

مدل سازی عملکرد سامانه های تصویر برداری SAR

حمید دهقانی^{۱*}، علی ریوندی^۲، مجتبی بهزاد فلاح پور^۳ و کیومرث موسی زاده^۴

۱، ۲، ۳ و ۴ - گروه مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*تهران، لویزان

dehghani@mut.ac.ir

سامانه های تصویر برداری راداری SAR مکملی برای سامانه های سنجش از دور الکترواپتیکی هستند و در طی دو دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته اند. پیچیدگی عملکرد در این سامانه ها، به ویژه در مرحله نگاشت، از فضای سیگنال به فضای تصویر، درک نحوه رفتار این سامانه ها را با مشکل مواجه ساخته است. این مسئله توسعه و استفاده از این فناوری را از منظر کاربری و مقابله با آن را از منظر پدافند غیر عامل، به شدت محدود کرده است. در این مقاله، تلاش شده است مدلی برای عملکرد سامانه های تصویر برداری SAR ارائه شود. مدل عملکردی ارائه شده، مانند تابع پاسخ ضربه برای سیستم های خطی مستقل از زمان، نحوه رفتار این سامانه ها را نشان می دهد و با استفاده از آن می توان فرایند تصویر برداری SAR را شبیه سازی کرد. صحت مدل عملکردی ارائه شده، بر اساس مقایسه نتایج به دست آمده در این مقاله و نتایج مورد انتظار گزارش شده در مراجع معتبر این حوزه به اثبات رسیده است.

واژه های کلیدی: سامانه های تصویر بردار SAR، پاسخ ضربه دوبعدی، مدل عملکردی، نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر، الگوریتم RDA

علائم و اختصارات

مقدمه

سامانه های سنجش از دور تصویر بردار به صورت فعال و غیر فعال عمل می کنند. سامانه هایی مثل تصویر بردارهای الکترواپتیکی که فقط بازتاب سطوح را در طول موج های مرئی و مادون قرمز ضبط می کنند، سامانه های سنجش از دور غیر فعال و سامانه هایی مثل تصویر بردارهای SAR که بازتاب امواج ماکروویوی که خود به سطوح تابانده اند را اندازه گیری می کنند، در دسته سامانه های تصویر برداری فعال قرار دارند.

سامانه های تصویر بردار غیر فعال، توانمندی های زیادی در کسب اطلاعات دارند. لیکن وجود محدودیت هایی در آنها، استفاده از سامانه های تصویر برداری فعال را اجتناب ناپذیر می کند. از جمله محدودیت های سامانه های تصویر برداری غیر فعال می توان به عدم توانایی دید در شب، تضعیف و پراکندگی امواج توسط اتمسفر و عدم دید در شرایط جوی ابری، بارندگی و گرد و غبار اشاره کرد [۱].

سامانه های تصویر برداری SAR علاوه بر پوشش دهی نقاط ضعف سنجش از دور غیر فعال امکان اخذ اطلاعاتی را فراهم

$S_{pui}(t)$	پالس ارسالی
$S_r(t)$	سیگنال دریافتی
t	زمان در جهت برد
η	زمان در جهت سمت
$R(\eta)$	معادله برد
C	سرعت انتشار امواج
kr	نرخ چیرپ در جهت برد
R_0	کوته ترین فاصله سکو تا هدف
V_r	سرعت مؤثر سکو
R	فاصله هدف تا سکو
f_0	فرکانس حامل

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد

۳. کارشناس ارشد

۴. کارشناس ارشد

۳. این نوع مدل‌سازی‌ها امکان شبیه‌سازی سطوح و اهداف را از منظر سامانه‌های تصویربرداری SAR فراهم می‌آورد.

۴. نظر به کلیدی‌شدن این فناوری در کسب برتری اطلاعاتی در میدان نبرد، مدل‌سازی عملکرد این نوع سامانه‌های تصویربرداری امکان طراحی راهکارهای مقابله با آنها را امکان‌پذیر می‌کند. به عبارت دیگر ایجاد امکان انجام پدافند غیرعامل در برابر این نوع سامانه‌ها، مستلزم مدل‌سازی نحوه عملکرد آنهاست.

در سامانه‌های تصویربرداری SAR، بخش تبدیل دیتای خام راداری به تصویر، یا نگاهت از فضای سیگنالی به فضای تصویر یک جزء اصلی و کلیدی از سامانه محسوب می‌شود. از این رو لازم است در مدل‌سازی انجام شده، اثر الگوریتم‌های تبدیل دیتای خام به تصویر در نظر گرفته شود [۴]. در این تحقیق الگوریتم RDA^۱ که یکی از مهم‌ترین این الگوریتم‌هاست، مبنای استخراج مدل عملکردی سامانه‌های تصویربرداری SAR قرار گرفته است. مبنای این انتخاب آن است که الگوریتم RDA اولین و پایه‌ای‌ترین الگوریتم نگاهت فضای سیگنال به فضای تصویر است.

الگوریتم‌های دیگری از قبیل CSA و Omega-k که بعد از RDA ارائه شده‌اند و عملکرد بهتری نیز نسبت به RDA دارند، از اصول حاکم بر این الگوریتم استفاده نوده‌اند و نسخه‌های بعدی الگوریتم RDA محسوب می‌شوند. از این رو آنچه براساس الگوریتم RDA ارائه می‌شود، با تغییراتی قابل اعمال برای الگوریتم‌هایی از قبیل CSA و Omega-k است.

صحت مدل ارائه شده در این مقاله، با توجه به نتایجی که با استفاده از آن به‌دست آمده، در مقایسه با نتایج مورد انتظار بر اساس مراجع اثبات شده است.

برای ارائه مدل عملکردی برای سامانه‌های تصویربرداری SAR در این مقاله، ابتدا نحوه شکل‌گیری فضای سیگنال بر اساس بازتاب‌های سطح در طول موج رادار SAR تشریح می‌گردد. در بخش سوم نگاهت از فضای سیگنال به فضای تصویر بررسی می‌شود. در ادامه مدل عملکردی سامانه‌های تصویربرداری SAR ارائه می‌شود. در بخش پنجم براساس مدل ارائه شده شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شده و کارایی مدل عملکردی نشان داده شده و در انتها جمع‌بندی مختصری ارائه می‌شود

شکل‌گیری فضای سیگنالی در تصویربرداری SAR

در فرایند تصویربرداری SAR دو فضای داده‌ای شکل می‌گیرد. یکی فضای سیگنالی است که نشان‌دهنده داده‌های خام است که توسط رادار

می‌آورند که توسط سنجش از دور الکترواپتیکی امکان‌پذیر نیست. برای مثال در این نوع سامانه‌های تصویربرداری امکان ثبت فاز و ثبت اطلاعات در پلاریزاسیون‌های مختلف وجود دارد. اطلاعات فاز برای اندازه‌گیری تداخل‌ها و تغییرات سطح بسیار مناسب است و می‌توان با استفاده از آنها تغییرات ارتفاعی سطح را با دقت بسیار بالا استخراج کرد. از امکان اخذ اطلاعات در پلاریزاسیون‌های مختلف برای استخراج اطلاعاتی در ارتباط با شکل و جهت اهداف و بافت‌های مختلف سطح استفاده می‌شود [۲].

