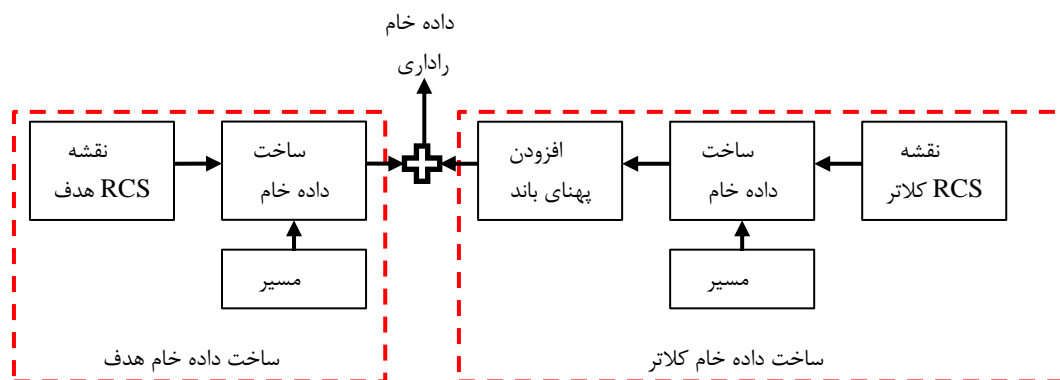
هستند و برای SAR جلونگر^۱ راه حلی ارائه نشده است. رادارهای روزنه مصنوعی موجود در ماهواره‌ها و هواپیماها کنارانگر هستند. در این مقاله یک روش جدید برای تولید داده‌های خام راداری برای رادار روزنه مصنوعی جلونگر معرفی و پیاده‌سازی می‌شود.

دلیل استفاده از رادار روزنه مصنوعی افزایش تفکیک پذیری^۲ رادار است. افزایش تفکیک پذیری در برد به کمک پالس چیرپ (LFM^۳) و پردازش سیگنال دریافتی در گیرنده انجام می‌شود. افزایش تفکیک پذیری در سمت به کمک حرکت رادار و ایجاد یک روزنه مصنوعی و پردازش سیگنال دریافتی انجام می‌شود. در این مقاله که بر مبنای SAR است تفکیک پذیری نسبت به یک رادار معمولی در بعد سمت بسیار بیشتر است. بهترین تفکیک پذیری مورد نظر در تصویر راداری ۱۰ m است و تفکیک پذیری دقیق‌تر مدنظر نیست. بنابراین، تفکیک پذیری مدل هدف نیز باید کوچک‌تر یا مساوی ۱۰ m باشد.

از طرف دیگر با توجه به نیاز برای مدل کردن هدف در شبیه‌ساز، سطح مقطع راداری هدف نیز باید به دست آید. برای این کار از ایده رادار روزنه مصنوعی معکوس (ISAR^۴) و نرم‌افزار CST استفاده می‌شود. در این جا هدف به صورت مدل نقطه‌ای

شکل (۲) نیز بلوک دیاگرام کلی تولید داده خام برای رادار روزنه مصنوعی در این مقاله را نشان می‌دهد. در روش جلونگر، ابتدا داده‌های خام راداری برای نقاط کمتری ساخته می‌شود و سپس پهنای باند اضافه می‌گردد. اما در روش‌های کنارانگر پیاده‌شده پهنای باند همراه با ساخت داده‌ها افزوده می‌شود. شایان ذکر است این بلوک دیاگرام را برای حالت کنارانگر نیز می‌توان به کار برد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است. داده‌های خام راداری برای کلاتر و هدف از دو مسیر جداگانه به دست می‌آید.

- 1- Forward-Looking
- 2- Resolution
- 3- Linear Frequency Modulation
- 4- Inverse Synthetic Aperture Radar



شکل (۲): بلوک دیاگرام کلی شبیه‌ساز محیط رادار روزنه مصنوعی

بار به گونه‌ای شبیه‌سازی می‌شود که اطلاعات فاز مسیر حرکت رادار را نیز در خود دارد و تحرک امواج دریا را نیز لحاظ نموده است. در این بخش از خاصیت تحرک دریا یک ایده جدید برای کاهش زمان شبیه‌سازی استخراج شده است.

۲- روش پیشنهادی برای به دست آوردن تصویر

سطح مقطع راداری دو بعدی هدف

برای به دست آوردن تصویر دوبعدی از هدف، ابتدا لازم است تا تصویر یک‌بعدی در راستای برد به دست آید سپس از قراردادن این تصاویر یک‌بعدی در یک ماتریس دوبعدی و انجام پردازش در راستای عمود بر برد، تصویر دوبعدی به دست می‌آید. فرض کنید که یک هدف نقطه‌ای در فاصله R از مرکز مختصات که محل فاز صفر است، باشد.

برای مدل‌سازی هدف سیگنال LFM یا نوع فرکانس پله‌ای آن مطرح نیست. آنچه در این بخش از مقاله مطرح شده است شبیه‌سازی بازگشتی از یک هدف با یک موج سطحی در فرکانس‌های گسسته مختلف در نرم‌افزار CST است که فاصله بین این فرکانس‌ها با پله ثابت و تعداد این فرکانس‌ها متناسب با طول هدف انتخاب می‌شود. پهنای باندی که این فرکانس‌ها آن را تحت پوشش قرار می‌دهند، تفکیک‌پذیری در برد تصویر به دست آمده از هدف را مشخص می‌کند. R نشان‌دهنده فاصله هدف از مبدا مختصات در راستای برد است. بازگشتی از این هدف به صورت رابطه (۱) است:

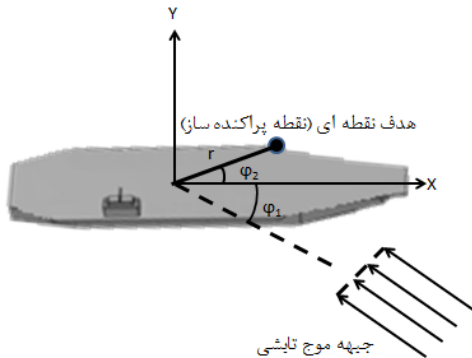
$$e^{-j\frac{4\pi}{c}fR} = e^{-j\frac{4\pi}{c}f_0R} \left(e^{-j\frac{4\pi}{c}f_r R} \right) = e^{-j\frac{4\pi}{\lambda_0}R} \left(e^{-j\frac{4\pi}{c}f_r R} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، c سرعت انتشار موج، f فرکانس لحظه‌ای رادار، f_0 فرکانس مرکزی رادار و f_r فرکانس لحظه‌ای باند پایه است. در بسط رابطه (۱) از $f=f_0+f_r$ استفاده شده است. در سمت راست

