

## شبیه‌سازی سیگنال خام SAR و مدل بازپراکنش پلاریمتری از اهداف سه‌بعدی

محسن جعفری<sup>۱</sup>، صفا خزایی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه تهران ۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(دریافت: ۹۴/۰۸/۲۴؛ پذیرش: ۹۵/۰۵/۱۱)

### چکیده

تصاویر سنجنده‌های SAR در سال‌های اخیر به واسطه مزایایی همچون استقلال از شرایط جوی و حساسیت به هندسه هدف نقش مهمی در شناسایی و پایش اهداف زمینی داشته‌اند. پیچیدگی عملکرد سامانه‌های اخذ داده SAR به‌ویژه در مرحله تبدیل سیگنال خام به تصویر تفسیر رفتار سنجنده و تصاویر آن‌ها را دشوار کرده است. از این رو، استفاده از شبیه‌سازی تصاویر SAR در حل این مشکل می‌تواند کارا باشد. در این خصوص، انجام شبیه‌سازی تصویر SAR از اهداف سه‌بعدی گامی اساسی است. در این مقاله، روشی برای شبیه‌سازی تصاویر SAR از اهداف سه‌بعدی ارائه و ماتریس بازپراکنش پلاریمتری برای اهداف خالص توسعه داده شده است. همچنین، تأثیر پارامترهای مختلف سنجنده و هندسه هدف به کمک روش پیشنهادی در تشکیل تصویر SAR از اهداف سه‌بعدی تحلیل شده است. روش پیشنهادی بر روی اهداف تک پیکسلی، سه‌بعدی و یک نمونه واقعی ساختمان پیاده‌سازی شده است. اختلاف تصویر SAR شبیه‌سازی از مدل ساختمان با نمونه واقعی آن با کمیت SAM برابر با ۰/۳۸ برآورد شد که مقدار مطلوبی در سطح شبیه‌ساز پیشنهادی می‌باشد.

### واژگان کلیدی

شبیه‌سازی، تصویر پلاریمتری SAR، اهداف سه‌بعدی، مدل بازپراکنش

### ۱. مقدمه

دیگر با توجه به آن که عوامل مختلف در اطلاعات ثبت شده توسط سامانه‌های اخذ داده SAR نقش دارد، مدل‌سازی عملکرد این سامانه‌ها به تفسیر تصاویر SAR کمک زیادی خواهد کرد. (د) این نوع مدل‌سازی‌ها امکان شبیه‌سازی سطوح و اهداف را از منظر سامانه‌های اخذ داده SAR فراهم می‌آورد. (ه) استفاده از این مدل‌سازی‌ها در پدافند غیرعامل کارا و بااهمیت است.

شبیه‌سازی یک حالت متفاوت را برای مطالعه مناظر غیریکنواخت زمین تحت مشاهدات SAR ارائه می‌کند. این موضوع ممکن است مشاهدات SAR را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار دهد، رفتار پراکنش فیزیکی را تفسیر کند و پارامتر ویژگی‌های عوارض سطح زمین را محاسبه کند. بعضی از روش‌های شبیه‌سازی اخذ داده SAR در کارهای گذشته به دو گروه تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول بر مبنای ویژگی‌های آماری تصاویر SAR متمرکز می‌شود [۴-۲] و دسته دوم بر خصوصیات فیزیکی پراکنش متمرکز می‌شود [۵-۶].

بی‌گمان هندسه خاص هر هدف رفتار آن را برای شبیه‌سازی تشکیل تصویر SAR متمایز می‌کند. از این رو تحقیقات مختلف انجام شده بر اهداف مختلف متمرکز شده‌اند. Franceschetti و همکارانش شبیه‌سازی سیگنال خام SAR را برای مناظر زمین مثل زمین لخت، سطح دریا و ساختمان‌ها توسعه دادند [۶].

با وجود تمام مزایایی که برای تصاویر SAR و پلاریمتری وجود دارد، نحوه عملکرد در این نوع سامانه‌های اخذ داده نسبت به سنجش از دور غیرفعال، بسیار پیچیده‌تر است. در اخذ داده SAR ابتدا یک فضای سیگنالی بر اساس بازپراکنش سطح در طول موجی که SAR در آن فعالیت می‌کند، شکل می‌گیرد و در ادامه برای تشکیل تصویر SAR منطقه، نگاشتی از این فضای سیگنالی به فضای تصویر انجام می‌گیرد [۱]. این مسئله درک و تفسیر تصاویر SAR را مشکل کرده است. به‌واقع تفسیر یک تصویر SAR پارامترهای مؤثر بر آن از سوی محیط و سنجنده بسیار پیچیده‌تر از سنجنده‌های غیرفعال است. از این رو ارائه مدل‌هایی که نحوه عملکرد سامانه‌های اخذ داده SAR را تشریح کند، بسیار مطلوب است و می‌تواند گامی در جهت تفسیر بهتر عوامل مؤثر بر یک تصویر SAR باشد. با مدل‌سازی عملکرد سامانه‌های SAR و همچنین مدل‌های بازپراکنش پلاریمتری اهداف مختلف: الف) امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های اخذ داده SAR مانند پارامترهای مختلف سکو و سنجنده همچون فرکانس موج ارسال و یا سرعت سکو فراهم می‌شود. ب) می‌توان گام مهمی در جهت طراحی و ساخت سامانه‌های اخذ داده برداشت. ج) از طرف

