

شبیه‌ساز سریع داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری نواری با رادار دهانه ترکیبی

میثم محمدی^{۱*}، علی‌مراد محمودی^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت: ۹۴/۰۴/۳۱؛ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۱)

چکیده

دسترسی به یک مولد سریع داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری با رادار دهانه ترکیبی^۱ (SAR)، به‌ویژه در کاربردهای مربوط به آشکارسازی هدف متحرک زمینی^۲ (GMTI)، از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله، با ترکیب حوزه زمان و فرکانس، یک الگوریتم سریع برای تولید داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری نواری^۳ با این رادار، ارائه شده است. با استفاده از این شبیه‌ساز، در شرایط مختلف از نظر سرعت، شتاب و جهت حرکت هدف، داده خام رادار تولید شده و با بهره‌گیری از الگوریتم بُرد- داپلر^۴ (RDA)، تصویر نهایی آن استخراج شده است. سپس، تصاویر به‌دست‌آمده، با بهره‌گیری از روابط استخراج شده برای پیش‌بینی اثر پارامترهای حرکت هدف بر تصاویر رادار، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شبیه‌ساز پیشنهادی، از لحاظ سرعت تولید داده خام، نسبت به سایر شبیه‌سازهای موجود از عملکرد بهتری برخوردار است.

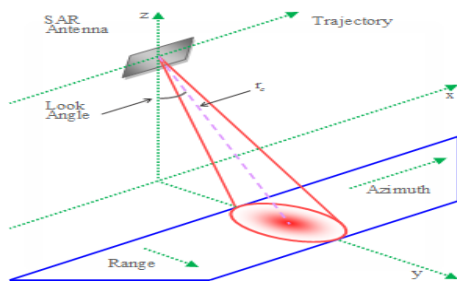
واژگان کلیدی

داده خام، رادار دهانه ترکیبی، تصویربرداری نواری، اهداف متحرک، الگوریتم بُرد- داپلر

۱. مقدمه

GMTI را می‌توان با مدل کردن و شبیه‌سازی کل سیستم تصویربرداری مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد [۱۳].

در زمینه تولید داده خام کلاتر و اهداف ساکن، برای سیستم‌های راداری هواپایه و فضاپایه و در کاربردها و با هندسه تصویربرداری مختلف، شبیه‌سازهایی ارائه شده است [۲۳-۱۴]؛ اما به ندرت اهداف متحرک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف از این پژوهش، دستیابی به شبیه‌ساز سریع داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری نواری با رادار دهانه ترکیبی است. در تصویربرداری نواری، آنتن رادار نسبت به سکوی حامل آن، فقط به یک جهت ثابت اشاره می‌کند و با حرکت این سکو در سمت (در جهت x)، عملیات تصویربرداری اجرا می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱. تصویربرداری نواری با رادار دهانه ترکیبی

SAR یک تکنیک قدرتمند در سنجش از دور به‌صورت فعال است که در آن، از حرکت رو به جلوی آنتن رادار برای تشکیل یک آنتن بسیار بزرگ استفاده می‌شود [۱] و با پردازش انعکاس‌های سیگنال ارسالی، تصاویری از سطح زمین به‌دست می‌آید [۲]. این تکنیک، در طول روز و شب و در شرایط آب و هوایی مختلف قادر به فعالیت است [۳-۵].

SAR، اساساً برای تصویربرداری از سطح زمین و اشیای زمینی ساکن توسط تکنولوژی راداری هواپایه طراحی شده است [۶]؛ اما از مدت‌ها پیش، تمایل زیادی برای توسعه آن جهت استفاده در آشکارسازی هدف متحرک زمینی، به منظور کنترل ترافیک شهری یا عملیات نظامی وجود داشته است [۹-۷]. از این رو، در یک دهه اخیر SAR-GMTI از توجه زیادی برخوردار گردید و به‌صورت گسترده‌ای مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت [۱۱-۱۰].

به‌منظور پژوهش در زمینه SAR-GMTI، دسترسی به داده اهداف متحرک ضرورت دارد؛ اما در بسیاری از موارد، دستیابی به تجهیزات راداری یا یک حوزه وسیع از داده‌های آن امکان‌پذیر نیست یا از لحاظ زمان و هزینه به صرفه نیست [۱۲]. بنابراین، بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی اجتناب‌ناپذیر است. قابلیت سیستم

* رایانامه نویسنده پاسخگو: me-mohammadi@mscstu.scu.ac.ir

با این هندسه تصویربرداری، دوگان و کارتال^۱ در [۲] روشی را

¹ Dogan & Kartal

۲. سیگنال برگشتی از هدف متحرک

داده خام دوبعدی گسسته SAR را می‌توان به صورت ماتریسی برد نظر گرفت که هر ستون از آن، شامل یک ردیف از سلول‌های بُرد به‌ازای یک سلول سمت متمایز است. هر ردیف، حاصل دریافت انعکاس تک‌پالس FM^۶ ارسالی از همه نقاط متناظر با آن ردیف بر روی زمین است [۱]. این پالس به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

$$S_{TX}(t) = W_r(t) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi k_r t^2) \quad (1)$$

که در آن، S_{TX} سیگنال ارسالی، W_r یک تابع مستطیلی به طول τ_p ، f_0 فرکانس حامل، k_r نرخ چیرپ و t زمان بُرد (زمان تُند) است. ارسال این سیگنال، در یک بازه زمانی به طول PRI^۷ تکرار می‌گردد؛ معکوس PRI^۸، PRF^۹ نامیده می‌شود. در فاصله زمانی بین ارسال دو پالس، فرستنده غیرفعال است و گیرنده رادار انعکاس‌های پالس ارسالی را دریافت می‌کند. سیگنال برگشتی از یک هدف نقطه‌ای، در حالت ایده‌آل، یک نمونه تأخیر یافته و تضعیف شده از پالس ارسالی است و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$s_{RX}(t) = A \cdot s_{TX}(t - \frac{2r}{c}) \quad (2)$$

که در آن، A ضریب تضعیف و r فاصله هدف تا مرکز فاز آنتن رادار است. پس صرف نظر از ساکن یا متحرک بودن هدف، رابطه سیگنال خام برگشتی از آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S_{RX}(t) = A W_r(t - \frac{2r}{c}) \exp(j2\pi f_0(t - \frac{2r}{c}) + j\pi k_r(t - \frac{2r}{c})^2) \quad (3)$$

سیگنال دریافتی با بهره‌گیری از دی‌مدولاسیون متعامد^{۱۰}، به‌طور همدوس^{۱۰} به باند پایه انتقال می‌یابد و یک سیگنال مختلط به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$S_{RX_{Base}}(t) = A W_r(t - \frac{2r}{c}) \exp(-j4\pi f_0 \frac{r}{c} + j\pi k_r(t - \frac{2r}{c})^2) \quad (4)$$

تا زمانی که هدف در محدوده دهانه ترکیبی رادار قرار داشته باشد، انعکاس پالس ارسالی از آن دریافت می‌شود. پس در داده خام SAR، تصویر هدف در موقعیت‌های متفاوتی در راستای مسیر پرواز سکوی حامل رادار ظاهر می‌شود و نیز، در زمان‌های متفاوت، فاصله هدف تا سنسور رادار به‌ازای انعکاس‌های مختلف از آن، متمایز خواهد بود؛ این فاصله، تعیین‌کننده مختصات

برای بهره‌گیری از حوزه فرکانس پیشنهاد نمودند که در آن، تبدیل فوریه گسسته^۱ (DFT) دوبعدی الگوی انعکاس هر هدف ثابت و متحرک محاسبه شده و ضمن جبران تفاوت نرخ چیرپ^۲ به‌ازای فواصل متفاوت از مرکز فاز رادار، در طیف دوبعدی داده خام هدف ضرب می‌شود و پس از برگرداندن به حوزه زمان، به داده خام کل تصویر افزوده می‌شود. جهت کاهش بیش‌تر زمان تولید داده خام اهداف متحرک، در [۱۳] یانگ^۳ و همکاران مدلی را ارائه دادند که در آن، سطح مورد تصویربرداری به صورت چند سطح مجزا با اهدافی با پارامترهای حرکت (سرعت، شتاب و جهت حرکت) یکسان در نظر گرفته می‌شود، سپس، مشابه روش دوگان - کارتال، داده خام مربوط به هر سطح تولید می‌شود و در نهایت، با ترکیب داده به دست آمده از سطوح مختلف، داده خام سطح اصلی به دست می‌آید. الگوریتم یانگ، بایستی نسبت به الگوریتم پیشین، به زمان پردازش کم‌تری منجر شود؛ اما اهداف متحرک در صحنه تصویربرداری به ندرت دارای پارامترهای حرکت یکسان هستند.