در بخش ۲، برای اولین بار چگونگی به دست آوردن تصویر دوبعدی سطح مقطع راداری اجسام بزرگ از روی شبیه‌سازی میدان بازتاب یافته آن در نرم‌افزار، مطرح می‌شود. هدف در این بخش به دست آوردن یک مدل پراکندگی نزدیک به واقع از هدف است و نباید با پردازش SAR اشتباه شود. روشی که در این جا برای به دست آوردن تصویر دوبعدی هدف استفاده شده از ایده رادار ISAR بهره گرفته است. به طور معمول داده‌های رادار ISAR در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از کدنویسی ایجاد و پردازش می‌شوند تا تصویر دوبعدی به دست آید. در این روش، هدف شامل یک سری نقاط فرضی با دامنه دلخواه هستند. اما هدف، به دست آوردن تصویر دوبعدی یک هدف مانند کشتی با استفاده از میدان بازتابی است. به این منظور، در نرم‌افزار CST یک منبع موج صفحه‌ای به جسم تابانده شده و میدان بازتاب آن در همان جهت اندازه‌گیری می‌شود. جهت تابش این موج صفحه‌ای به طور پله‌ای عوض می‌شود. میدان‌های جمع‌آوری شده در یک ماتریس قرار گرفته و با دو مرحله تبدیل فوریه معکوس تصویر دوبعدی هدف به دست می‌آید. تصویر به دست آمده در این مرحله، برای شبیه‌سازی سیگنال راداری بازتاب پیدا کرده از هدف به کار می‌رود. با شبیه‌سازی داده‌های خام رادار SAR یا ISAR و پردازش آن‌ها جهت به دست آوردن تصویر دوبعدی راداری تفاوت دارد. یکی از تفاوت‌های آن عدم نیاز به جبران‌سازی حرکت انتقالی است زیرا هدف ثابت است و منبع موج هم به ازای زوایای مختلف در فاصله بی‌نهایت از هدف قرار دارد و فاز مرجع آن روی نقطه مبدا مختصات واقع است. اگر محدوده زاویه دید هدف به طوری گسترده باشد که نقاط پراکنده‌ساز موج بیشتر از اندازه سلول تفکیک‌پذیری جابه‌جا شوند، جبران‌سازی حرکت دورانی مورد نیاز است.

در ادامه، روش فوق روی یک نمونه شامل سه گوی و برای مشخص شدن بهتر عملکرد آن روی یک جسم بزرگ که یک کشتی است، انجام می‌شود. در بخش ۳ نیز کلاتر دریا برای اولین

معکوس در راستای برد، تصویر یک- بعدی برد به دست می آید. حال فرض کنید مطابق با شکل (۳) موج صفحه‌ای با زاویه φ_1 نسبت به مرجع مختصات به هدف بتابد و هدف نسبت به مرکز مختصات که مرکز دوران هم هست در فاصله r و زاویه φ_2 قرار داشته باشد. دستگاه مختصات در اینجا یک دستگاه دو بعدی است که در صفحه دوران هدف واقع شده است.



شکل (۳): نحوه به دست آوردن مدل نقاط پراکندگی هدف

برای رسیدن به تفکیک پذیری درست لازم است تا زاویه جبهه موج تابشی در محدوده‌ای به اندازه مشخص به اندازه $\Delta\theta$ مطابق با آن چه در ادامه می آید تغییر نماید. فاز سیگنال دریافتی که شامل بخش خارج پرانتز رابطه (۱) می باشد برابر است با:

$$phase = -2k \cdot r \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (6)$$

اگر از رابطه (۶) نسبت به φ_1 مشتق گرفته شود نرخ تغییرات فاز با وجود پارامتر $2k$ و یا نرخ تغییرات برد بدون ضریب $2k$ نسبت به تغییر زاویه موج تابشی به دست می آید. حال اگر جهت موج تابشی به اندازه زاویه کوچک $\delta\theta$ دوران پیدا کند آن گاه فاز به اندازه $2k \cdot r \sin(\varphi - \theta) \cdot \delta\theta$ تغییر پیدا می کند. بنابراین اگر کل دوران زاویه‌ای برابر $\Delta\theta$ باشد و این دوران در M پله برابر طی شود تغییر زاویه برابر است با:

$$\delta\theta = \frac{\Delta\theta}{M} m \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

پس فاز سیگنال برابر می شود با:

$$e^{j \frac{4\pi}{\lambda} r \sin(\varphi - \theta) \delta\theta} = e^{j 2\pi \frac{2r \sin(\varphi - \theta) \Delta\theta}{\lambda} \frac{m}{M}} \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

به طور مشابه حالت برد در رابطه (۳)، همان طور که می دانیم طبق یکی از خواص تبدیل فوریه تغییر فاز در حوزه فرکانس سبب تغییر و یا جابه جایی در حوزه زمان می گردد. لذا از رابطه

یک جمله خارج از پرانتز قرار دارد که نشان دهنده فاز انتشار موج است و فعلاً در این مرحله مورد نظر نیست. در این جا برای فشرده سازی در برد توجه به جمله داخل پرانتز معطوف می شود. اگر پهنای باند برابر BW و تعداد N نمونه فرکانسی وجود داشته باشد، فرکانس لحظه‌ای باند پایه برابر است با:

$$f_r = \frac{k}{N} BW \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

با جای گذاری f_r در جمله داخل پرانتز رابطه (۱):

$$e^{-j \frac{4\pi R}{c} f_r} = e^{-j \frac{2\pi k}{N} \left(\frac{2BW \cdot R}{c} \right)} \quad (3)$$

طبق خواص تبدیل فوریه، (۳) معادل شیفت در حوزه مکان است که مقدار شیفت برابر $\frac{2BW \cdot R}{c}$ سلول به سمت جلو و مقدار تفکیک پذیری سلول برد رادار برابر است با:

$$\rho_r = \frac{c}{2BW} \quad (4)$$

رابطه (۴) براساس مقدار جابه جایی محل تشکیل تصویر هدف نقطه‌ای از مبدا مختصات، مقدار تفکیک پذیری را مشخص می کند. در صورتی که مقدار شیفت از N تجاوز کند، جابه جایی در ماتریس برابر باقی مانده تقسیم شیفت بر N است و هدف روی اهداف دیگر نگاشت می شود. بنابراین، برای اهداف بزرگ باید تعداد بیشتری نمونه در نظر گرفت تا ابهام برد پیش نیاید. اگر طول کشتی طوری باشد که محدوده طولی آن بیشتر از N نقطه باشد، تصویر اضافه طول دوباره روی همین N نقطه تشکیل می شود یعنی اگر طول کشتی K برابر تفکیک پذیری راستای برد باشد باید مقدار N بزرگتر از K انتخاب شود تا ابهام به وجود نیاید. جهت دوری از پدیده تداخل طیفی^۱ یا تاخوردگی در نمونه‌ها فرکانس نمونه برداری باید حداقل برابر نرخ نایکوئیست^۲ باشد.