\* رایانامه نویسنده مسئول: skhazai@ihu.ac.ir

مقاله مربوط به نتایج پیاده‌سازی می‌باشد. در بخش پایانی (چهارم) نتیجه‌گیری تحقیق به همراه برخی پیشنهادها برای تحقیقات آتی بیان می‌شود.

## ۲. مبانی نظری پژوهش

### ۲-۱. پارامترهای سکو و سنجنده در تشکیل فضای

#### سیگنال SAR

در تشکیل تصویر SAR پارامترها از سه دسته تاثیر گذارند (شکل ۱). همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، سکو و سنجنده، محیط و هدف از این جمله‌اند. در ادامه به تشریح برخی از این موارد پرداخته می‌شود.

- فرکانس پالس‌های متوالی ( $PRF$ ):<sup>۳</sup> این پارامتر تعداد پالس‌های ارسالی از سنجنده به سمت زمین در یک ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در هندسه و ساختار سامانه‌های SAR تشریح داده شد این سنجنده‌ها با ارسال پالس‌های متوالی از امواج ماکروویو به سمت هدف و ثبت بازپراکنش آن‌ها تصویر را تشکیل می‌دهد [۹]. بنابراین، برای مدل‌سازی تصویر SAR یک هدف دانستن تعداد پالس‌های رسیده در طول اخذ داده به هدف ضروری است.

مدت‌زمان اخذ داده ( $dur$ ):<sup>۴</sup> همان‌طور که گفته شد در سامانه‌های SAR برای جبران کوچک بودن آنتن و در نتیجه پایین بودن توان تفکیک مکانی به جای اخذ داده در یک لحظه از هدف چندین ثانیه این کار را انجام می‌دهد و سپس با پس پردازش پالس‌های بازگشتی تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتری تولید می‌شود. از این‌رو این پارامتر در مدل‌سازی تصویر SAR باید لحاظ گردد [۹]. به عبارت دیگر زمانی که یک هدف در دید یک سنجنده SAR قرار دارد با این پارامتر تعیین می‌گردد.

- سرعت سکوی حمل سنجنده ( $V_p$ ):<sup>۵</sup> با در نظر گرفتن سرعت سنجنده در واقع تعداد پالس‌های رسیده به هدف و در نهایت تعداد سیگنال‌های بازگشتی قابل تخمین خواهد بود.

- فرکانس موج ماکروویو ( $f_0$ ): فرکانس موج ارسالی بسیار مؤثر بر نوع بازخوردش از هدف است. بنابراین موج ماکروویو ارسالی از سوی سنجنده با طول موج مشخصی ارسال می‌گردد که لحاظ کردن آن در مدل‌سازی ضروری است.

- طول واقعی آنتن ( $L_a$ ):<sup>۶</sup> طول واقعی آنتن مؤثر در پالس‌های ارسالی و همچنین دریافتی و در نتیجه قدرت تفکیک

تحقیقات [۷-۶] مدل بازپراکنش زمین در حالت‌های توزیع تصادفی و پراکنش‌های دوسطحی و سه وجهی در ساختمان‌ها و مناطق شهری با استفاده از یک مدل ردیابی اشعه نوری هندسی - نوری فیزیکی (GO-PO) بازسازی شده است. ضمناً این تحقیقات اثر نویز اسپکل همبسته<sup>۱</sup> را در تصاویر SAR ترکیب و فضای مدل‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر کرده‌اند.