با توجه به قابلیت‌هایی که سامانه‌های تصویربرداری SAR ارائه کرده‌اند، نه تنها این نوع سنجش از دور به عنوان مکملی برای سنجش از دور الکترواپتیکی مطرح شده، بلکه در بسیاری از کاربردها به عنوان تنها گزینه مطرح می‌شود.

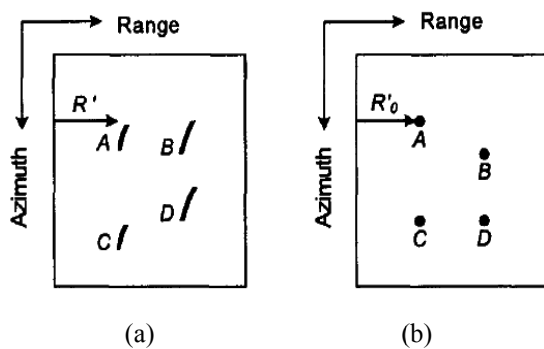
با این وجود، نحوه عملکرد در این نوع سامانه‌های تصویربرداری نسبت به سنجش از دور غیرفعال، بسیار پیچیده‌تر است. در تصویربرداری SAR ابتدا یک فضای سیگنالی بر اساس بازتاب سطح در طول موجی که رادار SAR در آن فعالیت می‌کند، شکل می‌گیرد و در ادامه برای تشکیل تصویر SAR منطقه، نگاهتی از این فضای سیگنالی به فضای تصویر انجام می‌گردد. این مسئله درک و تفسیر تصاویر SAR را مشکل کرده است [۳]. از این رو ارائه مدل‌هایی که نحوه عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR را تشریح کند، بسیار مطلوب است. لذا در این مقاله تلاش خواهد شد، چگونگی عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR مدل‌سازی شده و یک پاسخ ضربه دو بعدی برای این سامانه‌ها ارائه شود. قابل ذکر است که این مدل با یک نگاه سیستمی از میان ده‌ها کتاب و مقاله‌ای که در آنها نحوه عملکرد سامانه تصویربرداری SAR توضیح داده شده است، استخراج شده و علاوه بر تشریح چگونگی رفتار سامانه‌های تصویری SAR، قابلیت‌های زیر را نیز ایجاد خواهد کرد:

۱. با این مدل‌سازی امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری SAR فراهم می‌شود. از این منظر گام مهمی در جهت طراحی و ساخت این نوع سامانه‌های تصویربرداری خواهد بود. از طرف دیگر با توجه به آنکه عوامل مختلف در اطلاعات ثبت شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR نقش دارد، مدل‌سازی عملکرد این سامانه‌ها به تفسیر تصاویر SAR کمک زیادی خواهد کرد.

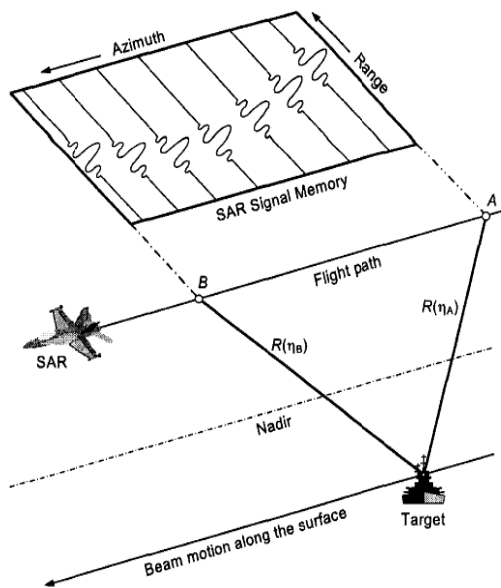
۲. مدل‌سازی نحوه عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR به تبدیل دیتای خام تهیه شده توسط این سامانه‌ها، به تصویر کمک زیادی می‌کند.

1. Range Doppler Algorithm (RDA)

سیگنال به فضای تصویر است، حتی با وجود آنکه عملکرد، ضعیف تری نسبت به الگوریتم هایی مثل CSA و Omega-k دارد، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم پایه الگوریتم های بعد از خود بوده و در سامانه های SAR معروفی مثل ماهواره رادارست^۹ استفاده شده است.



شکل ۱- (a) فضای سیگنالی، (b) فضای تصویری [۵]



شکل ۲- نمایش چگونگی ارسال پالس و ذخیره آکوی بازگشتی ضمن حرکت سکو و تشکیل فضای سیگنالی در سامانه های تصویربرداری SAR [۵]

نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر

الگوریتم RDA در سال های ۱۹۷۸-۱۹۷۶ برای پردازش دیتاهای ماهواره سیست^{۱۰} به کار رفت و اولین تصویر دیجیتالی از SAR توسط این الگوریتم در سال ۱۹۷۸ تولید شد. این الگوریتم یک نقش

سامانه تصویربرداری SAR اخذ می شود. دیگری فضای تصویر است که از رویدادهای خام اخذ شده بازسازی می شود. برای مدل سازی عملکرد سامانه های تصویربرداری SAR، ابتدا لازم است نحوه شکل گیری فضای سیگنال در سامانه های تصویربرداری SAR معرفی شود. شکل (۱) این دو فضای داده ای را برای حالت چند هدفه نشان می دهد.

در رادارهای تصویربرداری Strip map رادار بر روی یک سکو که می تواند ماهواره یا هواپیما باشد قرار گرفته و ضمن حرکت بر فراز صحنه مورد نظر، همانند یک رادار معمولی پالس های متوالی را به سوی صحنه ارسال می کند. در سامانه های SAR همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، پس از ارسال هر پالس، آکوی ناشی از آن در گیرنده دریافت شده و پس از انتقال به باند پایه، نمونه برداری شده و در یک آرایه دو بعدی قرار داده می شود. به این آرایه دو بعدی، دیتای خام^۶ یا فضای سیگنالی گفته می شود. دو بعد فضای سیگنالی را بعدها برد^۷ و سمت^۸ می نامند. راستای سمت در جهت حرکت سکو حامل سنجنده SAR و راستای برد عمود بر جهت حرکت سکو است. شکل (۲) چگونگی ذخیره دیتا در فضای سیگنال را نشان می دهد. فضای تصویر پس از پردازش بر روی این فضای سیگنالی استخراج شده و تصویر SAR از صحنه مورد نظر تشکیل می شود [۶].