اگر طول هدف در راستای برد برابر L باشد، آن گاه حداقل تعداد نمونه‌های مورد نیاز، برابر این طول تقسیم بر تفکیک پذیری در راستای برد است:

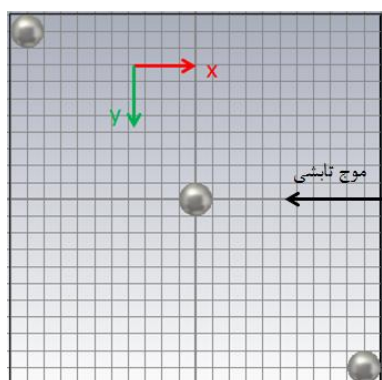
$$N_{\min} = \text{Ceil} \left[\frac{L}{\rho_r} \right] \quad (5)$$

در نرم افزار CST مرجع فاز پیش فرض، مرکز مختصات است و موج صفحه‌ای به جسم تابانده می شود. با گرفتن تبدیل فوریه

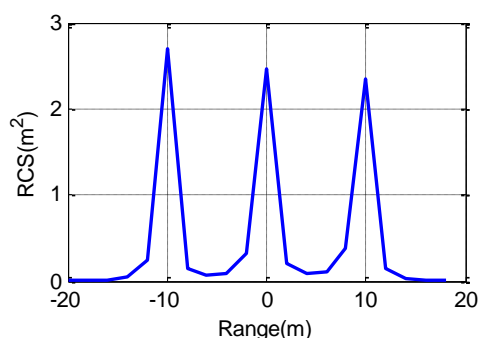
1- Aliasing
2- Nyquist rate

مقطع فیزیکی آن معلوم می‌شود. یکی از کره‌ها در مرکز مختصات و دو کره دیگر در دستگاه (x, y, z) یکی در مختصات $(10, 10, 0)$ و دیگری در $(-10, -10, 10)$ واقع شده‌اند. قطر کره‌ها 2 m یعنی 68 برابر طول موج است. مقدار جاروب فرکانسی و میزان جابه‌جایی زاویه‌ای از روابط (۴) و (۹) طوری تعیین می‌شوند که در برد و سمت تفکیک‌پذیری 2 m را بدهند. موج سطحی تابشی از فاصله بی‌نهایت از جهت مثبت x به جهت $-x$ حرکت می‌کند. بنابراین، دامنه آن با انتشار تغییر نخواهد کرد.

بعد از شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST، بردن داده‌های خام به نرم‌افزار MATLAB و انجام پردازش، نمایه برد و تصویر سطح مقطع راداری به دست می‌آید که در شکل‌های (۶-۵) آمده است. اندازه دامنه به دست آمده برای سه کره با مقدار مورد انتظار که برابر سطح مقطع هندسی کره است، تفاوت دارد. همچنین، سه مقدار پیک نمایه برد با هم اختلاف دارند که دلیل آن پخش شدن توان در گلبرگ‌های کناری در راستای برد است.



شکل (۴): سه کره فلزی برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST



شکل (۵): تصویر RCS راستای برد سه گوی فلزی شبیه‌سازی شده

در مرحله بعد، شبیه‌سازی یک کشتی انجام می‌شود. در این‌جا جنس کشتی ماده هادی کامل که معادل فلز است، تعریف شده است. نوک کشتی در راستای محور x قرار می‌گیرد. موج در صفحه xz و با زاویه نشیب 63° (مطابق شکل ۱) یعنی در جهت

(۸) نتیجه می‌شود که به اندازه $\frac{2r \sin(\phi - \theta) \Delta \theta}{\lambda}$ تعداد سلول در حوزه مکان در راستای سمت جابه‌جایی خواهیم داشت. از آن‌جا که مقدار جابه‌جایی در سمت برابر $r \sin(\phi - \theta)$ است و می‌دانیم که مقدار جابه‌جایی برابر طول تقسیم بر تفکیک‌پذیری سمت است. پس مقدار تفکیک‌پذیری سمت برابر است با:

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (9)$$

در این حالت هم حداکثر مقدار شیفت مجاز برابر M است و در صورتیکه طول هدف در راستای عمود بر برد برابر L_2 باشد، حداقل مقدار M مورد نیاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M_{\min} = \text{Ceil} \left[\frac{L_2}{\rho_a} \right] \quad (10)$$

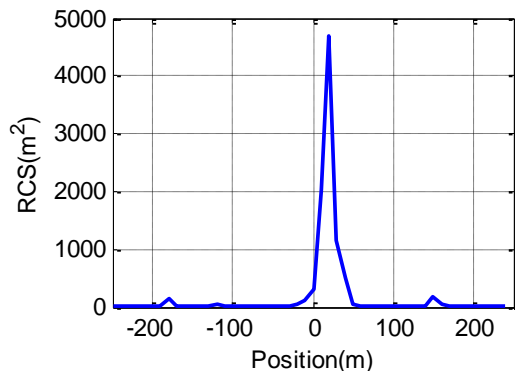
با گرفتن یک تبدیل فوریه معکوس در راستای سمت، فشرده‌سازی راستای سمت نیز انجام می‌شود و تصویر دو بعدی به دست می‌آید.

در این بخش از مقاله از ایده رادار ISAR استفاده شده است. منبع یک موج مسطح بوده که مرجع فاز صفر آن در مبدأ مختصات واقع شده است. بنابراین، حرکت خطی وجود ندارد. از طرفی، اگر اندازه دوران زاویه‌ای موج تابشی به اندازه‌ای کوچک باشد که پدیده مهاجرت سلول برد به خاطر دوران زاویه‌ای رخ ندهد، نیازی هم به جبران آن نیست. در این مقاله با توجه به مقدار تفکیک‌پذیری فرضی مورد نیاز 10 m ، اندازه دوران زاویه‌ای $\Delta\theta$ با توجه به رابطه (۹) و فرکانس کاری 10 GHz برابر 0.0859° خواهد شد. بنابراین، بیشترین مقدار مهاجرت نقاط پراکنده‌ساز هدف در راستای برد با توجه به رابطه (۶) و توضیحات آن حدود 5 cm می‌شود و چون سلول تفکیک‌پذیری در حدود 10 m می‌باشد این پدیده رخ نمی‌دهد. بنابراین، منظور به دست آوردن مدل پراکندگی نقطه‌ای هدف است که با تبدیل معکوس فوریه از حوزه فرکانس به حوزه زمان منتقل می‌شود که معادل فشرده‌سازی در رادار ISAR است.

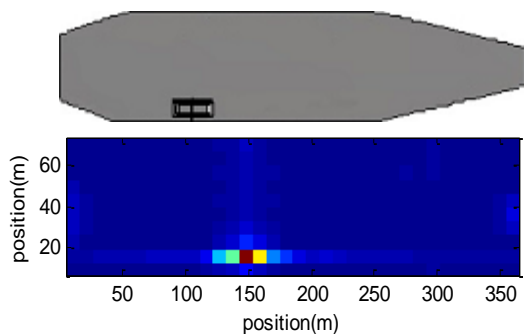
برای روشن شدن موضوع، روش روی یک مثال شامل سه کره هادی انجام می‌شود. شکل (۴) شامل سه کره هادی کامل است که در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده‌اند. هدف در این‌جا به دست آوردن یک مدل دوبعدی از کشتی برای قراردادن آن در یک شبیه‌ساز رادار SAR کلی است. در این بخش از کارکرد یک رادار ISAR الهام گرفته شده است با این تفاوت که به جای چرخش هدف، منبع موج تابشی پیرامون هدف می‌چرخد که از لحاظ پردازشی در عمل یکسان هستند. گذاشتن کره تنها برای آزمایش روش پیشنهادی بوده و این که RCS کره نیز براساس سطح

4560 m^2 یعنی خیلی بیشتر از آب دریا است.