Brown و همکارانش نیز یک مدل شبیه‌سازی تصاویر SAR برای نواحی جنگلی با اتخاذ شبیه‌سازی Monte Carlo از درختان فراکتال را توسعه دادند [۶]. منطقه شبیه‌سازی شده در مدل این تحقیق با فرضیاتی ساده‌سازی شده است، هرچند مناطق طبیعی پیچیده‌تر هستند و شامل توزیع تصادفی و غیریکنواخت، عوارض قابل نفوذ یا غیرقابل نفوذ مثل سایبان پوشش گیاهی، ساختارهای ساخته دست بشر و توپوگرافی سطح مزاحم هستند [۵]. Zaharris در سال ۲۰۰۶ الگوریتم RDA را برای شبیه‌سازی دوبعدی تصاویر SAR پیشنهاد و در متلب پیاده‌سازی کردند. روش پیشنهادی در این تحقیق علی‌رغم نتایج مطلوب اما به لحاظ هزینه محاسباتی و دقت تولید سیگنال SAR عملکرد مطلوبی ندارد [۸]. دهقانی و همکاران در تحقیقی مدلی را برای عملکرد سامانه‌های اخذ داده SAR ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده در این تحقیق مانند تابع پاسخ ضربه برای سامانه‌های مستقل از زمان، نحوه رفتار این سامانه‌ها را نشان می‌دهد و با استفاده از آن می‌توان فرایند اخذ داده SAR را شبیه‌سازی کرد.

در تحقیقات اخیر که به آن‌ها اشاره شد اهمیت پرداخت سه‌بعدی به عوارض پراهمیت و در نظر گرفتن یک شبیه‌ساز کانال‌های پلاریمتری مهم و ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین، هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی به منظور شبیه‌سازی اهداف سه‌بعدی در تصاویر SAR و افزودن اطلاعات پلاریمتری راداری به کانال‌های SAR می‌باشد. به عبارت دیگر در این تحقیق، چگونگی شبیه‌سازی بازپراکنش راداری از سیگنال خام تا تصویر (ماتریس پراکنش) شرح داده خواهد شد. همچنین به شبیه‌سازی اهداف سه‌بعدی که به نوعی تعمیم روش دوبعدی به سه‌بعدی را در پی دارد پرداخته می‌شود. روش پیشنهادی این تحقیق در سه بخش تولید سیگنال خام SAR از روی تصویر هدف و تبدیل این سیگنال خام با روش RDA<sup>۲</sup> و در نهایت برآورد یک مدل پلاریمتری مناسب برای افزودن به تصویر SAR.

در ادامه و در بخش دوم مقاله، روش پیشنهادی این تحقیق برای شبیه‌سازی تصویر SAR از اهداف سه‌بعدی و مدل بازپراکنش پلاریمتری اهداف سه‌بعدی ارائه می‌گردد. بخش سوم

<sup>3</sup> Pulse Repetition Frequency (PRF)

<sup>4</sup> Duration

<sup>5</sup> Platform Velocity

<sup>6</sup> Carrier Frequency

<sup>7</sup> Antenna Actual Length

<sup>1</sup> Coherent Speckle

<sup>2</sup> Range Doppler Algorithm

## ۲-۲. روش مدل‌سازی سیگنال SAR

فضای سیگنالی که تشکیل خواهد شد به صورت دوبعدی است که بعدها برد و سمت گویند. راستای سمت در جهت حرکت سکوی حامل و راستای برد عمود بر جهت حرکت سکوست. سرعت انتشار موج ( $C$ )، فرکانس انتشار موج ( $f_c$ ) و طول موج انتشار موج ( $\lambda_c$ ) سه پارامتر مؤثر در تشکیل تصویر از سمت محیط پیرامون هستند. طول موج بلند امواج مایکروویو محیط اطراف را به مانند یک محیط تقریباً خلاء می‌بیند. بنابراین، سرعت انتشار موج همان سرعت نور در خلا می‌باشد. به این ترتیب مقدار فرکانس نیز معکوس سرعت و طول موج انتشار هم نسبت سرعت به فرکانس می‌باشد.

نرخ انجام تکنیک چیرپ در راستای برد به صورت زیر از تقسیم باند پایه بر مدت زمان انجام تکنیک چیرپ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