به دلیل پائین بودن توان تفکیک در دو بعد برد و سمت فضای سیگنال، نمی توان مستقیماً از روی این فضا، فضای تصویر را تشکیل داد. شکل (۳) سیگنال بازگشتی از یک هدف نقطه ای را در دو بعد برد و سمت نمایش می دهد.

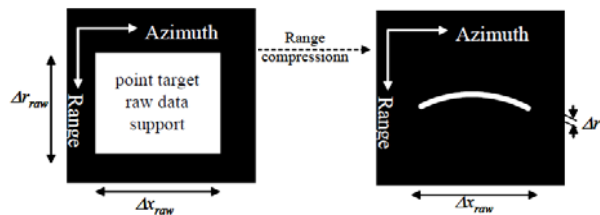
همانگونه که در این شکل نشان داده شده است دیتای خام ناشی از یک هدف نقطه ای که ابعاد آن به اندازه یک پیکسل رادار است، به دلیل پائین بودن توان تفکیک فضای سیگنال، در هر یک از دو بعد دچار پهن شدگی شده و اثر آن در چندین پیکسل مجاور دیده می شود. علاوه بر مشکل فوق یک انحنای سهمی گون در فضای سیگنالی وجود دارد که به دلیل حرکت سکو در حین فرایند تصویر برداری و تغییر فاصله رادار نسبت به هدف، ایجاد شده است. براساس آنچه بیان شد، به منظور ایجاد یک تصویر مطلوب SAR از یک صحنه، کیفیت نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر اهمیت زیادی دارد. برای انجام این نگاشت الگوریتم های مختلفی ارائه شده است. از جمله این الگوریتم ها می توان به الگوریتم های RDA، CSA، Omega-k و SPECAN اشاره کرد. اساس این الگوریتم ها بسیار به هم شبیه است و تنها در نحوه اعمال برخی از پردازش ها متفاوت رفتار می کنند [۸ و ۷]. با توجه به آنکه الگوریتم RDA یکی از اولین و پایه ای ترین الگوریتم های نگاشت فضای

9. RADARSAT
10. SEASAT

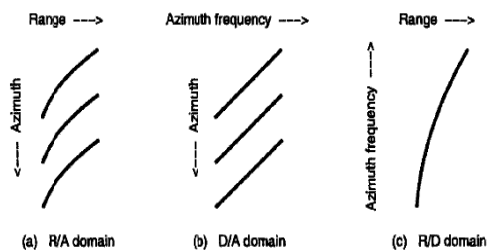
6. Raw Data
7. Range
8. Azimuth



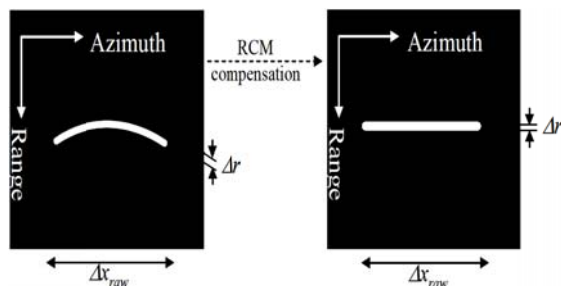
شکل ۴- بلوک دیاگرام RDA [۵]



شکل ۵- فشرده سازی در جهت برد [۹]



شکل ۶- یک خانواده از اهداف در حوزه های مختلف (الف) حوزه برد و سمت (ب) حوزه سمت و داپلر (سمت در حوزه فرکانس) (ج) حوزه رنج داپلر [۵]



شکل ۷- نتیجه اعمال RCMC [۹]

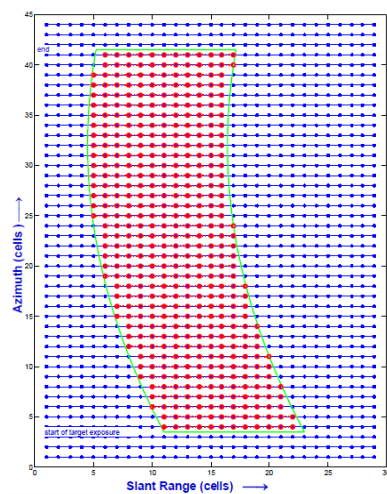
پایه ای را در نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر بر عهده دارد. از این رو با وجود قدیمی بودن هنوز هم جزء روش هایی است که در نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر استفاده می شود. بلوک دیاگرام این الگوریتم در شکل (۴) نشان داده شده است. این الگوریتم از سه جزء اصلی تشکیل شده که به صورت خلاصه در ادامه تشریح می شوند.

فشرده سازی برد

همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود دیتاهای رسیده از یک هدف نقطه ای به دلیل پایین بودن توان تفکیک در هر دو جهت برد و سمت گسترده شده اند. از این رو لازم است داده در فضای سیگنالی برای نگاشت به فضای تصویر در هر دو جهت فشرده شود. به این عملیات فشرده سازی در جهت برد^{۱۱} و فشرده سازی در جهت سمت گفته می شود. به این منظور از فیلترهای منطبق استفاده می شود [۵]. خروجی بعد از اعمال فیلتر منطبق برای فشرده سازی در جهت برد در شکل (۵) نشان داده شده است.

بخش اصلاح خمش (RCMC)^{۱۲}

همانگونه که در شکل (۵) دیده می شود قبل از فشرده سازی در جهت سمت به یک مرحله اصلاح خمش (RCMC) نیاز است. برای این منظور از حوزه رنج داپلر (از نظر برد در حوزه مکان و از نظر سمت در حوزه فرکانس) استفاده می شود زیرا در آن، تمامی اهدافی که فاصله مایل یکسانی نسبت به SAR دارند، روی هم قرار می گیرند و آنگاه می توان یک اصلاح کلی بر روی هر ستون از برد انجام داد. این مسئله در شکل (۶) نشان داده شده است. نتیجه به کارگیری بخش RCMC روی خروجی بخش فشرده سازی برد (شکل ۵) نیز در شکل (۷) مشهود است.



شکل ۳- مکان هندسی انرژی بازگشتی از یک هدف نقطه ای [۵]

11. Range Compression
12. Range Cell Migration Correction

$$W_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \quad (2)$$

مرجع زمانی ($t = 0$) منطبق بر مرکز پالس است. با داشتن رابطه پالس ارسالی و فاصله هدف تا رادار می توان سیگنال دریافتی را برحسب این فاصله اینگونه بیان کرد [۵]:

$$S_r(t) = A_0 S_{\text{pul}}(t - 2R/c) \quad (3)$$

که در آن A_0 عددی حقیقی است که تضعیف ناشی از ضریب انعکاس^{۱۴} هدف را مدل می کند و R فاصله هدف تا سکوست. با جایگذاری رابطه (۱) در (۳) رابطه زیر به دست می آید [۵]:

$$S_r(t) = A_0 W_r(t - 2R/c) \times \cos\{2\pi f_0(t - 2R/c + \pi K_r t - 2R\eta c + \psi)\} \quad (4)$$

در رابطه فوق ψ اختلاف فازی است که در سیگنال منعکس شده به وجود می آید. این اختلاف فاز مانند A_0 ناشی از خصوصیات الکترومغناطیسی هدف است.