تحلیل ارائه شده در بالا مشابه عملکرد یک رادار ISAR است [۱۳]. در رادار ISAR رادار ثابت بوده و هدف می تواند هر حرکتی اعم از شعاعی، جابه جایی و دوران و چرخش نیز داشته باشد. در این جا برای سادگی کار فقط حرکت دورانی لحاظ شده است. یعنی در حقیقت در این مقاله برای به دست آوردن مدل هدف پردازش ساده تر شده است.



شکل (۷): نمایه برد شبیه سازی شده با نرم افزار CST

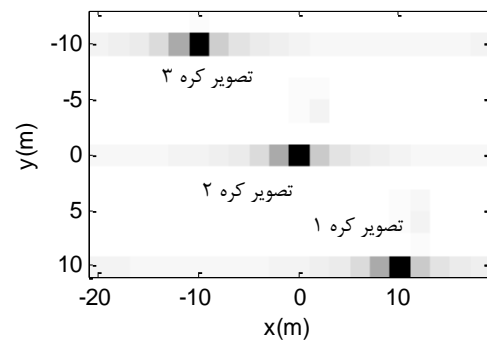


شکل (۸): تصویر دوبعدی کشتی و تصویر سطح مقطع راداری

هم چنین در روش پیشنهادی هدف، ثابت فرض شده و جهت موج تابشی حول هدف، حرکت دورانی دارد. البته در رادار ISAR هدف حرکت می کند و رادار ثابت است. در این جا نیز هر چند که نقطه مشاهده به دور هدف چرخش می کند اما با چرخش فرضی محور مختصات برابر با چرخش نقطه مشاهده این نکته مشخص می شود که نقطه مشاهده ثابت و هدف در حال دوران است که کاملاً معادل رادار ISAR است. این چرخش تنها برای مدل سازی هدف بوده و ربطی به پردازش SAR با مودهای^۳ مختلف از جمله دورانی، جلونگر و کنارنگر ندارد و در همه این پردازش ها قابل استفاده خواهد بود. در حقیقت با دوران زاویه موج تابشی RCS نقاط پراکندگی هدف در دو بعد قابل حصول می باشد. آن چه تا به این جا توضیح داده شد صرفاً برای به دست آوردن مدل هدف به کار می آید و نباید آن را با یک الگوریتم

+x و -z حرکت می کند. از میان تحلیل گرهای^۱ مختلف نرم افزار CST، نوع مجانبی^۲ استفاده می شود. سپس برای تنظیمات نرم افزار با توجه به تفکیک پذیری مورد نیاز در برد و سمت و اندازه هدف در این دو راستا مقادیر تغییر زوایا و تعداد پله ها از روابط (۴-۵) و (۹-۱۰) تعیین می شود. طول کشتی 330 m و عرض آن برابر 77 m فرض می گردد. با توجه به تفکیک پذیری 10 m تعداد پله های فرکانسی N حداقل باید 33 و حداقل تعداد پله های زاویه ای M باید 8 باشد.

پس از پایان شبیه سازی، دامنه و فاز میدان های برگشتی از نرم افزار CST به نرم افزار MATLAB آورده و ماتریس دوبعدی داده های خام تشکیل می شود. با گرفتن معکوس تبدیل فوریه در جهت برد داده ها در برد فشرده می شوند و با گرفتن معکوس تبدیل فوریه در جهت سمت داده ها در جهت سمت نیز فشرده شده و تصویر دوبعدی سطح مقطع راداری هدف به دست می آید. اشکال (۷-۸) به ترتیب تصاویر یک بعدی و دوبعدی سطح مقطع راداری هدف را نشان می دهند.

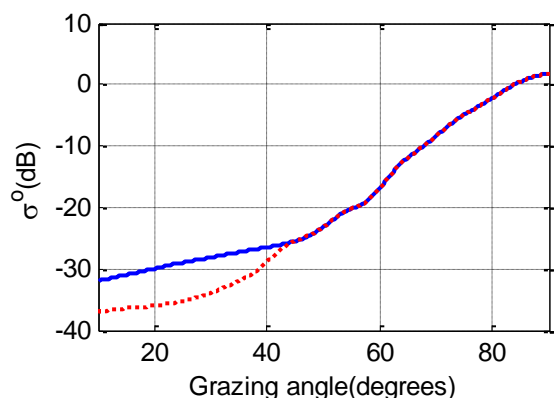


شکل (۶): تصویر RCS دوبعدی سه کره شبیه سازی شده

در شکل (۸)، بیشترین سطح مقطع راداری مربوط به ساختار مفر فرماندهی کشتی است که زاویه قائمه دارد. تصویر مفر فرماندهی مقداری جلوتر از تصویر دوبعدی آن تشکیل شده است. دلیل این پدیده بلندتربودن ارتفاع مفر فرماندهی از سطح سایر نقاط است. بنابراین، فاصله آن کمتر از منبع موج است و تصویر آن جلوتر تشکیل می شود. بقیه نقاط نیز به دلیل این که مربوط به سطوح صاف هستند پراکندگی ضعیفی در جهت تابش موج دارند و بیشتر بازتاب به صورت آینه ای است و به رادار نمی رسد. در لبه های جلو و عقب کشتی نیز به دلیل تفرق از لبه ها مقدار سطح مقطع راداری بیشتر از سطوح صیقلی است. برای شناسایی کشتی در تصویر می توان روشن ترین نقطه را به دست آورد. زیرا سطح مقطع راداری برای هر سلول $10 \times 10 \text{ m}$ آب دریا به طور میانگین 0.1 m^2 و سطح مقطع راداری نقطه مفر فرماندهی برابر

مقابله می‌کند و مانع از تشخیص سرعت و شتاب صحیح سکو به سمت صحنه، با الگوریتم‌های مربوطه می‌شود. در این مرحله هدف شبیه‌سازی کلاتر دریا است. شکل (۹) چگالی سطح مقطع راداری در هر متر مربع را برای قطبی‌شدگی‌های عمودی (منحنی توپر آبی) و افقی (منحنی نقطه‌چین قرمز) در باند فرکانسی X و زوایای مختلف نشان می‌دهد. داده‌های شکل (۹) برای حالت سه دریا (معادل سرعت باد بین ۱۰ تا ۲۰ نات^۳) معتبر است. طبق [۱۴]، حالت سه میانگین حالت‌های مختلف دریا در نظر گرفته می‌شود.

در شبیه‌سازی پس از تعیین مقدار میانگین سطح مقطع راداری به ازای هر متر مربع از روی نمودار شکل (۹) از توزیع رایلی^۴ برای تولید سطح RCS تصادفی استفاده می‌شود. سپس با توجه به مسیر حرکت سکوی رادار داده‌های خام راداری برای همه این نقاط با استفاده از رابطه (۱۲) تولید می‌شوند.