در این مقاله، در حوزه ترکیبی زمان - فرکانس، الگوریتمی برای تولید سریع داده خام اهداف متحرک، ارائه شده و در شرایط مختلف از نظر پارامترهای حرکت، داده خام آن تولید و با بهره‌گیری از الگوریتم RDA، تصویر نهایی SAR از آن استخراج شده است. صحت تصاویر به دست آمده، با بهره‌گیری از روابط استخراج شده برای پیش‌بینی اثر حرکت هدف بر تصویر نهایی SAR، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، بیان‌گر برتری این الگوریتم نسبت به روش‌های پیشین است.

ساختار مقاله به این شرح است: در مرحله اول، رابطه سیگنال برگشتی از هدف نقطه‌ای متحرک مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از آن، رابطه جابه‌جایی در سلول‌های بُرد^۴ (RCM) و پیشینه داپلر^۵ اهداف متحرک، استخراج شده و روابطی برای پیش‌بینی اثر حرکت هدف بر تصاویر SAR ارائه شده است. در بخش بعد، با ترکیب حوزه زمان و فرکانس، الگوریتمی چهار مرحله‌ای برای تولید داده خام پیشنهاد شده است. سپس، زمان سپری شده برای شبیه‌سازی با الگوریتم ارائه شده، با پژوهش‌های پیشین مقایسه شده و نیز تصویر نهایی آن استخراج و بررسی شده است و بخش آخر، حاوی نتایج به دست آمده از مطالعه این تصاویر با روابط به دست آمده برای پیش‌بینی اثر حرکت هدف می‌باشد.

⁶ Frequency Modulation

⁷ Pulse Repetition Interval

⁸ Pulse Repetition Frequency

⁹ Quadrature

¹⁰ Coherent

¹ Discrete Fourier Transform

² Chirp

³ Yang

⁴ Range Cell Migration

⁵ Doppler History

به دلیل وابستگی فاز این سیگنال به مقدار r ، انعکاس‌های مختلف از هدف فازهای متفاوتی خواهند داشت. دنباله این تأخیر فازها، پیشینه داپلر هدف نامیده می‌شود [۲۵].

در رابطه (۸)، مقدار متغیر A به ضریب انعکاس هدف و الگوی پرتوی فرستنده و گیرنده بستگی دارد. در [۲۶]، الگوی پرتوی به صورت $\text{sinc}(l\theta/\lambda)$ در نظر گرفته شده است. پس با فرض الگوی پرتوی یکسان در ارسال و دریافت، مقدار متغیر A از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$A = F \cdot \text{sinc}^2(l\theta/\lambda) \quad (۹)$$

در این رابطه، ضریب انعکاس F مقداری بین صفر تا یک دارد. l طول واقعی آنتن و λ طول موج را نشان می‌دهد و مقدار θ بیان‌گر زاویه بین موقعیت هدف و محور دید پرتوی آنتن است و با فرض زاویه دید کم، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta = \arctan\left(\frac{|(v_p\eta, y_c) - (x, y)|}{r_c}\right) = \arctan(\quad (۱۰)$$

$$\frac{\sqrt{((v_p - v_x)\eta - 0.5a_x\eta^2)^2 + ((y_c - y_0) - v_y\eta - 0.5a_y\eta^2)^2}}{r_c}$$

در این رابطه، y_c موقعیت مرکز پرتو در بُرد و r_c فاصله مرکز فاز آنتن از این نقطه است و با جایگزینی آن در روابط ۸ و ۹، رابطه سیگنال برگشتی از هدف متحرک به صورت تابعی از بُرد و سمت به دست می‌آید. با بهره‌گیری از این رابطه می‌توان داده خام دوبعدی SAR را تشکیل داد. این داده در سمت با فرکانس PRF گسسته، اما در بُرد پیوسته است؛ پس به منظور ذخیره‌سازی و پردازش آن، نمونه‌برداری از سیگنال‌های بُرد ضرورت دارد. حداقل فرکانس نمونه‌برداری، برای سیگنال FM خطی مختلط برابر پهنای باند پالس ارسالی انتخاب می‌شود [۲۶]. با این مقدار، در SAR می‌توان به رزولوشن بُرد c/B دست یافت و مقدار پهنای باند B برابر است با $|k_r| \tau_p$.

استفاده مستقیم از رابطه سیگنال برگشتی از هدف متحرک برای تولید داده خام آن، سبب افزایش زمان شبیه‌سازی می‌شود؛ اما با بررسی این سیگنال، می‌توان روش بهتری را به این منظور ارائه داد.

رابطه سیگنال برگشتی از هدف متحرک، از دو جزء اصلی زیر تشکیل شده است:

$$S_r(t) = w_r(t) \exp(j\pi k_r t^2) \quad (۱۱)$$

هدف در راستای بُرد است و هر چه مقدار آن بیش‌تر باشد، مختصات هدف دورتر خواهد بود. پس با دورتر شدن مرکز پرتوی^۱ رادار از هدف، تصویر آن در داده خام SAR دچار RCM می‌شود. از این رو، لازم است که رابطه ۴ برای هر انعکاس سیگنال از هدف به صورت مستقل تعریف شود و راه حل آن، محاسبه اختصاصی مقدار r است.

به منظور محاسبه مقدار r برای یک هدف متحرک، می‌توان به این ترتیب عمل کرد: اگر (x_0, y_0, z_0) به عنوان موقعیت مکانی اولیه هدف متحرک در نظر گرفته شود، با فرض شتاب ثابت و عدم حرکت هدف در راستای z_0 ، موقعیت آن در لحظه η (زمان سمت) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$(x, y, z) = (x_0 + v_x\eta + 0.5a_x\eta^2, y_0 + v_y\eta + 0.5a_y\eta^2, z_0) \quad (۵)$$

که در آن، x و y و z به ترتیب بیان‌گر موقعیت هدف در راستای سمت، بُرد و ارتفاع می‌باشد و سرعت و شتاب حرکت در راستای x و y با متغیرهای v_x, v_y و a_x, a_y نشان داده می‌شود. به طور مشابه، با فرض حرکت آنتن با سرعت ثابت v_p در سمت و عدم حرکت آن در بُرد، موقعیت مرکز فاز آنتن در لحظه η به صورت $(x_p + v_p\eta, y_p, z_p)$ بیان می‌شود که در آن، (x_p, y_p, z_p) مختصات آنتن در لحظه صفر را نشان می‌دهد. از این رو، رابطه فاصله لحظه‌ای هدف متحرک تا مرکز فاز آنتن رادار، به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$r_m(\eta) = |(x_p + v_p\eta, y_p, z_p) - (x_0 + v_x\eta + 0.5a_x\eta^2, y_0 + v_y\eta + 0.5a_y\eta^2, z_0)| = ((x_0 + v_x\eta + 0.5a_x\eta^2 - x_p - v_p\eta)^2 + (y_0 + v_y\eta + 0.5a_y\eta^2 - y_p)^2 + (z_0 - z_p)^2)^{0.5} \quad (۶)$$

طبق هندسه تصویربرداری SAR، مقدار y_p برابر صفر است و بدون هیچ خللی در کلیت مسئله، می‌توان مقدار x_p را هم برابر صفر در نظر گرفت [۲۴] و با این فرض که هدف در لحظه صفر، از نظر سمت در مرکز پرتوی آنتن قرار گیرد ($x_0 = x_p, y_0 \neq y_p$) می‌توان نوشت:

$$r_m = \sqrt{((v_x - v_p)\eta + 0.5a_x\eta^2)^2 + (y_0 + v_y\eta + 0.5a_y\eta^2)^2 + h^2} \quad (۷)$$

که در آن، مقدار h برابر است با فاصله عمودی آنتن تا سطح زمین. از این رو، می‌توان رابطه سیگنال دریافتی از یک هدف نقطه‌ای متحرک را در دو بعد به صورت زیر نوشت:

$$s_{RX_{base}}(t, \eta) = AW_r(t - \frac{2r_m(\eta)}{c}) \exp(\dots - j4\pi f_0 \frac{r_m(\eta)}{c} + j\pi k_r (t - \frac{2r_m(\eta)}{c})^2) \quad (۸)$$

^۲ Look Angle

^۱ Beam

زمان داپلر صفر است.