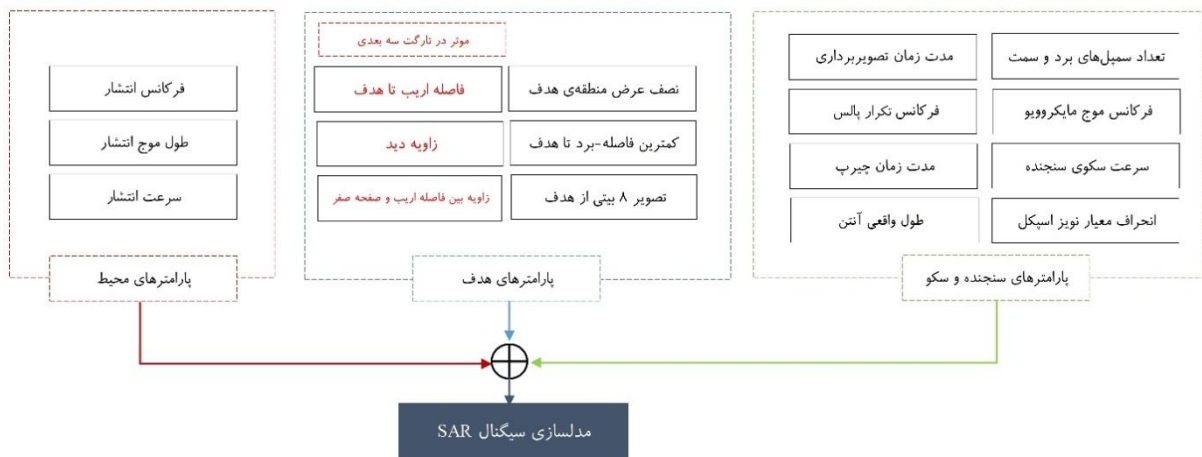
$$K_r = \frac{B_0}{T_p} \quad (1)$$

فواصل زمانی نمونه‌برداری در راستای برد، زمان شروع نمونه‌برداری و همچنین زمان پایان آن مطابق رابطه‌های (۲)–(۴) است [۸].

$$dt = 1/(2 \times B_0) \quad (2)$$

$$T_s = (2 \times (X_c - X_0))/c \quad (3)$$

$$T_f = \frac{2 \times (X_c - X_0)}{c} + T_p \quad (4)$$



شکل ۱. پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی سیگنال SAR

مکانی یک تصویر SAR می‌باشد [۱].

- پارامتر چیرپ ( $T_p$ ): مدت زمان اعمال تکنیک چیرپ بر روی موج ارسالی را نشان می‌دهد [۹].

- باند پایه ( $B_0$ ).

- انحراف معیار نویز اسپکل ( $\sigma_{noise}$ ): یکی از پدیده‌های اجتناب‌ناپذیر در تصاویر SAR نویز اسپکل<sup>۴</sup> است. اسپکل به علت تداخل سازگار (تولید پیکسل‌های روشن) و غیر سازگار (تولید پیکسل‌های تیره) امواج منعکس شده از مجموعه پراکنده‌گرهای داخل یک پیکسل زمینی در تصاویر SAR رخ می‌دهد. تأثیر آن باعث تغییر در شدت پیکسل‌ها و ایجاد یک الگوی شبیه نویز در تصویر می‌شود. برای اعمال این پدیده در مدل‌سازی باید انحراف معیار پخش آن در تصویر مشخص باشد [۹].

- تعداد نمونه‌های در راستای سمت و برد ( $a_{bins}$  و  $b_{bins}$ ): همان‌طور که گفته شد فضای سیگنال دوبعدی و دو بعد آن را سمت و برد مشخص می‌کنند برای بازسازی فضای سیگنال نیاز به تعیین تعداد نمونه‌های برداشتی در این دو راستا است [۹].

- کمترین فاصله در راستای برد ( $X_c$ ): فاصله در جهت برد از سنجنده تا مرکز هدف را گویند. به عبارت دیگر این کمترین فاصله سنجنده تا هدف است.

نصف عرض منطقه هدف<sup>۵</sup>: در واقع هدف در فاصله  $(X_c - X_0, X_c + X_0)$  قرار می‌گیرد که در آن،  $X_0$  همین پارامتر نصف عرض منطقه هدف است.

<sup>1</sup> Chirp Pulse Duration

<sup>2</sup> Bandwidth

<sup>3</sup> AWGN standard deviation

<sup>4</sup> Speckle

<sup>5</sup> Azimuth Bins & Range Bins

<sup>6</sup> Minimum Range Distance

<sup>7</sup> Half Target Area Width

$$t_d = t - 2 \times R/C \quad (۱۵)$$

$$S = F_n \times w_a \quad (۱۶)$$

$$\times e^{\sqrt{-1} \times (4 \times \pi \times f_o \times f_c \times R + \sqrt{-1} \times \pi \times K_r \times t_d^2 - t_d \times T_p)} \times 0.5$$

$$\times \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi \times t_d \times \frac{r_{bins}}{T_p}}{r_{bins} - 1} \right) \right)$$

در صورتی که بخواهیم نویز را به سیگنال شبیه‌سازی شده اعمال کنیم می‌توانیم در مرحله آخر ترم نویز زیر را اضافه کنیم [۸]:

$$\hat{S} = S + \sigma_{nois} \times random_s \quad (۱۷)$$

### ۳-۲. تبدیل از فضای سیگنال به فضای تصویر

فضای سیگنال، در هریک از دو بعد دچار پهن‌شدگی شده و اثر آن در چندین پیکسل مجاور دیده می‌شود. علاوه بر مشکل فوق یک انحنای سهمی گون در فضای سیگنالی وجود دارد که به دلیل حرکت سکو در حین فرایند اخذ داده و تغییر فاصله رادار نسبت به هدف، ایجاد شده است.