اما همان طور که گفته شد در ضمن تصویربرداری، ماهواره بر فراز صحنه حرکت می کند و پالس های متوالی را به سوی هدف ارسال، و اکوی آنها را ثبت خواهد کرد. ضمن این حرکت فاصله ماهواره تا هدف طبق رابطه (۵) تغییر می کند [۸].

$$R^2(\eta) = R_0^2 + V_r^2 \eta^2 \quad (5)$$

که در آن R_0 کوتاهترین فاصله سکو تا هدف، η زمان در جهت سمت و V_r سرعت مؤثر سکوست. به این ترتیب با جایگذاری $R(\eta)$ در جای R در رابطه (۴) می توان سیگنال بازگشتی را در دو بعد و برحسب t و η اینگونه بیان کرد [۸]:

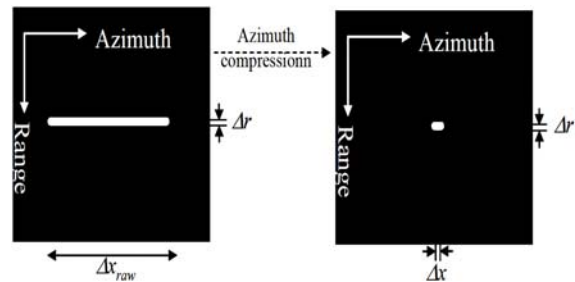
$$S_r(t, \eta) = A_0 W_r(t - 2R(\eta)/c) \times \cos\{2\pi f_0(t - 2R(\eta)/c + \pi K_r t - 2R\eta c + \psi)\} \quad (6)$$

بعد از دریافت سیگنال $S_r(t, \eta)$ در گیرنده، آن را به کمک دمدولاتور IQ به باند پایه منتقل می کنند و در آرایه دوبعدی یا فضای سیگنال ذخیره می کنند. رابطه سیگنال باند پایه به این ترتیب است [۵]:

$$S_0(t, \eta) = A_0 W_r(t - 2R(\eta)/c) W_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(t - 2R(\eta)/c)^2\} \quad (7)$$

که در آن $W_a(\eta - \eta_c)$ پوش در جهت سمت است که غالباً به صورت سینک است. رابطه (۷) سیگنال بازگشتی از یک هدف نقطه ای را در باند پایه نشان می دهد. اگر در این رابطه از A_0 صرفه نظر شود، رابطه پاسخ ضربه ناشی از یک هدف نقطه ای با دامنه واحد به دست می آید:

$$h_{\text{imp}}(t, \eta) = W_r(t - 2R(\eta)/c) W_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(t - 2R(\eta)/c)^2\} \quad (8)$$



شکل ۸- فشرده سازی در جهت سمت [۹]

فشرده سازی در جهت سمت^{۱۳}

بعد از استفاده از بخش RCMC که باعث از بین رفتن خمشی می شود، می توان سیگنال گسترده شده در جهت سمت را به وسیله فیلتر منطبق در آن جهت فشرده کرد. شکل (۸) نتیجه به کارگیری فیلتر منطبق را روی خروجی شکل (۷) نشان می دهد. بدین ترتیب، هدف نهایی که همان پیکسل نقطه ای است، ایجاد می شود.

مدل سازی عملکرد سامانه های تصویربرداری SAR

آنچه در قسمت های قبل بیان شد، حالت ایده آلی است که انتظار می رود در تصویربرداری SAR رخ دهد و برای یک هدف نقطه ای، شکلی شبیه شکل (۸) ایجاد شود. اما در عمل به دلایل مختلفی این حالت رخ نمی دهد. در این بخش رفتار سامانه تصویربرداری SAR به صورت یک پاسخ ضربه دو بعدی مدل سازی می شود. پاسخ ضربه معرف رفتار یک سامانه به ازای ورودی ضربه (در این حالت هدف نقطه ای) است. در سامانه های خطی مستقل از زمان (در این حالت مستقل از مکان) با استفاده از این پاسخ ضربه می توان خروجی سامانه را به ازای ورودی های مختلف، تعیین کرد. لازم به ذکر است که مدل ارائه شده در این مقاله برای سامانه تصویربرداری SAR ساده ترین حالت ممکن است. برای این منظور همه عوامل تأثیرگذار در فرایند تصویربرداری SAR ثابت و بدون تأثیر در نظر گرفته شده اند و فقط بخش تبدیل فضا از فضای سیگنال به فضای تصویر یکی از بخش های اصلی فرایند تصویربرداری SAR محسوب می شود.

برای استخراج پاسخ ضربه لازم است سیگنالینگ سامانه SAR مورد بررسی قرار گیرد. متداول ترین پالسی که برای ارسال در اینگونه رادارها استفاده می شود یک پالس چیرپ است که از رابطه زیر تبعیت می کند [۳]:

$$S_{\text{pul}}(t) = W_r(t) \cos\{2\pi f_0 t + \pi K_r(t)^2\} \quad (9)$$

که در آن f_0 فرکانس حامل، K_r نرخ چیرپ، t زمان در جهت برد و $W_r(t)$ یک پنجره مستطیلی با رابطه زیر است [۳]:

طول و عرض هر پیکسل در روی زمین توسط توان تفکیک رادار مشخص می‌شود. به‌طور مثال ابعاد هر پیکسل ماهواره رادارست ۱ بر روی زمین ۱۱×۹ میلی‌متر است. بنابراین در این مثال هر عضو ماتریس $g(t, \eta)$ بیانگر میزان انعکاس سطحی به ابعاد ۱۱×۹ میلی‌متر است [۵]. بر اساس مدل عملکردی ارائه شده این امکان ایجاد می‌شود که بتوان اثر پارامترهای مختلف از جمله اثر جرمها، تداخلها، الگوریتم‌های پردازشی، و پارامترهای سامانه تصویربرداری و سایر عوامل دیگر را بر روی این سیگنال خام مدل کرد و اثر آن را بر روی تصویر خروجی مورد بررسی قرار داد [۱۰].