رابطه ۱۳ برای یک هدف ساکن ($v_x, v_y, a_x, a_y = 0$)، به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$r = r_0 + \frac{v_p^2 \eta^2}{2r_0} \quad (15)$$

بنابراین، مقدار RCM برای یک هدف نقطه‌ای ساکن طبق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta r = r - r_0 = \frac{v_p^2 \eta^2}{2r_0} \quad (16)$$

در حالی که، مقدار آن در مورد یک هدف متحرک از رابطه ۱۷ تبعیت خواهد نمود:

$$\Delta r_m = \frac{y_0 v_y}{r_0} \eta + \frac{1}{2r_0} \{ (v_x - v_p)^2 + v_y^2 (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) + y_0 a_y \} \eta^2 + \frac{1}{2r_0} \{ a_x (v_x - v_p) + v_y a_y (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) \} \eta^3. \quad (17)$$

همچنین، با مشتق‌گیری از فاز سیگنال سمت (رابطه ۱۲) نسبت به زمان، فرکانس سمت (داپلر) برای یک هدف متحرک به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \eta} (-4\pi f_0 \frac{r_m(\eta)}{c}) = -\frac{2}{\lambda} \frac{\partial}{\partial \eta} r_m(\eta) = -\frac{2y_0 v_y}{\lambda r_0} - \frac{2}{\lambda r_0} \{ (v_x - v_p)^2 + v_y^2 (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) + y_0 a_y \} \eta - \frac{3}{\lambda r_0} \{ a_x (v_x - v_p) + v_y a_y (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) \} \eta^2. \quad (18)$$

و برای یک هدف ساکن، مقدار فرکانس داپلر از رابطه ۱۹ به دست می‌آید:

$$f_a = -\frac{2v_p^2}{\lambda r_0} \eta \quad (19)$$

پس با تقریب در نظر گرفته شده در محاسبه مقدار r ، رابطه‌ای خطی بین زمان و فرکانس سمت هدف ساکن حاصل می‌گردد و با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۹، می‌توان مقدار RCM در حوزه بُرد-داپلر را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\Delta r_{dop} = \frac{\lambda^2 r_0 f_a^2}{8v_p^2} \quad (20)$$

در حالی که، بین فرکانس داپلر و زمان سمت سیگنال برگشتی از هدف متحرک رابطه‌ای غیر خطی وجود دارد.

با بهره‌گیری از روابط ۱۶ تا ۱۹، می‌توان تأثیر پارامترهای حرکت هدف را بر تصویر نهایی SAR مورد بررسی قرار داد. با استفاده از این روابط، نمودار پیشینه داپلر و RCM در شرایط مختلف، رسم و مطالعه شده است. نتایج به دست آمده به این شرح می‌باشد: در صورتی که هدف با سرعت ثابت در سمت (هم‌جهت با SAR)

$$S_a(\eta) = \exp(-j4\pi f_0 \frac{r_m(\eta)}{c}) \quad (12)$$

$S_r(f)$ سیگنال بُرد نامیده می‌شود. نحوه انعکاس سیگنال ارسالی از هدف در بُرد، بدون در نظر گرفتن اثر RCM، در باند پایه، مشابه کانولوشن این سیگنال با بردارهای ضرایب انعکاس بُرد است [۱۲]. $S_a(\eta)$ سیگنال سمت نامیده می‌شود. نحوه دریافت سیگنال برگشتی از اهداف نقطه‌ای در طول دهانه ترکیبی، مشابه کانولوشن این سیگنال با بردارهای ضرایب انعکاس سمت است. از این دو سیگنال می‌توان برای تولید سریع تر داده خام رادار استفاده کرد.

صرف نظر از شبیه‌ساز مورد استفاده، پس از حصول داده خام گسسته SAR، مراحل پردازش سیگنال بر روی آن اجرا می‌گردد تا تصویر نهایی SAR به دست آید. طی مراحل استخراج تصویر نهایی SAR از سیگنال خام آن، کل صحنه تصویربرداری به صورت ساکن فرض می‌شود؛ اما به دلیل تفاوت سیگنال سمت و مقدار RCM در اهداف متحرک و ساکن، شکل آن دو در تصویر نهایی SAR به صورت متفاوتی ظاهر می‌شود.

۳. تأثیر حرکت هدف بر تصویر SAR

تفاوت عمده بین اهداف متحرک و ثابت، در موقعیت آن نسبت به سکوی حامل رادار است که متناسب با پارامترهای حرکت هدف، در طول زمان تغییر می‌کند. بنابراین، فاصله لحظه‌ای هدف متحرک تا مرکز فاز آنتن رادار، علاوه بر زمان، تابع پارامترهای حرکت هدف نیز خواهد بود. با توجه به رابطه ۸، مقدار فاز سیگنال سمت و نیز، مقدار تأخیر زمانی $2r_m(\eta)/c$ در دریافت سیگنال برگشتی از هدف، به مقدار r بستگی دارد. پس مقدار این دو متغیر و از این رو، پیشینه داپلر و مقدار RCM برای اهداف متحرک و ساکن متفاوت خواهد بود.

با فرض زاویه لوجی^۱ (زاویه بین r و r_0) کم، می‌توان با بسط تیلور مرتبه ۳ حول $\eta = 0$ ، رابطه ۷ را به صورت زیر تقریب زد:

$$r_m = r_0 + \frac{y_0 v_y}{r_0} \eta + \frac{1}{2r_0} \{ (v_x - v_p)^2 + v_y^2 (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) + y_0 a_y \} \eta^2 + \frac{1}{2r_0} \{ a_x (v_x - v_p) + v_y a_y (1 - \frac{y_0^2}{r_0^2}) \} \eta^3. \quad (13)$$

در این رابطه، r_0 نزدیک‌ترین فاصله هدف تا مرکز فاز آنتن است و از رابطه ۱۴ حاصل می‌شود:

$$r_0 = \sqrt{h^2 + y_0^2} \quad (14)$$

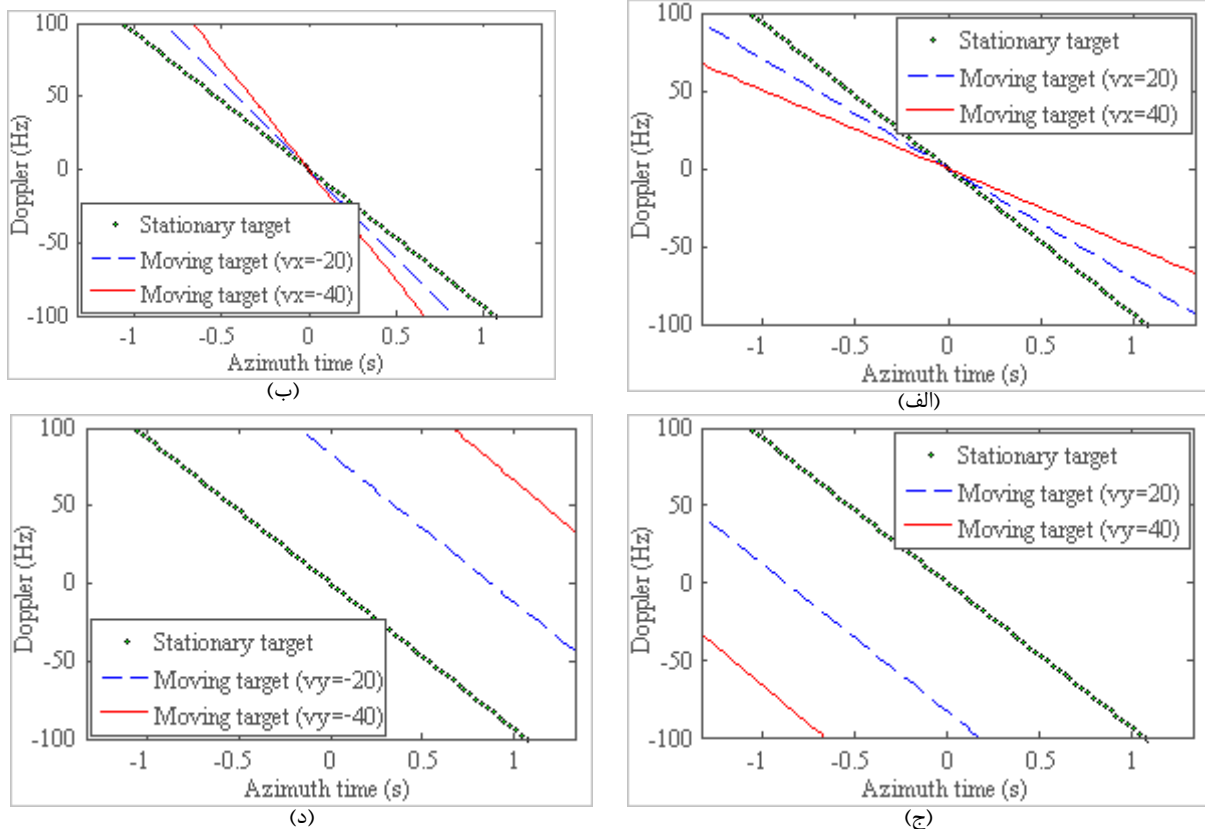
این حالت زمانی روی می‌دهد که حین جابه‌جایی SAR در راستای x ، مرکز فاز آنتن آن بر روی هدف قرار گیرد. این لحظه،