روش RDA به‌عنوان یک روش پایه‌ای که اصول کلی را دارد و نتایج خوبی هم ارائه می‌دهد در این تحقیق به‌منظور تبدیل فضای سیگنالی تولیدشده به فضای تصویری استفاده می‌شود. الگوریتم کلی روش در شکل ۲ نشان داده شده است. این الگوریتم از سه جزء اصلی تشکیل شده است. (۱) فشرده‌سازی برد، (۲) اصلاح خمش، (۳) فشرده‌سازی در جهت سمت.

#### • فشرده‌سازی در جهت برد

برای فشرده‌سازی در جهت برد از فیلترهای مطابقت استفاده می‌شود. با تولید یک سیگنال مرجع در جهت برد به شکل زیر:

$$t_{d0} = t - 2(X_c/c) \quad (۱۸)$$

$$f_{20} = \pi K_r ((t_{d0}^2) - t_{d0} T_p) \quad (۱۹)$$

$$S_0 = e^{(\sqrt{-1} \times f_{20}) 0.5 (1 - \cos(\frac{2\pi \times t_d \times \frac{r_{bins}}{T_p}}{r_{bins} - 1})) / r_{bins}} \quad (۲۰)$$

در گام بعدی سیگنال تولیدشده مرجع و همچنین سیگنال بازگشتی تولیدشده از هدف به فضای فرکانس انتقال داده می‌شوند و با فیلتر مطابقت مطابق زیر فشرده‌سازی در جهت برد انجام می‌شود.

$$f_{sm} = f_s \times conj(f_{s0}) \quad (۲۱)$$

در نهایت سیگنال فشرده‌شده در جهت برد به فضای مکان منتقل می‌شود [۸].

نرخ نمونه‌برداری خطی در راستای سمت تحت تاثیر سرعت حمل سنجنده، طول موج انتشار و فاصله تا مرکز هدف مورد اخذ داده در راستای برد می‌باشد و مطابق رابطه زیر قابل برآورد است [۸]:

$$K_a = (2 \times V_p^2) / (\lambda_c \times X_c) \quad (۵)$$

تعداد دفعاتی نمونه‌برداری یا به عبارت دیگر تعداد نمونه‌های هدف در راستای برد با توجه به زمان شروع و پایان اخذ داده و همچنین نرخ اخذ داده برابر است با [۸]:

$$r_{bins} = 2 \times round((0.5 \times (T_f - T_s)) / dt) \quad (۶)$$

بنابراین، زمانی که هریک از اخذ داده‌ها در راستای برد انجام می‌شود معادل [۸]:

$$t = T_s + (r_{bins} - 1) \times dt \quad (۷)$$

از آنجایی که در حین اخذ داده به مدت (dur) با نرخ PRF پالس به سمت سنجنده ارسال می‌شود تعداد سیگنال‌های بازگشتی از هدف به صورتی که آرایه دوبعدی (s) با ابعاد زیر نشان می‌دهد [۸]:

$$S = (PRF \times dur, r_{bins}) \quad (۸)$$

خصوصیات هدف از طریق یک فایل تصویری ورودی مدل و به سیگنال‌های راداری در شبیه‌سازی اعمال می‌شود. در صورتی که ابعاد تصویر هدف را M×N در نظر بگیریم و مختصات هر پیکسل را با (n,m) نشان دهیم، آنگاه به‌ازای هر پیکسل خواهیم داشت [۸]:

$$x_n = Stretch \times (n - N/2) \quad (۹)$$

$$y_n = Stretch \times (\frac{M}{2} - m + 1) \quad (۱۰)$$

$$F_n = DN(m, n) / 255 \quad (۱۱)$$

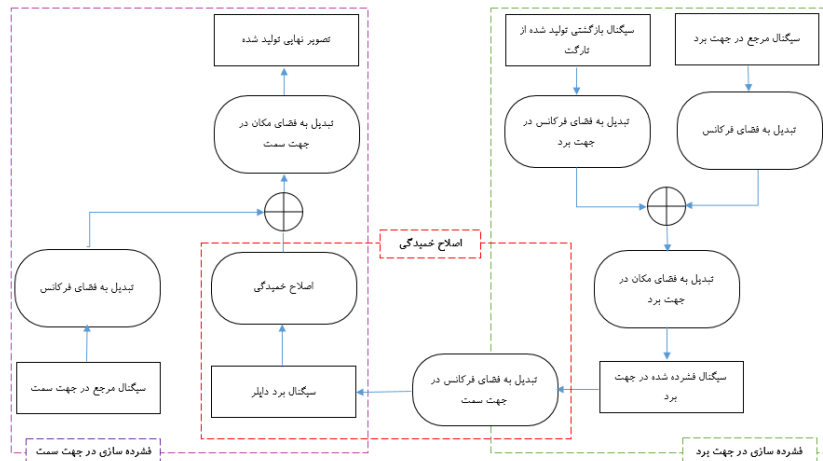
همانطور که پیشتر گفته شد هر بخش هدف (در اینجا پیکسل تصویر هدف) در طول مدت اخذ داده به تعداد پالس‌های ارسالی اخذ داده می‌شود. بنابراین، برای تولید هر سیگنال حاصل از هر پالس ارسالی (j) در یک بخش هدف (i) خواهیم داشت [۸]:

$$w_a = sinc(L_a * \frac{\tan^{-1} V_p \times (eta_j - \frac{dur}{2} + \frac{y_n}{V_p}) / X_c}{\lambda_c})^2 \quad (۱۲)$$

که در این رابطه  $eta_j$  زمان اخذ داده پالس j ام است و تابع sinc به صورت زیر است [۸]

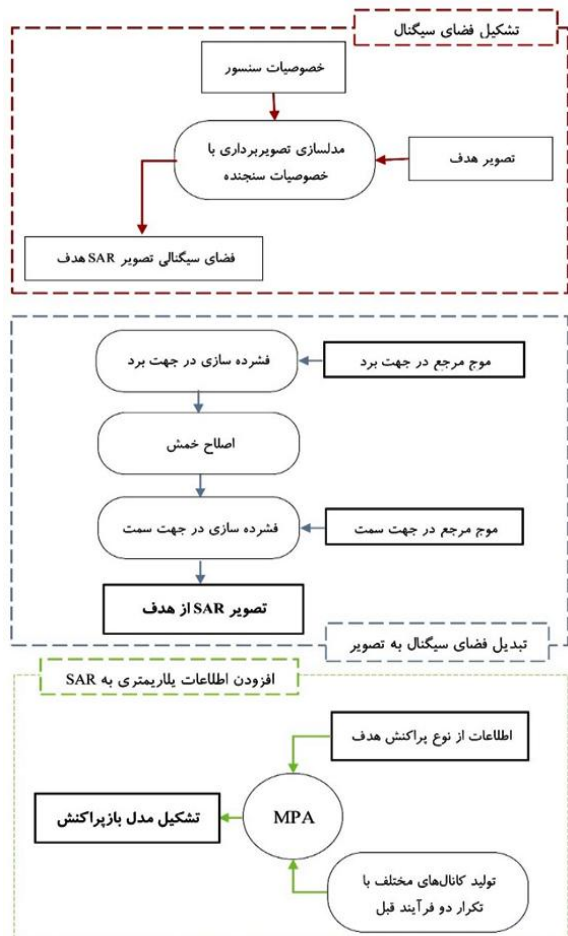
$$sinc(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (۱۳)$$

$$R = \sqrt{(X_c + x_n)^2 + V_p^2 \times (eta_j - \frac{dur}{2} + y_n/V_p)^2} \quad (۱۴)$$



شکل ۲. فلوجارت روش تبدیل فضای سیگنال به فضای تصویر [۸]

شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است روش پیشنهادی شامل سه مرحله تولید سیگنال SAR، تبدیل فضای سیگنال به فضای تصویر و افزودن مدل ماتریس پراکنش پلاریمتری است. شبیه‌سازی اهداف سه‌بعدی و همچنین مدل بازپراکنش پلاریمتری که نوآوری این تحقیق نیز می‌باشد در ادامه با جزئیات بیشتری شرح داده می‌شوند.



شکل ۳. فلوجارت کلی روش شبیه‌سازی تصویر پلاریمتری از یک هدف

• اصلاح خمش (RCMC)

قبل از فشردن سازی در جهت سمت به یک مرحله اصلاح خمش نیاز است. برای این منظور از حوزه رنج داپلر (از نظر برد در حوزه مکان و از نظر سمت در حوزه فرکانس) استفاده می‌شود زیرا در آن، تمامی اهدافی که فاصله مایل یکسانی نسبت به SAR دارند، روی هم قرار می‌گیرند و آن‌گاه می‌توان یک اصلاح کلی بر روی هر ستون از برد انجام داد [۸].