شکل (۹): چگالی بازگشتی از آب دریا در باند X و زوایای مختلف. منحنی توپر آبی برای پلاریزاسیون عمودی و نقطه‌چین قرمز برای پلاریزاسیون افقی [۱۷].

نکته قابل توجه این است که در این مرحله برای استفاده از پردازش موازی روی هسته‌های مختلف پردازنده، سرعت سکوی پرنده نسبت به هر نقطه پراکنده‌ساز در بازه مشاهده، از تقریب حرکت با شتاب ثابت محاسبه می‌شود و سپس هر جا نیازی به استفاده از تغییرات برد در زمان سریع یعنی زمان نمونه تا نمونه بعدی برد بود، از این سرعت استفاده می‌شود. برای پیشروی در کار، رابطه (۱۲) ساده‌سازی می‌شود. فاصله بین رادار و هدف را می‌توان به صورت یک بسط تیلور نوشت:

$$R(t) = R_0 + R_0' t + \frac{1}{2} R_0'' t^2 + \dots \quad (13)$$

که در این رابطه، مرجع زمان بسط تیلور وسط پالس

تشکیل تصویر رادار SAR اشتباه گرفت. حال که یک مدل واقعی از نقاط پراکنده‌گی هدف به دست آمد، داده‌های خام راداری با کمک رابطه (۱۱) که مربوط به بازگشتی از یک هدف نقطه‌ای است و اصل برهم نهی تولید می‌شود [۱].

$$s_0(\tau, \eta) = A_0 w_r(\tau - 2R(\eta)/c) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(\tau - 2R(\eta)/c)^2\} \quad (11)$$

که در این رابطه، K_r نرخ چیرپ، τ زمان سریع است که براساس فرکانس نمونه‌برداری از یک نمونه تا نمونه بعدی تغییر پیدا می‌کند، η زمان کند است که از پالس به پالس تغییر پیدا می‌کند، w_r تابع پنجره پالس است که محدوده زمانی آن را مشخص می‌نماید، w_a تابع مقدار ضریب آنتن است که براساس زاویه قرارگیری هدف در پرتو آنتن مقدار آن تعیین می‌شود. بنابراین، ضریب آنتن از پالس به پالس دیگر عوض می‌شود که دقت مورد نظر را ایجاد می‌کند. در رابطه (۱۱) برای ساده‌سازی فرض شده است که رادار در زمان ارسال و دریافت پالس حرکت ندارد و جابه‌جایی از یک پالس تا پالس بعدی اتفاق می‌افتد. در این جا این تقریب به دلیل استفاده از الگوریتم استخراج مرکز داپلر از روی داده‌های خام، مورد قبول نیست. به همین دلیل، از رابطه زیر برای ساخت داده‌های خام استفاده می‌شود.

$$s_0(\tau, \eta) = A_0 w_r(\tau - 2R(\tau)/c) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\tau)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(\tau - 2R(\tau)/c)^2\} \quad (12)$$

تفاوت اساسی رابطه (۱۲) با رابطه (۱۱) استفاده از زمان سریع در برد رادار تا نقطه پراکنده‌ساز^۱ است زیرا در این جا این دقت مورد نیاز می‌باشد. در رابطه (۱۱) آرگومان متغیر R در پرانتز η است که زمان کند یعنی زمان پالس تا پالس را نشان می‌دهد اما در رابطه (۱۲) آرگومان R در پرانتز τ است که زمان سریع یعنی فاصله زمانی نمونه‌های سیگنال در گیرنده رادار است که فرکانس نمونه‌برداری گیرنده، اندازه آن را مشخص می‌کند.

۳- روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی کلاتر دریا

کلاتر دریا یکی از بخش‌های مهم شبیه‌ساز سامانه راداری SAR است. زیرا تخمین فرکانس مرکزی داپلر و فرآیند اتوفوکوس به داده‌های بازگشتی دریا نیاز دارند. در واقع در پردازش داده‌های رادار SAR، نویز گیرنده با بازگشتی از سطح آب دریا و هدف

عبارت $\exp\left(-j\frac{4\pi f_0}{c}R_0't\right)$ موجب شیفت پیدا کردن تصویر تشکیل شده در برد می شود که در مدل مرجع [۱] به دلیل استفاده از تقریب، این نکته دیده نمی شود. در مدل این مرجع از η به عنوان زمان استفاده شده است که در طول یک پالس ثابت است اما در مدل این مقاله از τ به عنوان زمان استفاده نموده است. تفاوت این دو پارامتر در این است که τ در طول زمان یک پالس عوض می شود. در نتیجه، طبق خاصیت جابه جایی در تبدیل فوریه این تغییر زمان موجب جابه جایی مکان هدف در تصویر SAR در راستای برد می شود. با به کار بستن تقریب های ذکر شده، شبیه سازی هر نقطه از کلاتر را می توان به صورت موازی روی هسته های مختلف پردازنده انجام داد که این کار زمان شبیه سازی را نصف می کند.

داده های تولید شده با این روش فعلاً مانند داده های سطح زمین ساکن هستند. اما در مورد سطح دریا با توجه به وجود تحرک و امواج دریایی، تصویر داده ها در راستای داپلر دارای پهنای است. از آن جا که سیگنال بازگشتی از دریا دارای پهنای باند است و پهنای باند آن از تفکیک پذیری فرکانسی رادار بیشتر است، تصویر تشکیل شده از یک ناحیه مشخص از دریا دچار پهن شدگی در راستای داپلر تصویر می شود. بنابراین، در راستای داپلر پخش می شود. پهن شدگی در راستای داپلر، هم ارز مکانی هم روی زمین دارد که جلوتر به محاسبه آن پرداخته می شود. در این جا از این خاصیت استفاده شده و با توجه به پخش شدگی سیگنال بازگشتی در راستای داپلر به صورت تابع گوسی می توان نقاط پراکندگی مورد شبیه سازی برای آب دریا را در راستای سمت کاهش داد. زیرا یک پراکنده ساز تعداد زیادی از نقاط همجوار خود را تحت پوشش ناحیه ۳ dB توان خود قرار می دهد. طیف سیگنال بازگشتی از آب دریا می تواند به صورت رابطه (۱۵) نوشته شود:

$$e^{-\frac{f^2}{2\sigma_f^2}} = 2^{-\frac{f^2}{2\log_e(2)\sigma_f^2}} = 2^{-\frac{f^2}{2(\sqrt{\log_e(2)}\sigma_f)^2}} \quad (15)$$

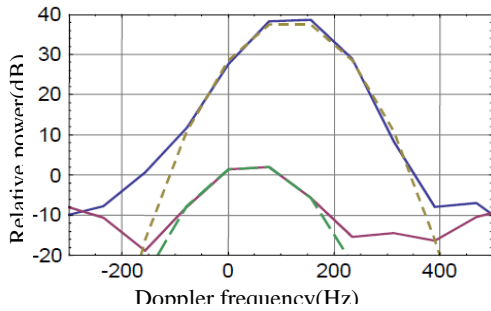
مطابق این رابطه، مقدار فرکانس نصف توان برابر $\sqrt{\log_e(2)}\sigma_f$ است. پس طبق شکل (۱۰)، اگر فاصله دو پراکنده ساز طوری باشد که ناحیه ۳ dB پهنای طیف فرکانسی آن ها با هم هم پوشانی داشته باشد، در این صورت، می توان از شبیه سازی پراکنده سازهای بین این دو پراکنده ساز برای صرفه جویی در زمان شبیه سازی صرف نظر کرد.