¹ Squint

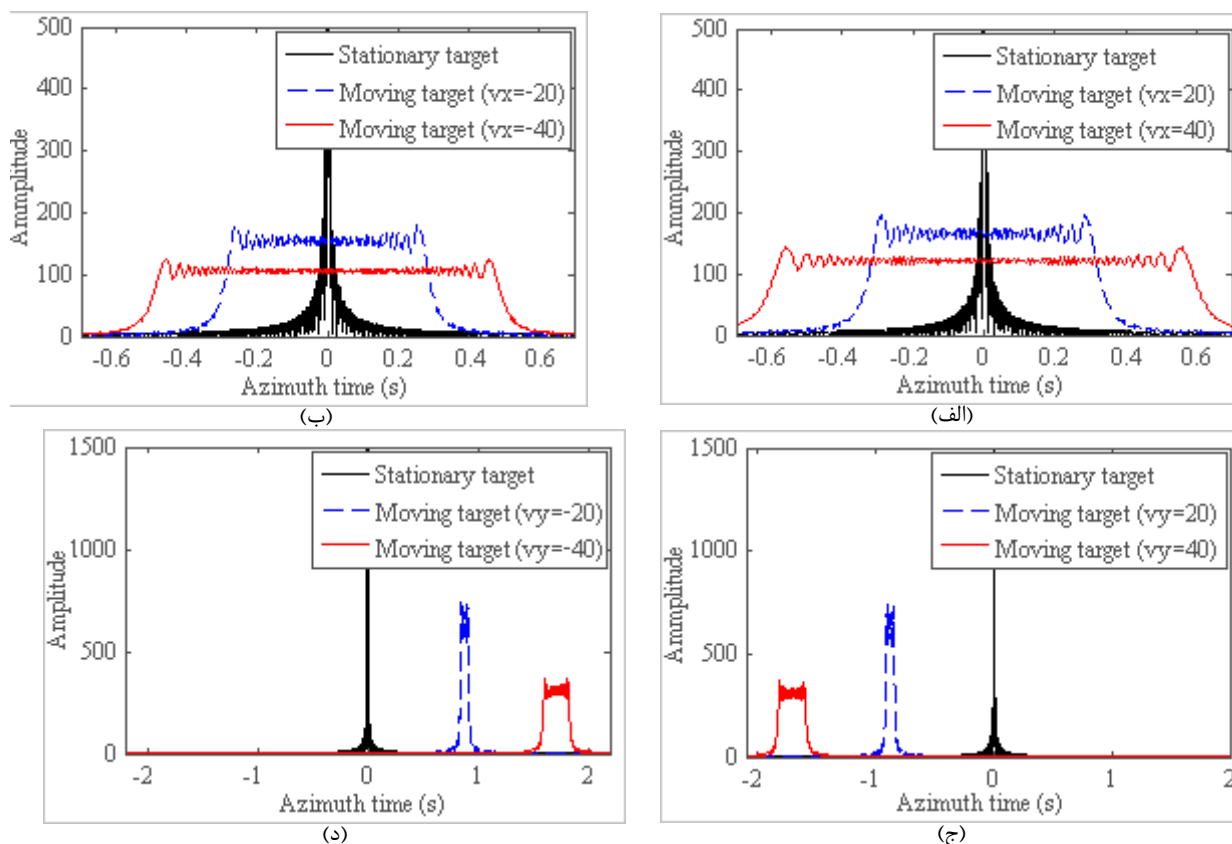
تصویر نهایی SAR، علاوه بر عدم تمرکز در سمت و افت دامنه، دچار RCM اضافی نیز خواهد بود. با حرکت هدف در جهت حرکت SAR، RCM اضافی در بُرد (دور شونده از SAR) و با حرکت هدف در خلاف آن، این پدیده در بُرد (نزدیک شونده به SAR) ظاهر می‌شود. در صورتی که هدف با سرعت ثابت در بُرد حرکت کند، در مقایسه با حرکت آن در سمت، شیب منحنی داپلر و دامنه نمودار RCM تغییر چندانی نمی‌کند؛ اما این نمودار در سمت و اندکی نیز در بُرد جابه‌جا می‌شود (شکل ۲-ج و د) و شکل ۳-ج و د)). پس در تصویر نهایی، شدت عدم تمرکز شکل ۴-ج و د) و RCM اضافی هدف کم‌تر خواهد بود؛ اما، تصویر آن در سمت و بُرد جابه‌جا می‌شود. با حرکت هدف در بُرد (دور شونده از SAR)، تصویر آن در خلاف جهت حرکت SAR و اندکی در بُرد جابه‌جا می‌شود و با حرکت آن در بُرد (نزدیک شونده به SAR)، این جابه‌جایی در سمت و برد (نزدیک شونده به SAR) روی می‌دهد و هر چه سرعت هدف بیشتر باشد، شدت این دو پدیده نیز بیشتر خواهد بود.

حرکت کند، در مقایسه با اهداف ساکن، شیب منحنی داپلر به‌طور چشم‌گیری افت می‌کند؛ اما، در صورت حرکت آن با همان سرعت در خلاف جهت حرکت SAR، شیب این منحنی به همان مقدار افزایش می‌یابد (شکل ۲-الف و ب). طی فرآیند استخراج تصویر از داده خام SAR، فیلتر منطبقی که به‌منظور فشرده‌سازی سیگنال سمت به‌کار گرفته می‌شود، با شیب نمودار داپلر اهداف ساکن مطابقت دارد. پس با حرکت هدف، چه در جهت حرکت SAR و چه در خلاف آن، تصویر نهایی هدف، در سمت دچار عدم تمرکز می‌شود و دامنه آن افت می‌کند و هر چه سرعت هدف بیشتر باشد، شدت این دو پدیده نیز بیشتر خواهد بود (شکل ۳-الف و ب).

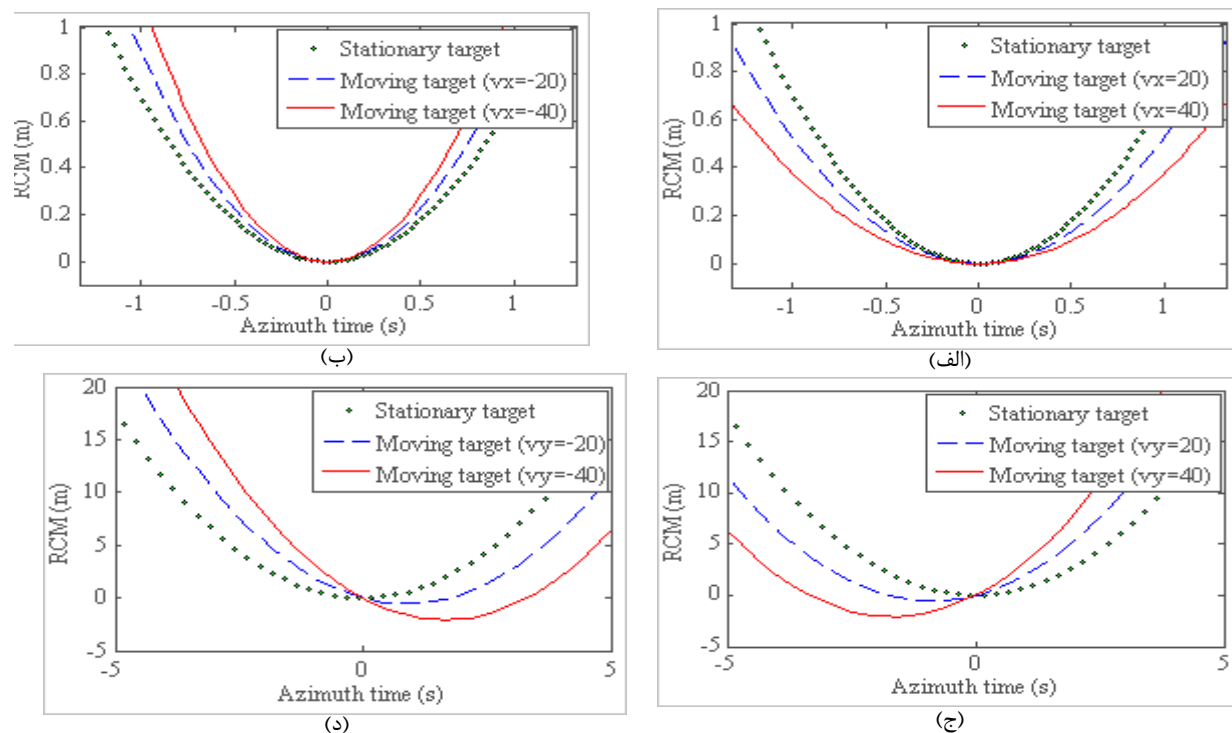
طی مرحله اصلاح RCM نیز، کل صحنه تصویربرداری به‌صورت ساکن فرض می‌شود؛ درحالی‌که، دامنه نمودار RCM برای هدفی که در جهت حرکت SAR یا خلاف آن حرکت می‌کند، با اهداف ساکن تفاوت دارد (شکل ۴-الف و ب). بنابراین، شکل آن در



شکل ۲. تأثیر سرعت و جهت حرکت هدف بر پیشینه داپلر: الف) سرعت در سمت (هم‌جهت با SAR) ب) سرعت در سمت (در خلاف جهت حرکت SAR) ج) سرعت در بُرد (دور شونده از SAR) د) سرعت در بُرد (نزدیک شونده به SAR)



شکل ۳. تأثیر سرعت و جهت حرکت هدف بر تمرکز تصویر آن در سمت: الف) سرعت در سمت (هم‌جهت با SAR) ب) سرعت در سمت (در خلاف جهت حرکت SAR) ج) سرعت در بُرد (دور شونده از SAR) د) سرعت در بُرد (نزدیک شونده به SAR)



شکل ۴. تأثیر سرعت و جهت حرکت هدف بر مقدار RCM الف تا د) مشابه شکل قبل.