$$\Delta R = (2\lambda_c^2 X_c (K_a dur * .5 - eta)) \tag{22}$$

$$Cells = round\left(\frac{\Delta R}{0.56}\right) ; .56 \text{ meters} \tag{23}$$

/cell in range direction

$$f_{smb2}(k, m) = f_{smb}(k, m + Cells(k)) \tag{24}$$

• فشردن سازی در جهت سمت

بعد از اصلاح خمش می‌توان سیگنال گسترده شده در جهت سمت را به وسیله فیلتر منطبق در آن جهت فشرده کرد. به این منظور ابتدا سیگنال مرجع در جهت سمت تولید می‌شود:

$$S_{mb0} = e^{(\sqrt{-1}\pi K_a * eta * (2 * eta * (PRF_{\frac{dur}{2+1}}) - eta))} \tag{25}$$

مطابق فشردن سازی در جهت برد این بار هم با فیلتر مطابقت و در فضای فرکانس در جهت سمت سیگنال در جهت سمت فشرده می‌شود.

$$f_{sac} = f_{smb2} * conj(f_{smb0}) \tag{26}$$

در نهایت با تغییر فضای فرکانس به فضای مکان در جهت سمت تصویر نهایی تولید خواهد شد [۸].

۳. روش پیشنهادی شبیه‌سازی اهداف سه‌بعدی در تصاویر SAR و مدل سازی ماتریس پراکنش پلاریمتری

روش پیشنهادی این تحقیق برای شبیه‌سازی تصویر SAR و همچنین مدل سازی ماتریس پراکنش پلاریمتری اهداف در

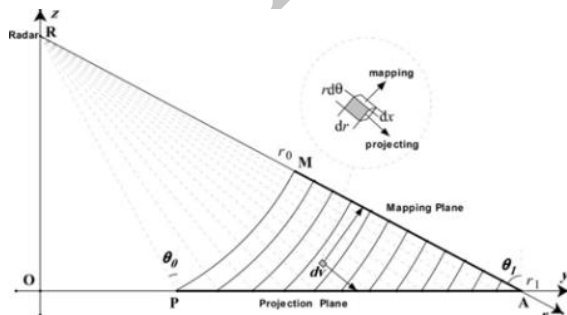
می‌شود. در روابط این مهم با جایگذاری فاصله  $R_{o3D}$  به جای  $X_o$  عملی می‌شود.

### ۳-۲. افزودن اطلاعات پلاریمتری متناسب با اطلاعات

#### پراکنش هدف (MPA<sup>۱</sup>)

قطبش موج ارسالی بانظم موجود در آنتن (v یا h) تولید می‌شود و در پالس‌ها به سمت هدف ارسال می‌گردد. متناسب با نوع هدف تغییراتی در قطبش موج بازگشتی ایجاد می‌شود. این تغییرات به شدت وابسته به هندسه هدف می‌باشند. زوایا و میزان سطح یا زبر بودن سطوح تغییر قطبش خاصی را در موج ارسالی ایجاد می‌کنند. سطوح و اهداف به لحاظ نوع بازپراکنش به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند برای این تقسیم‌بندی هم ایده‌های متفاوتی وجود دارد. مسئله مهم مشخص کردن سهم هر پراکنش در هدف است [۱۰]. برای مدل‌سازی این سهم یک سیستم مختصات با مشخصات ذیل را فرض کنید. سیستم مختصات قطبی  $(r, \theta)$  از سطح فرود موج الکترومغناطیس، سنسور در مبدأ است شعاع R برابر با محدوده slant است و زاویه  $\theta$  همان زاویه فرود موج است. با توجه به فاصله نمونه‌برداری از هر اکو پالس و زاویه ارتفاعی آنتن فضای تصاویر برداری به صورت  $\theta \in [\theta_0, \theta]$ ، صفحات xoy شامل عوارضی است که در قسمت پایین هستند و در محدوده  $z < 0$  قرار گرفته‌اند.

شکل ۵ نشان می‌دهد که نقشه و اصول طرح‌ریزی تصویر پراکنش از عوارض زمینی در صفحه فرود موج قرار می‌گیرد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، نقطه محدوده نزدیک‌تر P در PA (صفحه تصویر) به M در MA (صفحه نقشه) باکمان PM و پراکنش‌های همه عوارض زمینی توزیع شده در صفحه فرود PMA در MA با یک گروه از کمان‌ها تصویر شده است [۱۱].