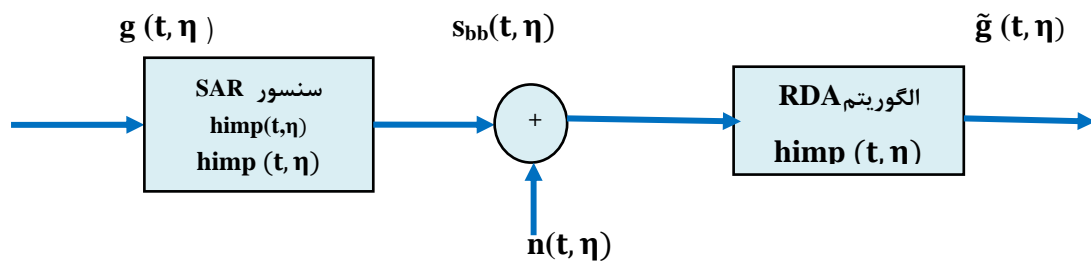
در شرایط واقعی که بدون هیچ تداخلی فرایند تصویربرداری SAR در حال انجام است، پارامترهای مختلفی از صحنه تصویربرداری و سامانه حامل سنجنده SAR در تصویر SAR اخذ شده تاثیرگذار خواهند بود. برای مثال تابع $g(t, \eta)$ به عواملی از سطح مثل جنس مواد سطح، رطوبت، سطح مقطع راداری، ضریب دی الکتریک، شیب سطح و عوامل گوناگون دیگری وابسته است. از طرف دیگر در شرایط واقعی پاسخ ضربه $h_{imp}(t, \eta)$ ارائه شده برای سامانه تصویربرداری SAR به پارامترهای مختلفی از سکوی حامل سنجنده از قبیل ارتفاع پروازی، زاویه دید، سرعت وابسته است. در شرایط واقعی نویز می‌تواند هم به صورت جمع‌شونده عملکرد سامانه را تحت تأثیر قرار دهد و هم می‌تواند به صورت ضرب‌شونده اعمال گردد. در شرایط واقعی الگوریتم‌های مختلف نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از این رو مدل عملیاتی برای شرایط واقعی برای سامانه تصویربرداری SAR به صورت شکل (۱۰) است.

تابع $h_{imp}(t, \eta)$ پاسخ ضربه مربوط به بخش تشکیل فضای سیگنالی در سامانه تصویربرداری SAR است. در صورتی که این پاسخ ضربه از یکی از توابع نگاشت فضای سیگنال به فضای تصویر عبور داده شود، پاسخ ضربه کل سامانه تصویربرداری SAR ایجاد خواهد شد. این پاسخ ضربه کلی، مدل رفتاری یا مدل عملکردی سامانه تصویربرداری SAR است. با استفاده از این مدل می‌توان خروجی این سامانه تصویربرداری را برای یک صحنه دلخواه شبیه‌سازی کرد.

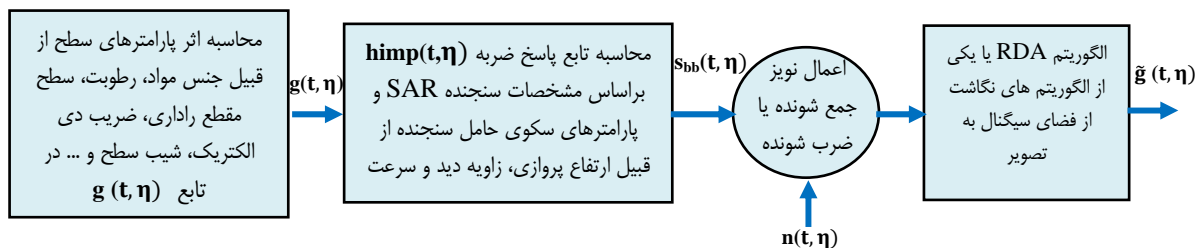
اگر صحنه آرایه‌ای دو بعدی متشکل از اهداف نقطه‌ای قرار گرفته در کنار هم فرض شود به عبارت دیگر بتوان ماتریس $g(t, \eta)$ را به گونه‌ای تعریف کرد که نشان‌دهنده انعکاس‌های سطح از منظر طول موج استفاده شده در رادار سامانه SAR باشد. در این صورت برای شبیه‌سازی سیگنال راداری SAR دریافت شده از کل صحنه، کافی است کانولوشن دوبعدی $h_{imp}(t, \eta)$ و $g(t, \eta)$ محاسبه شود. بر اساس مطالب بیان شده، سیگنال راداری دریافتی از کل صحنه را می‌توان اینگونه بیان کرد:

$$S_{bb}(t, \eta) = g(t, \eta) * h_{imp}(t, \eta) + n(t, \eta) \quad (9)$$

آنچه توسط این تابع به عنوان $S_{bb}(t, \eta)$ تولید می‌شود، داده SAR متناسب با صحنه $g(t, \eta)$ در فضای سیگنالی است. براساس آنچه تاکنون بیان شد، برای تولید تصویر SAR متناسب با صحنه $g(t, \eta)$ لازم است از یکی از توابع نگاشت از فضای سیگنال به تصویر مثل RDA استفاده شود. شکل (۹) مدل عملکردی یک سامانه SAR با نویز جمع‌شونده را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مدل پیشنهادی سامانه تصویربرداری SAR



شکل ۱۰- مدل پیشنهادی کامل سامانه تصویربرداری SAR برای شرایط واقعی

نتایج شبیه سازی

همانگونه که بیان شد برای شبیه سازی دیتای خام راداری یک منطقه باید ماتریس $g(t, \eta)$ آن در دسترس باشد تا با کانولوشن دوبعدی با $h_{imp}(t, \eta)$ بتوان سیگنال دریافت شده توسط رادار را شبیه سازی کرد. با جایگزین کردن پارامترهای مختلف یک سامانه تصویربرداری SAR در رابطه (۸) می توان پاسخ ضربه $h_{imp}(t, \eta)$ مربوط به فضای سیگنالی آن سامانه را ایجاد کرد. با وجود این پاسخ ضربه، اگر ماتریس $g(t, \eta)$ یک منطقه در اختیار باشد می توان سیگنال دریافت شده توسط سامانه SAR مورد نظر را شبیه سازی کرد.