دریافتی در نظر گرفته می شود. بنابراین، فاصله رادار تا هدف در وسط پالس دریافتی برابر R_0 است. در این جا، مقادیر هر جمله از رابطه (۱۳) جداگانه حساب می شود. این مقادیر مشخص می کند که سهم هر جمله در جابه جایی رادار که در طول دریافت یک پالس رخ می دهد چقدر است. برای هر پارامتر بیشینه مقدار ممکن در نظر گرفته می شود. بنابراین، اگر دوره زمانی یک پالس $200 \mu s$ ، شتاب نزدیک شونده 200 m/s^2 و سرعت نزدیک شونده 2700 m/s باشد آن گاه، $R_0't = 0.27 \text{ m}$ و $\frac{1}{2}R_0't^2 = 1 \mu m$ بنابراین سهم جملات مرتبه دوم بسیار ناچیز است.

پس وقتی منظور تحلیل یک پالس است می توان از جملات مرتبه ۲ به بالا صرف نظر نمود. مبدأ زمان τ در رابطه (۱۲) وسط پالس ارسالی می باشد. بنابراین، وسط پالس دریافتی برابر $\frac{2R_0}{c}$ است. با جای گذاری بسط تیلور تا جمله مرتبه ۱ در رابطه (۱۲) رابطه (۱۴) حاصل می شود:

$$s_a(t) = w_r\left(t - \frac{2R_0't}{c}\right) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp\left(-j\frac{4\pi f_0}{c}(R_0 + R_0't)\right) \times \exp\left(j\pi K_r\left(t - \frac{2R_0't}{c}\right)^2\right) \quad (14)$$

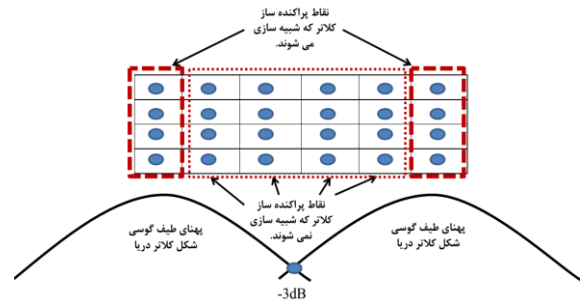
که در آن، $t = \tau - \frac{2R_0}{c}$ است. تابع پنجره w_r به اندازه $1 - \frac{2R_0'}{c}$ فشرده شده است. اما باید توجه نمود که به ازای سرعت های مورد کاربرد این مقاله، این مقدار نزدیک ۱ است. برای مثال اگر سرعت نزدیک شونده برابر 3000 m/s ، نرخ نمونه برداری 20 Msym/s و طول پالس $100 \mu s$ باشد، تعداد نمونه های داخل یک پالس به اندازه 0.4 نمونه کاهش پیدا می کند که به دلیل کوچک بودن نسبت به ۱ قابل صرف نظر است. همچنین، نرخ چیرپ 1 به اندازه $\left(1 - \frac{2R_0'}{c}\right)^2$ تغییر می کند که برای سرعت 3000 m/s معادل 0.004% است که مقدار بسیار ناچیزی است و موجب اعوجاج تصویر نمی شود ولی موجب ایجاد فرکانس های داپلر مختلف در فرکانس های مختلف پالس چیرپ هنگام جاروب می شود. از این خاصیت برای تخمین فرکانس مرکزی داپلر که مورد نیاز برای پردازش SAR است، استفاده می شود. بنابراین، قابل صرف نظر نیست. در جمله نمایی اول نیز



شکل (۱۱): دو نمونه از طیف نوعی آب دریا (خطوط پر داده‌های واقعی؛ خط چین‌ها تطبیق شکل گوسی)؛ تفکیک‌پذیری داپلر ۷۸/۱۲۵ Hz، ۱/۱۷ m/s در باند X [۵].

با انجام این کار و افزودن پهنای باند به کلاتر، در تصویر SAR که در حوزه نمونه‌های برد و سمت تشکیل شده است، هر نقطه کلاتر در جهت نمونه‌های سمت پخش می‌شود. بنابراین، در ساخت داده‌های خام می‌توان از این خاصیت استفاده نمود و در جهت سمت از هر چند نقطه، داده‌های یکی را شبیه‌سازی نمود. برای دانستن این که چه تعداد از نقاط را می‌توان در یک نقطه خلاصه کرد، معیار حداقل پهنای باند نصف توان در نظر گرفته می‌شود یعنی این که فاصله دو نقطه از هم در جهت سمت باید به گونه‌ای باشد که در تصویر تشکیل شده، پهنای باند آن‌ها در محدوده نصف توان، با هم هم‌پوشانی داشته باشند. در این حالت، هر یک از این تک نقطه‌ها که جانشین تعدادی نقطه دیگر شده، دارای سطح مقطع راداری برابر کل تعداد نقطه اولیه است. شکل (۱۲)، تصویر کلاتر را در شرایطی که پهنای باندی به آن اضافه نشده است، نشان می‌دهد. در این حالت، نوارهای روشن، همان ردیف‌های مختلف نقاطی هستند که به جای کل نقاط ناحیه، شبیه‌سازی شده‌اند. اما با افزودن پهنای باند و انجام پردازش برای تشکیل تصویر، شکل (۱۳) به دست می‌آید. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هیچ‌گونه گسستگی در تصویر دیده نمی‌شود و خبری از نوارهای روشن نیست. در این شکل، یک ناحیه مرکزی منحنی روشن‌تر دیده می‌شود که با فاصله گرفتن از مرکز این منحنی شدت روشنایی کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده این است که در رادار جلونگر، تفکیک‌پذیری جهت سمت رادار در راستای تصویر بردار سرعت سکوی پرنده روی زمین، کیفیت کمی دارد و با فاصله گرفتن از تصویر بردار سرعت روی زمین، اندازه تفکیک‌پذیری سلول ریزتر می‌شود. در نتیجه، در راستای بردار سرعت، سلول‌ها ناحیه بیشتری را روشن می‌نمایند و شدت بازگشتی نیز قوی‌تر است و با فاصله گرفتن از این راستا، شدت بازگشتی نیز کاهش می‌یابد.