۴. الگوریتم پیشنهادی برای تولید داده خام

در این مقاله، با ترکیب حوزه زمان و فرکانس، یک الگوریتم چهارمرحله‌ای برای تولید داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری نواری با SAR پیشنهاد شده است. مراحل این الگوریتم عبارتند از: عدم تمرکز هدف در سمت در حوزه زمان، پرتودهی در حوزه بُرد- زمان، انتقال در سلول‌های بُرد در حوزه بُرد- زمان و عدم تمرکز هدف در بُرد در حوزه فرکانس.

۴-۱. عدم تمرکز هدف در سمت در حوزه زمان

در مرحله اول، با توجه به موقعیت و پارامترهای هر هدف متحرک، سیگنال سمت آن در حوزه زمان با بهره‌گیری از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود. به این منظور، طبق رابطه ۷، فاصله لحظه‌ای هدف متحرک تا مرکز فاز SAR در بازه زمانی دیده شدن هدف توسط رادار، محاسبه و به صورت یک بردار ذخیره می‌شود. این بازه زمانی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هدف متحرک در محدوده بُرد و سمت و در بازه دهانه ترکیبی رادار قرار گیرد و نیز، سکوی حامل رادار از محدوده سمت خارج نشود. این چهار شرط را می‌توان به ترتیب به صورت روابط زیر خلاصه نمود:

$$\text{Condition 1: } P_r \leq y_0 + v_y \eta + 0.5a_y \eta^2 \leq N_r * P_r \quad (21)$$

$$\text{Condition 2: } P_a \leq x_0 + v_x \eta + 0.5a_x \eta^2 \leq N_a * P_a \quad (22)$$

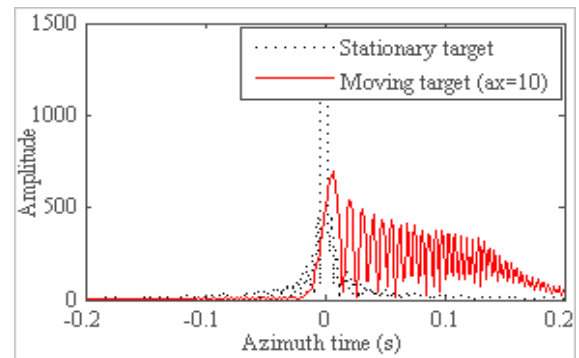
$$\text{Condition 3: } -0.5L \leq (v_p - v_x) \eta - 0.5a_x \eta^2 \leq 0.5L \quad (23)$$

$$\text{Condition 4: } P_a \leq x_0 + v_p \eta \leq N_a * P_a \quad (24)$$

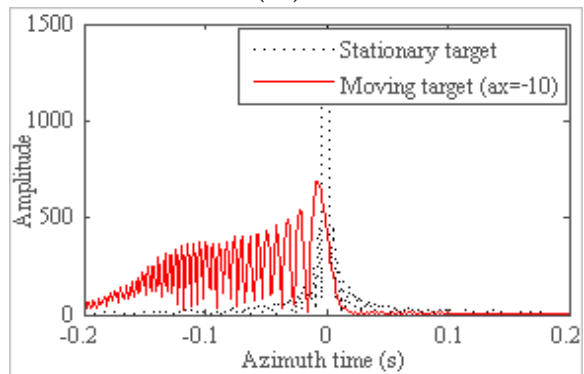
در این روابط، P_r رزولوشن بُرد، P_a رزولوشن سمت، L طول دهانه ترکیبی و N_r و N_a تعداد سلول‌های بُرد و سمت را نشان می‌دهند. با این فرض که هدف در لحظه صفر، از نظر سمت در مرکز فاز آنتن قرار گرفته باشد، بزرگ‌ترین بازه زمانی که در این چهار شرط صدق کند، به عنوان بازه مطلوب (η_-, η_+) انتخاب می‌شود و در این محدوده زمانی، از لحظه $\eta = 0$ با فواصل زمانی $1/PRF$ بردار r_m محاسبه و ذخیره می‌شود و متناسب با آن، بردار سیگنال سمت هدف متحرک به صورت گسسته به دست می‌آید.

۴-۲. پرتودهی در حوزه بُرد- زمان

در این مرحله، با بهره‌گیری از رابطه ۹ و ۱۰، مقدار متغیر A به صورت یک بردار در بازه زمانی (η_-, η_+) محاسبه و به منظور اثردهی آن بر انعکاس‌های هدف، در بردار سیگنال سمت هدف متحرک ضرب داخلی می‌شود.



(الف)



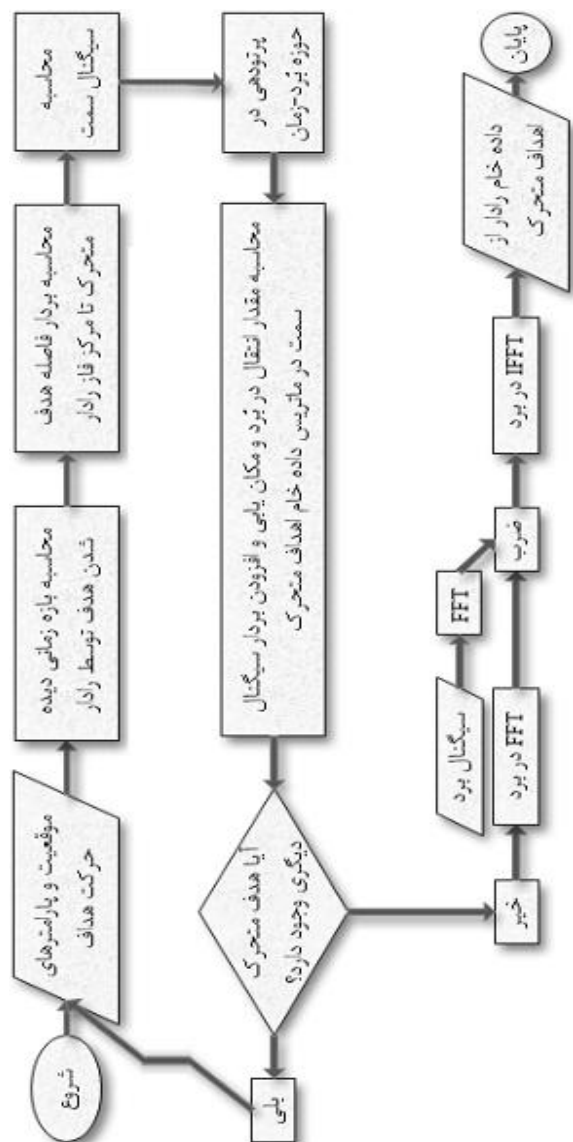
(ب)

شکل ۵. تأثیر شتاب هدف در سمت بر تمرکز تصویر آن در سمت (الف) شتاب در سمت (هم‌جهت با SAR) (ب) شتاب در سمت (در خلاف جهت حرکت SAR)

تأثیر شتاب حرکت هدف در بُرد، مشابه اثر حرکت آن با سرعت ثابت در سمت است و شتاب در سمت، سبب بدشکلی پیشینه داپلر می‌شود که عدم تقارن سیگنال فشرده شده هدف متحرک در سمت و افت دامنه آن را در پی دارد (شکل ۵). پارامترهای شبیه‌سازی طبق جدول زیر است:

جدول ۱. مقدار پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار پارامتر
y_0	1000
x_0	1000
f_0	10GHz
c	$3 \times 10^8 m/s$
v_p	150m/s
r_0	16Km
L	400m
PRF	800Hz
τ	1μs
B	50MHz
F	1



شکل ۷. مراحل تولید داده خام اهداف متحرک در الگوریتم پیشنهادی

در شکل ۷، مراحل الگوریتم پیشنهادی برای تولید داده خام اهداف متحرک نشان داده شده است. در این الگوریتم، در مرحله ۴، برای کانولوشن بردار ضرایب بُرد با سیگنال بُرد از حوزه فرکانس استفاده شده است؛ زیرا، مقدار این سیگنال مستقل از r است و برای تمامی اهداف یکسان می‌باشد اما سیگنال سمت به برای اهداف متفاوت، متمایز است. اهداف متحرک به‌ندرت ممکن است دارای پارامترهای حرکت و موقعیت اولیه یکسان باشند؛ بنابراین، اجرای مرحله اول در حوزه فرکانس بار محاسباتی اضافی را در پی خواهد داشت.