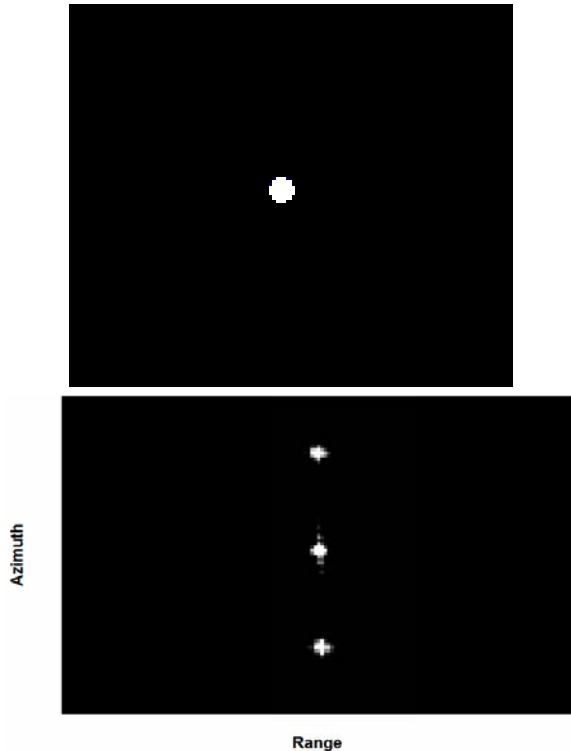
به عنوان اولین شبیه سازی، پاسخ ضربه کلی سامانه تصویربرداری SAR استخراج می گردد. برای این منظور یک هدف نقطه ای (هدفی که فقط یک پیکسل از صحنه را پر می کند) در یک تصویر خالی در نظر گرفته می شود. برای سادگی فرض شد که این هدف، حداکثر روشنایی را در تصویر SAR ایجاد کند و در همه جهات یکسان دیده شود. براساس فرض های در نظر گرفته شده، آنچه در شکل (۱۱) نشان داده شده است، یک تابع ضربه دو بعدی برای اعمال به مدل سامانه تصویربرداری SAR ارائه شده در این مقاله است.

تابع ضربه دو بعدی شکل (۱۱) به عنوان تابع $g(t, \eta)$ به ورودی مدل ارائه شده در شکل (۹) اعمال شد. برای استخراج پاسخ ضربه به ازای ورودی تابع ضربه دو بعدی فوق از مشخصات سامانه تصویربرداری رادارست ۱ در رابطه (۸) استفاده شده است.

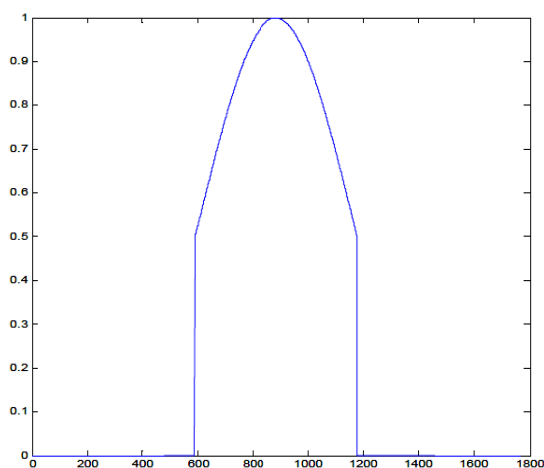
براساس مشخصات سامانه SAR انتخاب شده و ماهواره مربوطه، تأثیرگذاری پیکسل هدف نقطه ای در تابع ضربه دو بعدی ورودی در جهت سمت به صورت شکل (۱۲) است.

در صورتی که اثر هدف نقطه ای تابع ضربه دو بعدی ورودی در هر دو جهت برد و سمت در نظر گرفته شود، فضای سیگنالی شکل (۱۳) ایجاد می شود. محور افقی این فضا جهت برد و محور عمودی آن جهت سمت را نشان می دهد. تصویر شکل (۱۳) دامنه پاسخ ضربه بخش شکل دهی فضای سیگنالی سامانه تصویربرداری SAR با مشخصات رادارست-۱ است.

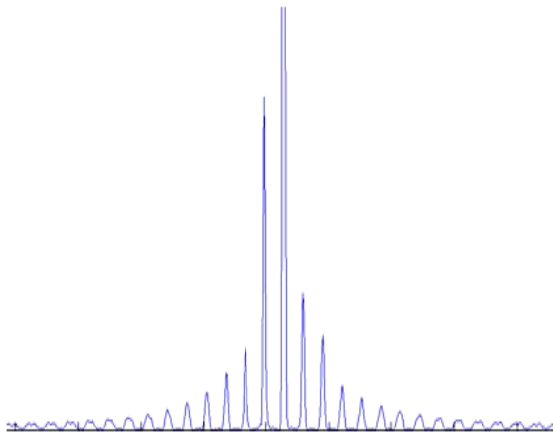
تا این مرحله داده خام ایجاد شده توسط سامانه تصویربرداری SAR براساس منطقه تحت مشاهده شکل (۱۱) ایجاد شده است. برای تبدیل این فضای سیگنال به فضای تصویر، از یکی از الگوریتم های این حوزه (در اینجا RDA) استفاده شد. آنچه به عنوان خروجی این قسمت حاصل شد، پاسخ ضربه کلی سامانه تصویربرداری SAR می باشد که به ازای مشخصات سامانه تصویربرداری رادارست-۱ و الگوریتم تبدیل فضای سیگنال به فضای تصویر RDA ایجاد شده است. دامنه این پاسخ ضربه کلی در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تابع ضربه دو بعدی برای اعمال به مدل سامانه تصویربرداری SAR، محور افقی برد و محور عمودی سمت است.



شکل ۱۲- اثر گذاری هدف نقطه ای تابع ضربه دو بعدی ورودی در جهت سمت

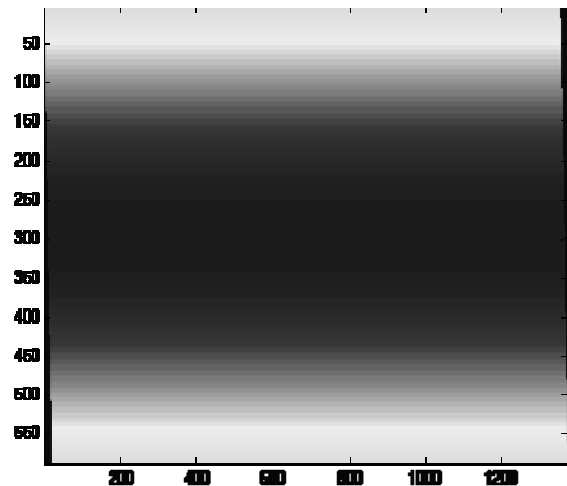


شکل ۱۵- تبدیل شدن یک ضربه به یک سینک در فرایند تصویربرداری SAR

یکی از قابلیت‌هایی که این مدل‌سازی ایجاد می‌کند، ایجاد امکان شبیه‌سازی سطوح و اهداف از منظر سامانه‌های تصویربرداری SAR است. در ادامه این قابلیت تشریح می‌گردد.

اگر آنچه در شکل (۱۶-الف) نشان داده شده، تصویر انعکاسی از منظر طول موج رادار SAR ماهواره رادارست-۱ یعنی ماتریس $g(t, \eta)$ یک منطقه باشد. براساس پاسخ ضربه بخش شکل‌دهی فضای سیگنال، دامنه سیگنال ثبت شده توسط این ماهواره برای منطقه تحت بررسی مشابه شکل (۱۶-ب) خواهد بود. شکل (۱۶-ج) خروجی الگوریتم RDA اعمال شده به دیتای شکل (۱۶-ب) است. مقایسه شکل‌های (۱۶-الف) و (۱۶-ج) نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل ارائه شده در این مقاله است. از طرف دیگر شکل (۱۶-ج) منطقه تحت بررسی را از منظر سامانه تصویربرداری SAR نشان می‌دهد.