اصولاً ماهیت استخراج و تحلیل کلاتر و نتایج پردازش آن برای انواع مختلف SAR متفاوت می‌باشد. بنابراین، با توجه به این که مشابه موضوع مقاله حاضر در جایی دیده نشده و امکان



شکل (۱۰): نمایش نقاط پراکنده‌ساز کلاتر آب دریا و چگونگی حذف نقاط غیرضروری در شبیه‌سازی

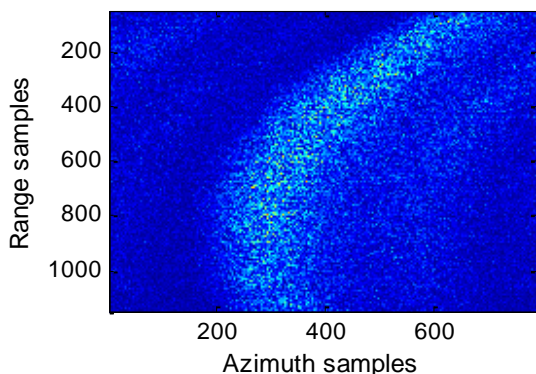
شکل (۱۱) توزیع طیف آب دریا برای دو نمونه از اندازه‌گیری و تابع گوسی سازگار با آن‌ها را نمایش می‌دهد. در این شکل، توان بر حسب dB نشان داده شده، زیرا مقایسه نسبی مدنظر بوده است. اختلاف این طیف‌ها در شدت بازگشتی از آب دریا و فرکانس مرکزی داپلر تلاطم آب دریا می‌باشد که قطعاً با هم متفاوت هستند. با توجه به این که این نمودار طیف کلاتر دریا بوده در نتیجه مستقل از حالت یا مود تصویربرداری با رادار SAR است. بنابراین، در شبیه‌ساز از اطلاعات پهنای باند داپلر برابر با ۷۸/۱۲۵ Hz مطابق با [۵] استفاده شده است. لذا برای ایجاد تحرک در طیف آب دریا لازم است تا طیف فرکانسی آن با تابع گوسی مربوطه که تابعی از حالت دریا است، کانولوشن^۱ شود. به جای کانولوشن می‌توان در حوزه زمان، ضرب معادل با آن را انجام داد. بنابراین، ابتدا یک آرایه دوبعدی هم‌اندازه با داده‌های خام از اعداد مختلط تصادفی ایجاد و این آرایه با گرفتن تبدیل فوریه در زمان کند به حوزه فرکانس برده و فیلتر گوسی در آن جا اعمال می‌شود. بعد از آن، آرایه با گرفتن تبدیل معکوس فوریه به حوزه زمان برده می‌شود. در این مرحله عمل نرمالیزاسیون صورت می‌پذیرد تا توان متوسط عناصر آرایه برابر ۱ شود. در این حالت، با ضرب این آرایه در داده‌های خام توان متوسط آن‌ها بدون تغییر می‌ماند. پیش از انجام عمل ضرب، داده‌های خام در برد فشرده و سپس اثر مهاجرت سلول برد جبران می‌شود.

مهاجرت سلول برد به خاطر تغییر لحظه‌ای فاصله بین سکوی راداری و هدف رخ می‌دهد که موجب جابه‌جایی سلول در راستای برد هدف در حافظه پردازش رادار می‌شود. برای به دست آوردن تصویر راداری SAR لازم است که این جابه‌جایی جبران شود. پس از ضرب در حوزه زمان اثر مهاجرت سلول برد دوباره ایجاد شده و عکس فشرده‌سازی برد انجام می‌شود تا داده‌ها دوباره به شکل خام اولیه درآیند.

و θ زاویه بین بردار سرعت و بردار واصل رادار و نقطه پراکنده‌ساز است. با مشتق‌گیری نسبت به θ تغییرات داپلر برحسب تغییرات زاویه به دست می‌آید. هدف به‌دست آوردن طول محدوده‌ای روی زمین است که پهنای باند داپلر نیم‌توان هر نقطه از کلاتر، جای آن محدوده را در تصویر راداری تحت پوشش قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، طول هم‌ارز مکانی پهنای باند داپلر محاسبه می‌شود. اگر طول این محدوده Δr فرض شود:

$$\Delta r = R_0 \frac{\Delta f_d \cdot \lambda}{2v \sin(\theta)} \quad (18)$$

که در آن، Δf_d پهنای باند نصف توان داپلر کلاتر، R_0 فاصله رادار تا نقطه پراکنده‌ساز و θ بیشترین زاویه بین بردار سرعت و سطح کلاتر موردنظر است. برای معتبربودن شبیه‌سازی برای همه سطح دریا باید بیشینه زاویه بین بردار سرعت و ناحیه مورد شبیه‌سازی از دریا را به عنوان اندازه θ درنظر گرفت. در این مطالعه، این مقدار برابر ۳ درجه است. حال اگر این مقدار بر فاصله بین نقاط پراکنده‌ساز کلاتر در جهت سمت تقسیم شود، حداکثر نسبت تقریب به دست می‌آید. برای مثال، اگر Δf_d مطابق زیرنویس شکل (۱۱) برابر ۷۸/۱۲۵ Hz، و با فرض θ برابر ۳ درجه، سرعت برابر ۲۷۰۰ m/s، طول موج رادار ۳ cm و فاصله رادار تا هدف ۶۰ km، مقدار Δr برابر ۵۳۷/۴ m خواهد شد. اگر فاصله بین نقاط پراکنده‌ساز کلاتر ۱۰ m باشد، حداکثر نسبت تقریب ۵۴ می‌شود. بنابراین، تعداد نقاط پراکنده‌ساز کلاتر در شبیه‌سازی و زمان آن، ۵۴ برابر کاهش خواهد یافت.



شکل (۱۳): تصویر کلاتر بعد از افزودن پهنای باند.

طبق رابطه (۱۷)، با افزایش فاصله رادار تا صحنه، مقدار تقریب افزایش پیدا کرده و موجب کاهش زمان شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین، ارزش روش پیشنهادی بیشتر در فواصل دور رادار تا صحنه مشخص می‌شود. از طرفی، در فواصل دور، ناحیه‌ای که آنتن روی سطح زمین می‌بیند مساحت بیشتری دارد و استفاده از روش تقریبی ضروری تر است.

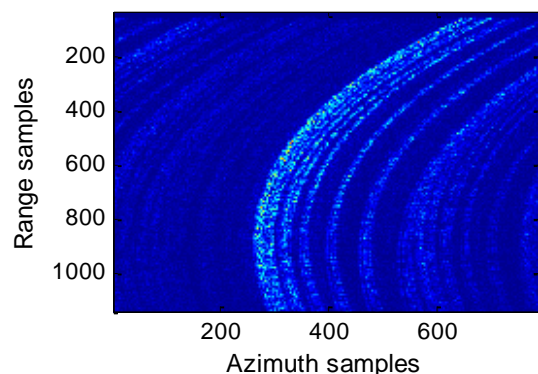
صحت‌سنجی مستقیم نیست لذا نمی‌توان از نتایجی که برای رادار کنارنگر در مقالات آمده برای رادار جلونگر نیز استفاده نمود. روشن و تاریک‌بودن ناحیه‌هایی از تصویر SAR کلاتر دریا خود دلیل قاطعی از صحت کار در این نوع روش تصویربرداری دارد. زیرا بخش بینایی رادار SAR جلونگر با معضل تفکیک‌پذیری نامطلوب مواجه بوده و سطح بیشتری در هر سلول داپلر در زیر رادار قرار می‌گیرد که باعث ایجاد نقاط روشن‌تر شده و همچنین با فاصله‌گرفتن از زیر رادار تفکیک‌پذیری بهبود می‌یابد بنابراین، سطح کمتری در یک سلول داپلر قرار گرفته و نقاط روشنایی کمتری دارند.