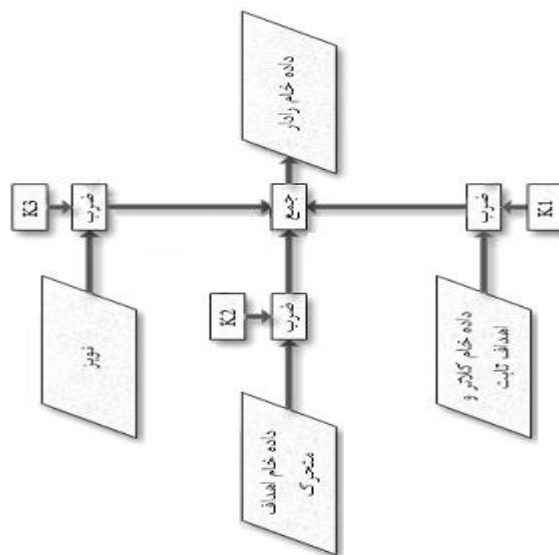
۳-۴. انتقال در سلول‌های بُرد در حوزه بُرد-زمان

مقدار RCM سیگنال هدف متحرک، با استفاده از رابطه ۱۷ در بازه زمانی (η_-, η_+) و با فواصل زمانی $1/PRF$ محاسبه می‌شود. این مقدار بر رزولوشن بُرد، تقسیم و روند می‌شود تا تعداد سلول‌های RCM حاصل گردد. با بهره‌گیری از بردار به‌دست آمده و بازه زمانی (η_-, η_+) و نیز با در نظر گرفتن موقعیت هدف در لحظه صفر، مقادیر بردار سیگنال سمت هدف، در موقعیت‌های مناسب از یک ماتریس هم‌اندازه با تصویر داده خام اهداف ثابت، اضافه می‌شود.

۴-۴. عدم تمرکز هدف در بُرد در حوزه فرکانس

در گام آخر، پس از آن که سه مرحله اول این الگوریتم برای تمامی اهداف متحرک اجرا گردید، ماتریس به‌دست آمده، به‌صورت دنباله‌هایی از سلول‌های بُرد در نظر گرفته می‌شود و هر دنباله، با سیگنال بُرد (رابطه ۱۱) کانولوشن داده می‌شود و جهت دستیابی به زمان پردازش کمتر، این عمل در حوزه فرکانس و با بهره‌گیری از تبدیل FFT اجرا می‌گردد.

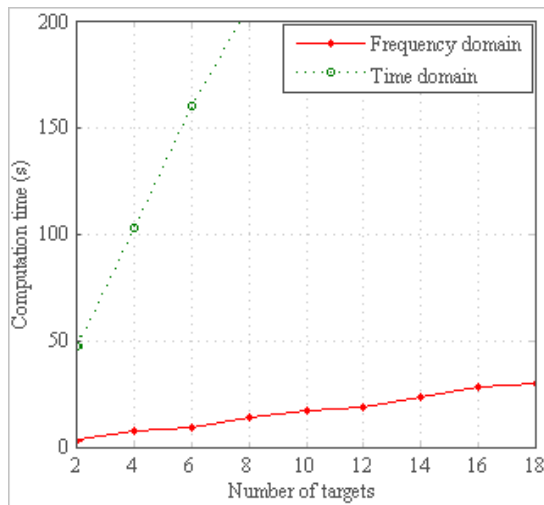
در نهایت، برای افزودن داده خام اهداف متحرک و نویز به داده خام کلاتر و اهداف ثابت، می‌توان از مدل زیر (شکل ۶) استفاده نمود:



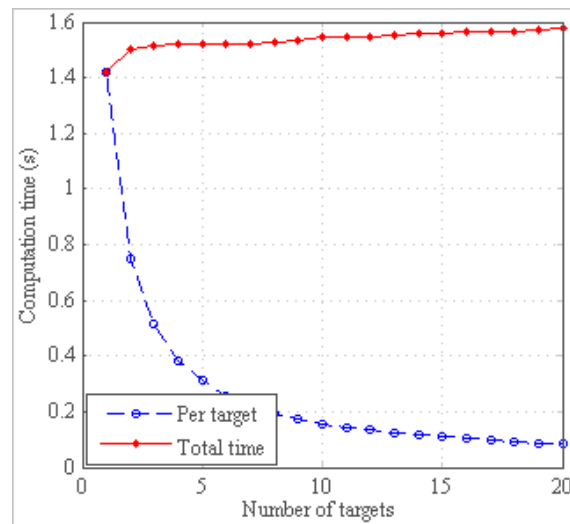
شکل ۶. ترکیب داده خام SAR از کلاتر، نویز و اهداف متحرک

در این مدل، مقدار ضرایب K_1 ، K_2 و K_3 متناسب با SNR و SCR مورد نظر انتخاب می‌شوند.

۵. مقایسه با پژوهش‌های پیشین



(ب)



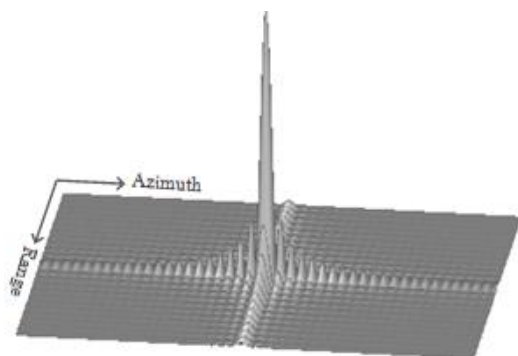
(ف)

شکل ۸. مدت زمان سپری شده برای تولید داده خام اهداف متحرک (الف) الگوریتم پیشنهادی (ب) روش دوگان-کارتال [۲]

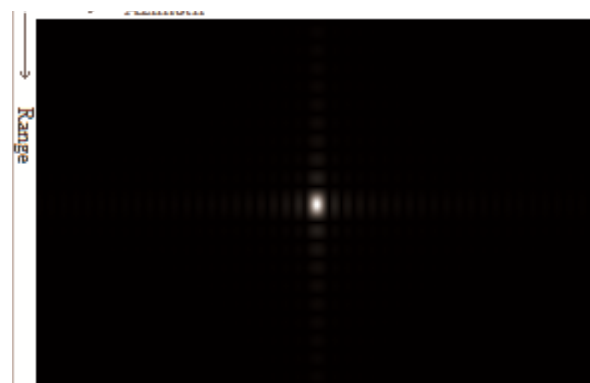
۶. نتایج شبیه‌سازی

یک معیار مناسب برای اطمینان از صحت الگوریتم ارائه شده برای تولید داده خام اهداف متحرک، بررسی تصاویر استخراج شده از داده خام به دست آمده از آن است. در این بخش، با بهره‌گیری از الگوریتم RDA تصویر نهایی SAR استخراج شده و شکل هدف با تئوری ارائه شده در بخش ۳ مقایسه شده است. نتایج به دست آمده بیان‌گر صحت الگوریتم ارائه شده می‌باشد (در هر تصویر، هدف در لحظه صفر، در مرکز تصویر قرار دارد و پارامترهای شبیه‌سازی طبق جدول ۱ است).

در شکل ۸، مدت زمان سپری شده برای تولید داده خام اهداف متحرک در الگوریتم پیشنهادی و روش دوگان-کارتال، ارائه شده است. با مقایسه شکل ۸-الف با شکل ۸-ب که در آن، زمان تولید داده خام اهداف متحرک با روش دوگان-کارتال در حوزه فرکانس با حوزه زمان مقایسه شده است، برتری الگوریتم جدید نسبت به این روش آشکار می‌گردد؛ به گونه‌ای که، در تولید داده خام ۱۸ هدف متحرک، سرعت این الگوریتم حدود ۱۸ برابر روش پیشین است و هر چه تعداد اهداف بیش‌تر شود، زمان تولید داده خام به‌ازای هر هدف، کم‌تر می‌شود.