این شبیه‌سازی نشان‌دهنده قابلیت مدل ارائه شده برای تولید دیتای خام راداری و تصویر SAR از روی مناطقی است که تصویر SAR آن وجود ندارد. البته لازم به ذکر است که لازمه این شبیه‌سازی امکان تولید ماتریس $g(t, \eta)$ از منطقه مورد نظر است. از آنجا که عواملی مثل جنس مواد سطح، رطوبت، سطح مقطع راداری، ضریب دی‌الکتریک و عوامل گوناگون دیگری در تعیین ماتریس $g(t, \eta)$ تأثیرگذار هستند، با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله، امکان مطالعه تأثیرگذاری این عوامل فراهم شده است. از آنجا که تصویر گرفته شده از یک منطقه توسط سامانه‌های SAR، به نوعی ماتریس $g(t, \eta)$ آن منطقه است، بنابراین یک راه دستیابی به ماتریس $g(t, \eta)$ یک منطقه استفاده از تصویری است که توسط یک سامانه SAR نمونه از آن منطقه گرفته شده باشد. شکل (۱۷-الف) تصویری را نشان می‌دهد که توسط یک سیستم SAR گرفته

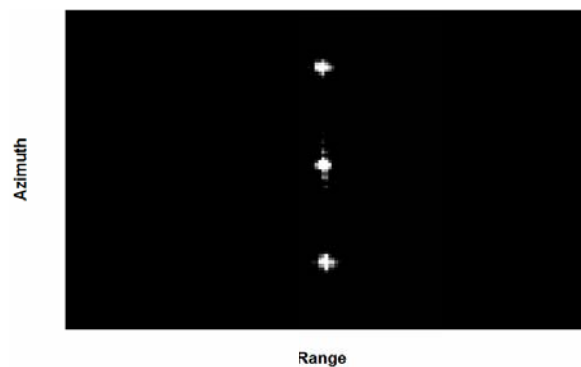


شکل ۱۳- دامنه پاسخ ضربه بخش شکل‌دهی فضای سیگنالی در سامانه SAR، محور افقی برد و محور عمودی سمت است.

تصویر SAR نشان داده شده در مرجع [۵] برای یک هدف نقطه‌ای، درستی پاسخ ضربه به‌دست آمده در این مقاله را تأیید می‌کند.

سطح مقطع پاسخ ضربه SAR ایجاد شده در شکل (۱۴) در جهت برد و سمت به صورت شکل (۱۵) است. ملاحظه می‌شود که یک هدف نقطه‌ای (یا یک ضربه) در یک فرایند تصویربرداری SAR به یک تابع شبه سینک تبدیل می‌شود. پیروی این تابع شبه سینک به‌وسیله مشخصات سامانه تصویربرداری SAR تعیین می‌شود.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهند، که در فرایند تصویربرداری SAR (شکل‌گیری فضای سیگنالی) و تشکیل تصویر از روی دیتای خام، یک نقطه پخش شده و اثرات سایه گونه‌ای از خود برجای می‌گذارد. این پدیده یکی از محدودیت‌های سامانه‌های تصویربرداری SAR بوده و منجر به ایجاد پدیده اکو و نهایتاً تشکیل نویز لکه‌ای یا اسپیکل در تصاویر SAR می‌شود.

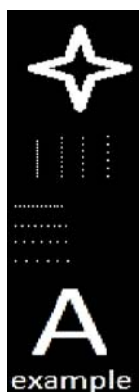


شکل ۱۴- دامنه پاسخ ضربه کلی سامانه تصویربرداری SAR به ازای مشخصات رادارست ۱ و الگوریتم RDA

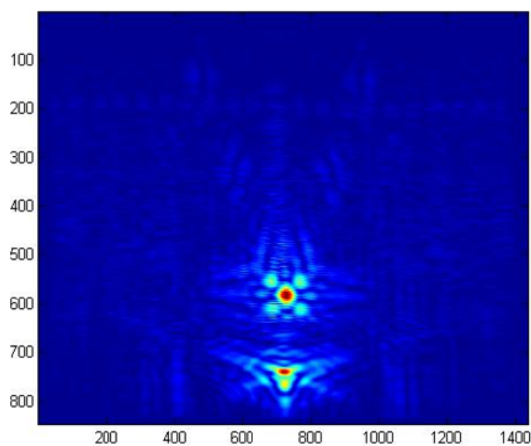
شده‌است. شکل (۱۷-ب) حاصل کانولوشن این تصویر با $h_{imp}(t, \eta)$ سیستم رادارست-۱ را نشان می‌دهد. شکل (۱۷-ب) در حقیقت شبیه‌سازی سیگنال دریافت شده توسط رادارست-۱ از آن منطقه است. شکل (۱۷-ج) خروجی الگوریتم RDA را وقتی که ورودی آن سیگنال شکل (۱۷-ب) است، نشان می‌دهد. مقایسه شکل (۱۷-ج) و شکل (۱۷-ب) مورد تأیید بودن نتایج مدل ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهد. این مثال نشان می‌دهد که با استفاده از مدل ارائه شده می‌توان از روی تصویر SAR منطقه، تصویر SAR آن منطقه را از منظر سامانه‌های تصویربرداری SAR دیگر شبیه‌سازی کرد. این قابلیت امکان مطالعه پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری و سکوها حامل آنها را فراهم می‌آورد. یکی از قابلیت‌های مهمی که مدل ارائه شده ایجاد می‌کند، امکان طراحی اقدامات پدافند غیرعاملی در برابر سامانه‌های تصویربرداری SAR است که در مقاله‌های بعدی به صورت مفصل ارائه می‌گردد. در این مقاله به‌صورت مختصر در این ارتباط صحبت می‌شود. سه موضوع استتار (همسان‌سازی شناسه)، اختفاء (پنهان‌سازی شناسه) و فریب (تولید شناسه غیرواقعی) از ارکان پدافند غیرعامل است. با استفاده از اهداف کاذب در حوزه‌های راداری مثل رفلکتورها که شناسه بسیار قوی از منظر سنجنده‌های راداری تولید می‌کنند، می‌توان هر سه رکن استتار، اختفاء و فریب را در پدافند غیرعامل در برابر سنجنده‌های SAR طراحی و با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله تحلیل کرد. بلوک دیاگرام کلی این موضوع در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله سامانه‌های تصویربرداری SAR از نظر عملکردی مدل‌سازی شده و پاسخ ضربه دو بعدی برای آنها ارائه شد. با وجود آنکه در استخراج این پاسخ ضربه، بسیاری از عوامل بدون تأثیر در نظر گرفته شدند، با این حال مدل ارائه شده قابلیت‌های متعددی را ایجاد می‌کند. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان به امکان تشریح پدیده اکو و تشکیل نویز اسپیکل در تصاویر SAR، ایجاد امکان تحلیل عوامل سطح تحت تصویربرداری، که در تصویر SAR سطح تأثیرگذارند، اشاره کرد. ایجاد امکان تحلیل پارامترهای سامانه‌های تصویربرداری SAR و سکویی که آن را حمل می‌کند، ایجاد امکان طراحی اقدامات پدافند غیرعاملی در برابر سامانه‌های تصویربرداری SAR، و جلوگیری از تصویربرداری از مناطق خاص توسط این سامانه‌ها از جمله قابلیت‌های دیگری بود که توسط این مدل‌سازی ارائه شد.