پارامترهایی که تاکنون استخراج شده، مختص رادار جلونگر است. مسیر حرکت، نزدیک‌شوندگی رادار به هدف و روابط (۱۴-۱۳) و فرضیاتی که درنظر گرفته شده، مختص رادار جلونگر است. ساده‌سازی پیشنهادشده در شکل (۱۰) نیز برای سادگی شبیه‌ساز SAR جلونگر انجام شده است و صرفه‌جویی در زمان برای رادار جلونگر نسبت به رادار کنارنگر بیشتر است زیرا طبق هندسه رادار و مطابق رابطه (۱۶) پهنای باند تصویر در رادار جلونگر کمتر از رادار کنارنگر است [۱].

$$BW_{image} = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_c) \theta_{BeamWidth} \quad (16)$$

که در آن، θ_c زاویه بین بردار سرعت و جهت آنتن، $\theta_{Beamwidth}$ پهنای پرتو آنتن، λ طول موج و v سرعت سکوی راداری است.

برای به‌دست آوردن حداکثر ضریب تقریب یعنی این‌که حداکثر چه تعداد نقطه را می‌توان با یک نقطه تقریب زد ابتدا رابطه فرکانس داپلر آورده می‌شود [۱۷]:



شکل (۱۴): تصویر کلاتر قبل از افزودن پهنای باند

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (17)$$

که در آن، f_d فرکانس داپلر، v سرعت رادار، λ طول موج رادار

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای کاربرد شبیه‌ساز رادار روزنه مصنوعی در ابتدا روشی برای به‌دست آوردن تصویر دوبعدی سطح مقطع راداری یک هدف گسترده با استفاده از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی هدف با روش ردگیری پرتو معرفی شده است. این تصویر در مدل‌سازی هدف برای ساخت داده‌های خام راداری استفاده می‌شود و منظور از این بخش پردازش داده‌های خام نیست بلکه مقدمه‌ای برای ساخت داده‌های خام راداری است. در مرحله بعد شبیه‌سازی کلاتر دریا با توجه به زاویه تابش موج الکترومغناطیسی و همچنین تحرک آب دریا برای اولین بار برای رادار روزنه مصنوعی جلونگر انجام شده است که در نوع خود روش جدیدی به حساب می‌آید. همچنین به منظور بهره‌مندی از پردازش موازی تقریب‌هایی در رابطه موج بازگشتی از هر نقطه به کار رفته است. در ادامه کار، این نتیجه به دست آمد که با استفاده از خاصیت تحرک کلاتر دریا می‌توان تعداد کمتری از نقاط پراکنده‌ساز را شبیه‌سازی نمود که موجب سریع‌تر شدن پیاده‌سازی شبیه‌ساز می‌شود. برای ادامه تحقیقات می‌توان روش این مقاله را با روش‌های مطرح در [۹-۱۵] که برای رادار کنارنگر هستند، ترکیب نمود تا روش کارآمدتری برای رادار جلونگر به‌دست آید.

۵- مراجع

- [11] G. Franceschetti, M. Migliaccio, and D. Riccio, "On Ocean SAR Raw Signal Simulation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 1, January 1998.
- [12] B. Liu and Y. He, "SAR Raw Data Simulation for Ocean Scenes Using Inverse Omega-K Algorithm," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 10, October 2016.
- [13] C. Ozdemir, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms", John Wiley & Sons, 2012.
- [14] M. L. Skolnik, "Introduction to RADAR Systems", 3rd Edition, McGraw Hill, 2001.
- [1] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data," Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [2] V. C. Koo, T. S. Lim, and H. T. Chuah, "A comparison of autofocus algorithms for SAR imagery," *Prog. In Electromag. Res. Symp.* 2005, Hangzhou, China, August, pp. 22-26, 2005.
- [3] M. Tsuchida, K. Suwa, and M. Iwamoto, "A simulator of synthetic aperture radar images, land, ocean surface, and man-made targets," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2004.
- [4] L. E. Yam, J. J. Mallorqui, and J. M. Rius, "Validation of a Sea Surface Model for Simulations of Dynamic Maritime SAR Images," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2012.
- [5] S. Watts, "A new method for the simulation of coherent sea clutter," *IEEE Radar Conf.* 2011.
- [6] S. Watts, L. Rosenberg, S. Bocquet, and M. Ritchie, "Doppler spectra of medium grazing angle sea clutter, part 1: characterization," *IET Radar Sonar Navig.*, 2015.
- [7] S. Watts, L. Rosenberg, S. Bocquet, and M. Ritchie, "Doppler spectra of medium grazing angle sea clutter, part 2: model assessment and simulation," *IET Radar Sonar Navig.*, 2015.
- [8] G. Davidson, "Simulation of Coherent Sea Clutter," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 4, no. 2, pp. 168-177, 2010.
- [9] G. Franceschetti, M. Migliaccio, and D. Riccio, "An Ocean SAR Simulator Based on the Distributed Surface Model," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* 1995.
- [10] G. Franceschetti, M. Migliaccio, and D. Riccio, "Ocean SAR Raw Data Simulation: Generation and Testing," *MTS/IEEE Conf. Proc. Oceans*, 1996.

A Novel Method for Simulation of Sea Clutter and Target for Application in a Forward-Looking Synthetic Aperture Radar Environment Simulator

R. Toreinia, M. Kazerooni*, M. Fallah

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 17/10/2016, Accepted: 07/08/2017)

Abstract

In this paper, firstly, a new idea of obtaining the electromagnetic image of large objects has been investigated. Then, the distributed target has been simulated in software and results have been processed to extract 2-dimensional image of the target model. Therefore, for the first time, the simulator gains the capability of distributed targets simulation that is required for the SAR simulator. The next achievement is the simulation of sea clutter that has been simulated for forward-looking radar, with respect to the requirement of SAR to the clutter, for Doppler centroid and Doppler rate extraction and the need for considering sea fluctuations for the first time. The advantage of this method is considering the radar movement in radar raw data. It is because SAR processing algorithms use radar raw data to estimate radar velocity and acceleration. Also, with respect to the motion of sea waves, the clutter has significant bandwidth in the azimuth direction. This property has been used for the application of a new idea whose benefit is reduction of needed points for simulation.

Keywords: Synthetic Aperture Radar(SAR), Sea Clutter, Synthetic Aperture Radar Simulator, Two-Dimensional Radar Cross Section Image

* Corresponding author E-mail: kazerooni@mut.ac.ir