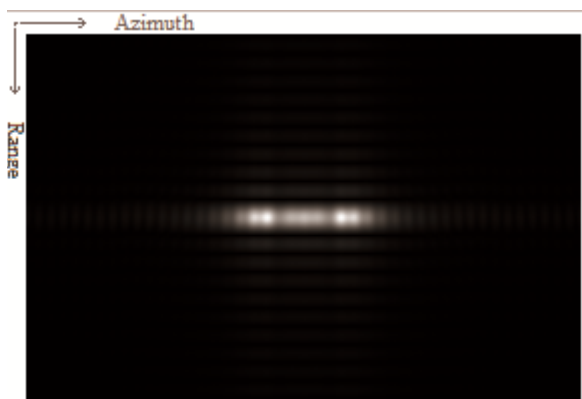


(ب)

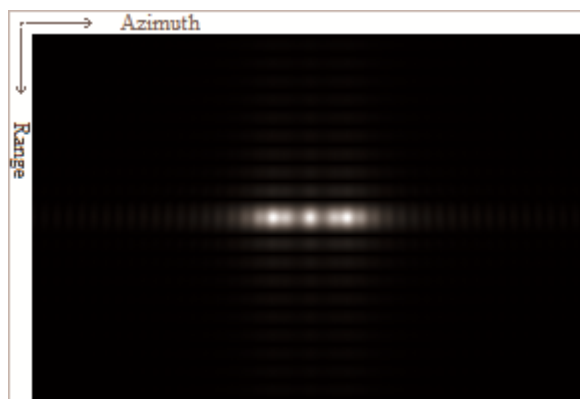


(ف)

شکل ۹. تصویر نهایی SAR از یک هدف ساکن (الف) با نمایش دوبعدی (ب) با نمایش سه‌بعدی

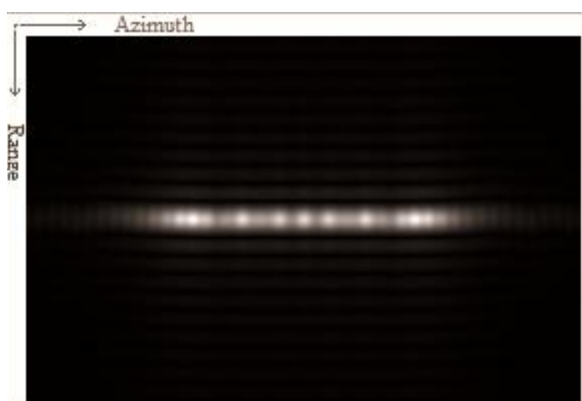


(ب)

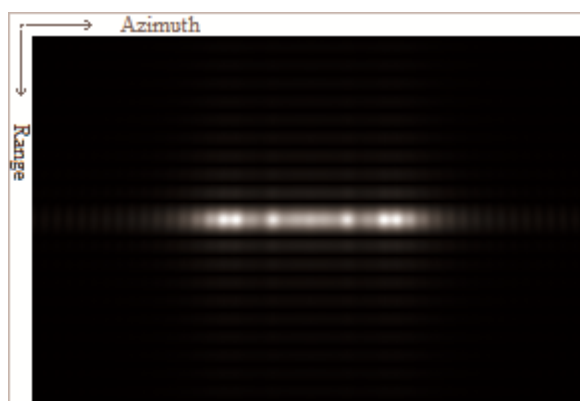


(الف)

شکل ۱۰. تأثیر حرکت هدف در سمت بر تصویر نهایی آن الف) $v_x = 20m/s, a_x = 0$ ب) $v_x = -20m/s, a_x = 0$

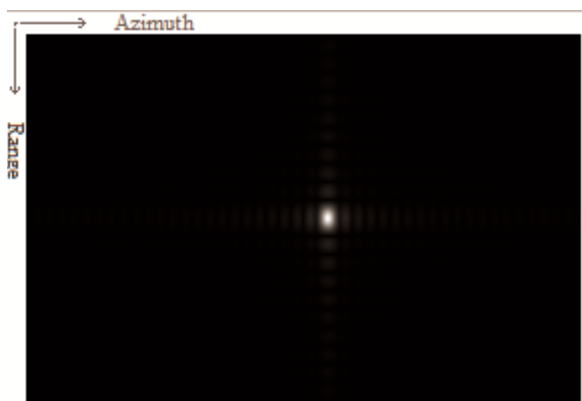


(ب)

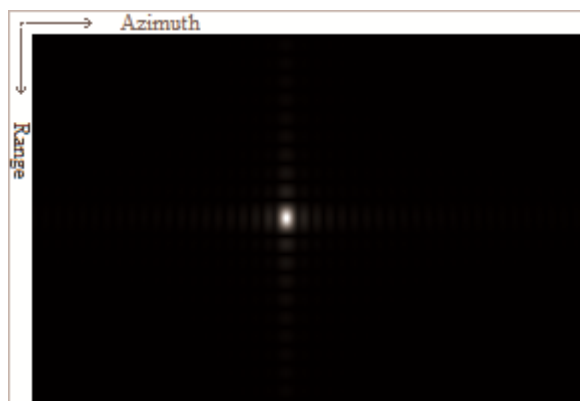


(الف)

شکل ۱۱. تأثیر سرعت هدف در سمت بر تصویر نهایی آن الف) $v_x = 40m/s, a_x = 0$ ب) $v_x = -40m/s, a_x = 0$

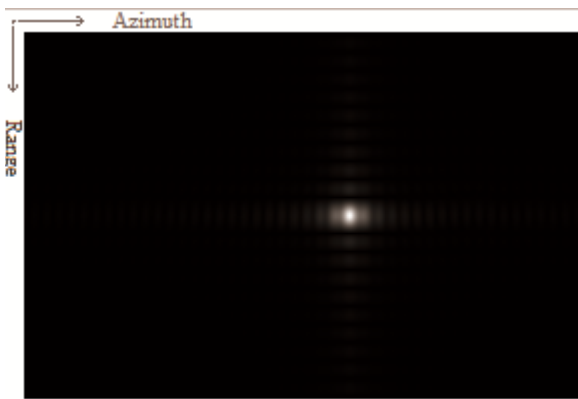


(ب)

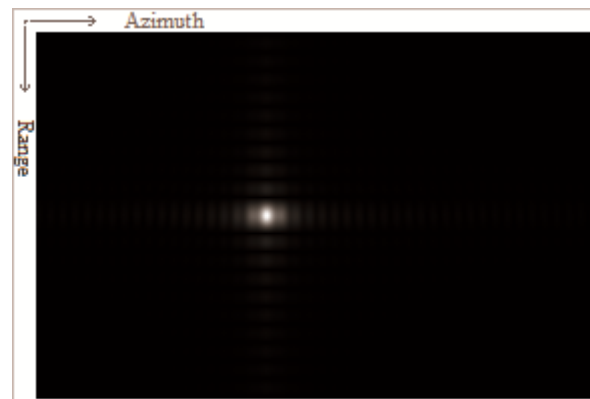


(الف)

شکل ۱۲. تأثیر حرکت هدف در بُرد بر تصویر نهایی آن الف) $v_y = 20m/s, a_y = 0$ ب) $v_y = -20m/s, a_y = 0$

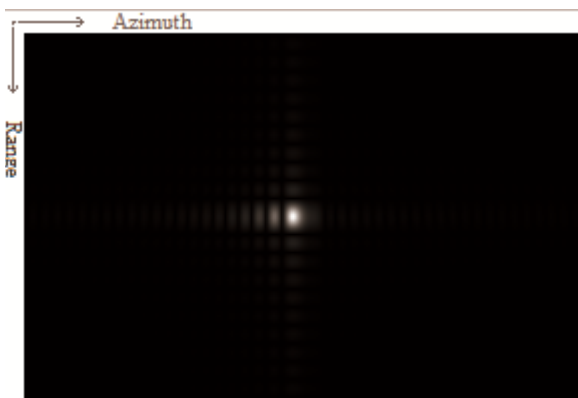


(ب)

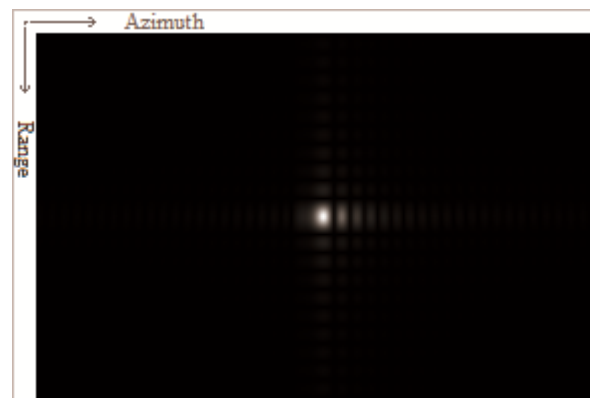


(الف)

شکل ۱۳. تأثیر سرعت هدف در بُرد بر تصویر نهایی آن (الف) $v_y = 40m/s, a_y = 0$ (ب) $v_y = -40m/s, a_y = 0$