(الف)

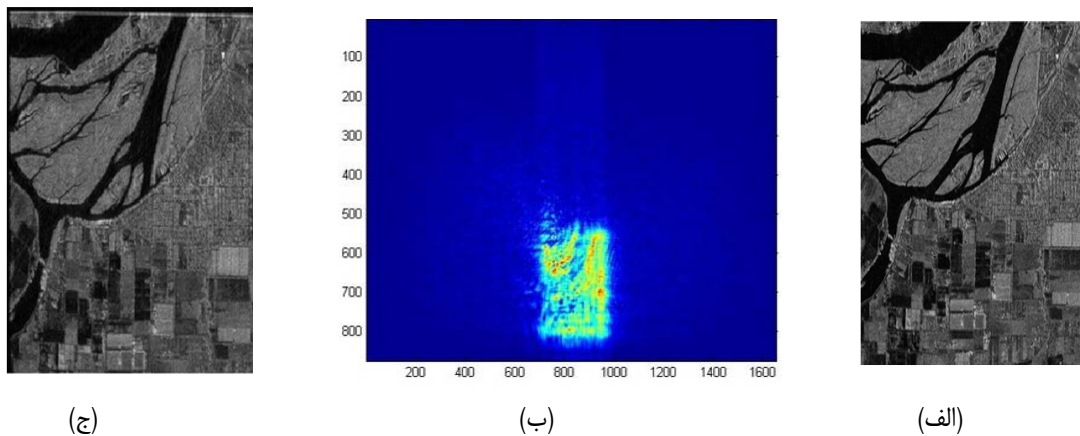


(ب)

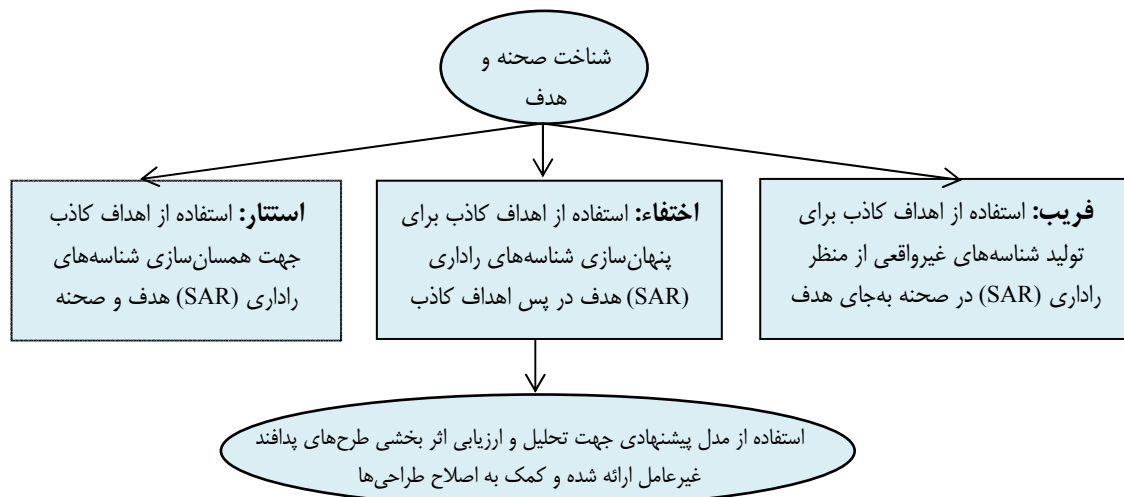


(ج)

شکل ۱۶- الف) ماتریس $g(t, \eta)$ ، ب) دیتای خام شبیه‌سازی شده ج) خروجی الگوریتم RDA (در هر سه شکل محور افقی محور برد و محور عمودی محور سمت است)



شکل ۱۷- الف) ماتریس $(g(t, \eta))$ (ب) دیتای خام شبیه سازی شده، ج) خروجی الگوریتم RDA- (در هر سه شکل محور افقی محور برد و محور عمودی محور سمت است).



شکل ۱۸- استفاده از مدل پیشنهادی در مقاله جهت کمک به اهداف پدافند غیرعامل در برابر سامانه های تصاویر راداری SAR

[7] Donghoa, Z. and Xiaoling, Z., Downward-Looking 3-D Linear Array SAR Imaging Based on Chirp Scaling Algorithm, *Synthetic Aperture Radar IEEE*, Asian-Pacific Conference Xian, 2009, pp.1043-1046.

[8] Du, L. and et al, "A Three-Dimensional Range Migration Algorithm for Downward-Looking 3D-SAR with Single-Transmitting and Multiple-Receiving Linear Array Antennas," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2010, No. 11, 2010, pp.1-15.

[9] Perna, S., *Airborne Synthetic Aperture Radar Models, Focusing and Experiments*, (M.Sc. Thesis), Federico II University, 2004-2005.

[10] Lee, Y. and et al, "A Study on Jamming Performance Evaluation of Noise and Deception Jammer Against SAR Satellite," *IEEE International Conference on Synthetic Aperture Radar*, Seoul, 2011, pp.1-3.

مراجع

[1] Schowengerdt, R. A., *Remote Sensing Models and Methods for Image Processing*, 3rd Edition, Elsevier, New York, 2007.

[2] Richards, J. A., *Remote Sensing with Imaging Radar*, 1st Edition, Springer, New York, 2009.

[3] Bhattacharya, S. and et al, "Fast Encoding of Synthetic Aperture Radar Raw Data Using Compressed Sensing," *Statistical Signal Processing IEEE*, USA, 2007, pp.448-452.

[4] Doring, B. J. and et al, "Reference Target Correction Based on Point Target SAR Simulation," *IEEE Transaction on Geosciences and Remote sensing*, Vol.50, No.3, 2012, pp.951-959.

[5] Cumming, I. G. and Wong, F. H., *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation*, Artech House: London, 2005.

[6] Maitre, H., *Processing of Synthetic Aperture Radar Images*, 4th Edition, Wiley, New York, 2008.