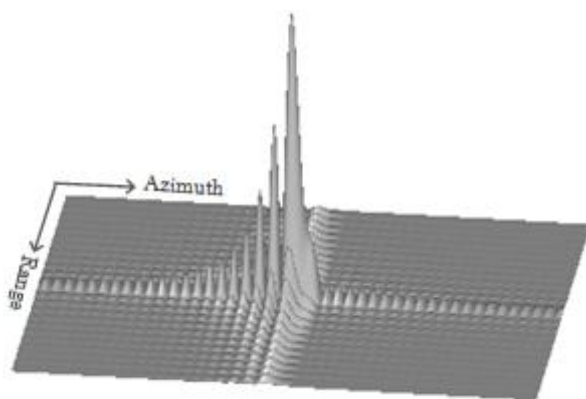


(ب)

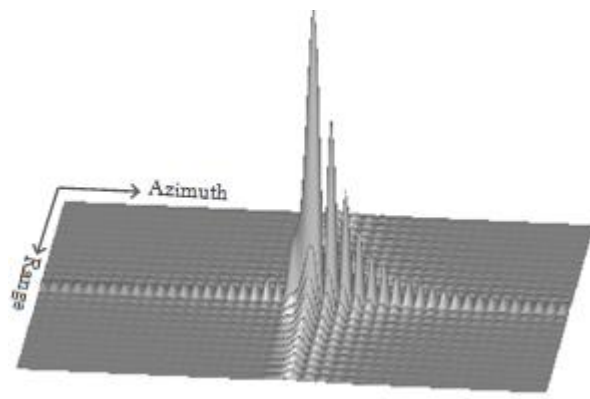


(الف)

شکل ۱۴. تأثیر شتاب هدف در سمت بر تصویر نهایی آن با نمایش دوبعدی (الف) $a_x = 10m/s^2$ (ب) $a_x = -10m/s^2$



(ب)



(الف)

شکل ۱۵. تأثیر شتاب هدف در سمت بر تصویر نهایی آن با نمایش سه‌بعدی (الف) $a_x = 10m/s^2$ (ب) $a_x = -10m/s^2$

۷. نتیجه‌گیری

نیازی به جبران نرخ چیرپ ندارد. جهت اطمینان از صحت الگوریتم ارائه شده، روابطی برای پیش‌بینی تأثیر پارامترهای مختلف حرکت هدف بر تصویر نهایی SAR استخراج شد و بر پایه آن، نمودارهایی برای توصیف اثرات حرکت ارائه شد و در نهایت، با بهره‌گیری از الگوریتم RDA تصویر نهایی SAR از داده خام آن

در این مقاله، الگوریتمی برای تولید داده خام اهداف متحرک در تصویربرداری نواری با رادار دهانه ترکیبی ارائه گردید که نسبت به شبیه‌سازهای پیشین، از سرعت بیشتری برخوردار است و با یک بار تولید سیگنال سمت به‌زای فواصل مختلف از آن‌تن،

Imaging Simulation for Composite Model of Ship on Dynamic Ocean Scene," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 113, pp. 395-412, 2011.

- [18] M. Alessandro and D. V. Francesca, "A Time-Domain Raw Signal Simulator for Interferometric SAR," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 9, pp. 1811-1817, 2004.
- [19] Y. Wang, Z. M. Zhang, and Y. K. Deng, "Squint Spotlight SAR Raw Signal Simulation in the Frequency Domain Using Optical Principles," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 8, pp. 2208-2215, 2008.
- [20] X. Qiu, D. Hu, L. Zhou, and C. Ding, "A Bistatic SAR Raw Data Simulator Based on Inverse w-k Algorithm," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 3, pp. 1540-1547, 2010.
- [21] G. Franceschetti, R. Guida, A. Iodice, D. Riccio, and G. Ruello, "Efficient Simulation of Hybrid Stripmap/Spotlight SAR Raw Signals from Extended Scenes," *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 11, pp. 2385-2396, 2004.
- [22] A. S. Khwaja, L. Ferro-Famil, and E. Pottier, "SAR Raw Data Generation Using Inverse SAR Image Formation Algorithms," in *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2006.
- [23] G. Franceschetti, A. Iodice, S. Perna, D. Riccio, "Efficient Simulation of Airborne SAR Raw Data of Extended Scenes," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 10, pp. 2851-2860, 2006.
- [24] S. V. Baumgartner and G. Krieger, "Chapter 18 Multi-Channel SAR for Ground Moving Target Indication," *Academic Press Library in Signal Processing*, vol. 2, pp. 911-986, 2014.
- [25] A. Adewoye, "Synthetic Aperture Radar Simulation for Point and Extended Targets (Master's Thesis)," Ontario: McMaster University, 2013.
- [26] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementations," Norwood: Artech House, 2005.

استخراج و با نمودارهای به‌دست‌آمده مقایسه گردید. نتایج به‌دست‌آمده، بیان‌گر صحت و سرعت الگوریتم ارائه‌شده برای تولید داده خام اهداف متحرک است.

۸. مراجع

- [1] Y. K. Chan and V. C. Koo, "An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR)," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 2, pp. 27-60, 2008.
- [2] O. Dogan and M. Kartal, "Efficient Strip-Mode SAR Raw-Data Simulation of Fixed and Moving Targets," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 884-888, 2011.
- [3] S. H. Lim, J. H. Han, S. Y. Kim, and N. H. Myung, "Azimuth Beam Pattern Synthesis for Airborne SAR System Optimization," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 106, pp. 295-309, 2010.
- [4] Q. Liu, W. Hong, W. X. Tan, Y. Lin, Y. Wang, and Y. Wu, "An Improved Polar Format Algorithm with Performance Analysis for Geosynchronous Circular SAR 2D Imaging," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 119, pp. 155-170, 2011.
- [5] S. J. Wei, X. L. Zhang, and J. Shi, "Linear Array SAR Imaging via Compressed Sensing," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 117, p. 299-319, 2011.
- [6] J. W. Winkler, "An Investigation into Ground Moving Target Indication (GMTI) Using a Single-Channel Synthetic Aperture Radar (Master's Thesis)," Brigham Young University, 2013.
- [7] I. C. Sikaneta, "Detection of Ground Moving Objects with Synthetic Aperture Radar (Ph.D. Thesis)," Ottawa: Univ. Ottawa, 2002.
- [8] E. Chapin and C. W. Chen, "Along-Track Interferometry for Ground Moving Target Indication," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 23, no. 6, pp. 19-24, 2008.
- [9] D. C. Maori, J. Klare, A. R. Brenner, and J. H. G. Ender, "Wide-Area Traffic Monitoring with the SAR/GMTI System PAMIR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 10, pp. 3019-3030, 2008.
- [10] Entzminger, J. N., "JointSTARS and GMTI: Past, Present and Future," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 35, no. 2, p. 748-761, 1999.
- [11] C. Livingstone and A. Thompson, "The Moving Object Detection," *Can. J. Remote Sens.*, vol. 30, no. 3, pp. 355-368, 2004.
- [12] C. Romero, "High Resolution Simulation of Synthetic Aperture Radar Imaging, California: Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.
- [13] L. Yang, W. D. Yu, Y. H. Luo, and S. C. Zheng, "Efficient Strip-Mode SAR Raw Data Simulator of Extended Scenes Included Moving Targets," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 53, pp. 187-203, 2013.
- [14] Y. Q. Jin, "Polarimetric Scattering Modeling and Information-Trieval of SAR Remote Sensing-A Siew of FDU Work," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 104, pp. 333-384, 2010.
- [15] Y. L. Chang, C. Y. Chiang, and K. S. Chen, "SAR Image Simulation with Application to Target Recognition," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 119, pp. 35-57, 2011.
- [16] H. Buddendick and T. F. Eibert, "Bistatic Image Formation from Shooting and Bouncing Rays Simulated Current Distributions," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 19, pp. 1-18, 2011.
- [17] M. Zhang, Y. W. Zhao, H. Chen, and W. Q. Jiang, "SAR

A Fast Strip-Mode Synthetic Aperture Radar Raw Data Simulator of Moving Targets

M. Mohammadi*, **A. M. Mahmoudi**

Shahid Chamran University of Ahwaz

(Received: 22/07/2015, Accepted: 12/03/2016)

Abstract

A fast and accurate synthetic aperture radar raw data generator of moving targets has high importance, especially in the applications of the ground moving target indication. In this paper, by the hybrid time-frequency domain, a fast algorithm has been proposed for strip mode SAR raw data generation of moving targets. Using this simulator, in different conditions in terms of target motion speed, acceleration and direction, radar raw data has been generated and its final image has been extracted by Range-Doppler Algorithm. Then, the obtained images have been studied using the formula that have been extracted for predicting the effects of target motion parameters in the SAR images. The results show that the proposed simulator has a better performance in terms of speed than other existing simulators.

Keywords: Raw Data, Synthetic Aperture Radar, Strip-Mode Imaging, Moving Targets, Range-DopplerAlgorithm