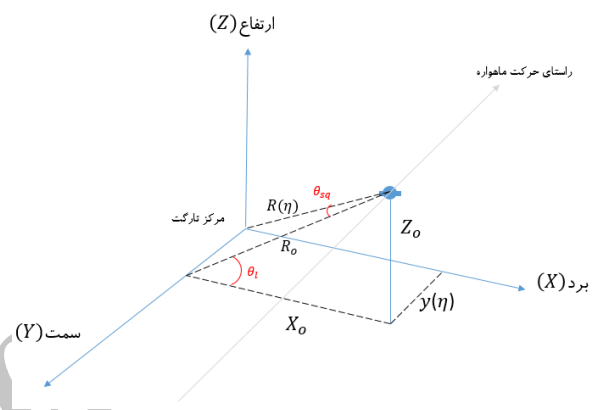


شکل ۵. سیستم MP<sup>۲</sup> [۱۱]

با توجه به عنصر دیفرانسیلی  $dv$  در موقعیت  $(x, r, \theta)$

### ۳-۱. شبیه‌سازی تصویر SAR هدف سه‌بعدی

هدف دوبعدی در فضای دوبعدی سمت-برد تشکیل می‌شود. برای شبیه‌سازی یک هدف سه‌بعدی نیاز به یک سیستم مختصات جدید می‌باشد. این سیستم باید یک بعد دیگر برای ارتفاع هدف در نظر بگیرد. در شبیه‌سازی دوبعدی سکو و تمام نقاط هدف همگی در ارتفاع صفر در نظر گرفته می‌شوند. در شبیه‌سازی سه‌بعدی نقاط هدف در موقعیت  $(x_m, y_m, z_m)$  در یک سیستم سه‌بعدی قرار دارد که سکو هم در ارتفاع  $Z_o$  قرار می‌گیرد. شکل ۴ خصوصیات این سیستم سه‌بعدی و نحوه قرارگیری هدف و سنجنده را نشان می‌دهد.



شکل ۴. هندسه سه‌بعدی سیستم SAR

فاصله اریب سه‌بعدی  $(R(n))$  به عبارت دیگر فاصله از سکو تا هدف نقطه‌ای در معادله (۲۷) آمده است. این مقدار تابعی از آزیموت و زمان است.

$$R(n)_{3D} = \sqrt{R_{o3D}^2 + V_p^2 n^2} = \sqrt{(X_o + x_m)^2 + (Z_o + z_m)^2 + (n + \frac{y_m}{V_p})^2} \quad (27)$$

علاوه بر پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی هدف دوبعدی که پیش‌تر به آن اشاره شد. سه پارامتر دیگر که بتواند هندسه هدف سه‌بعدی را تفسیر کند افزوده می‌شود: (۱) زاویه دید  $(\theta_i)$ ، نزدیکترین فاصله تا هدف  $(R_{o3D})$ ، (۲) پارامتر دیگر هم زاویه Squint  $(\theta_{sq})$  هم زاویه بین فاصله اریب و صفحه صفر داپلر.

$$R_{o3D} = \sqrt{X_o^2 + Z_o^2} \quad (28)$$

$$\tan(\theta_i) = Z_o / X_o \quad (29)$$

زاویه دید می‌تواند بین صفر تا ۹۰ تغییر کند که صفر آن معادل ارتفاع صفر سکو است. ۹۰ هم برای وقتی است که سنجنده مستقیماً هدف را می‌بیند. با جای‌گذاری معادله فاصله اریب  $(R_{o3D})$  در معادلات شبیه‌سازی دوبعدی می‌توان به راحتی شبیه‌سازی اکوهای سیگنال SAR را شبیه‌سازی کرد. بخش تبدیل سیگنال به تصویر هم مطابق شبیه‌سازی دوبعدی انجام می‌شود. با این تفاوت که در تولید سیگنال مرجع برد، آزیموت و همچنین در بخش RCMC ارتفاع سکو  $(Z_o)$  در نظر گرفته

<sup>1</sup> Map Projection Algorithm

<sup>2</sup> Map projection

عنوان  $x_m = m\Delta x, r_p = p\Delta r, s_q = q\Delta s$  می‌تواند به صورت رابطه (۳۴) نوشته شود [۱۱].

$$S_{n,i} = \sum_{m=m_n}^{m_{n+1}} \sum_{p=p_i}^{p_{i+1}-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \Delta x \Delta r \Delta s \times \prod_{p'=0}^p \exp[-\Delta r \kappa_e^+(m, p', q)] P(m, p, q) \times \prod_{p'=p}^0 \exp[-\Delta r \kappa_e^-(m, p', q)] \quad (34)$$

در رابطه بالا،  $p_i$  و  $m_n$  اعداد دنباله اولیه از واحد مجزا در  $(n, i)$  امین پیکسل می‌باشند.

در خصوص پراکنش‌گرهای حجمی پراکنش حجمی، هر واحد مجزا می‌تواند با ماتریس پراکنش  $S_{vol}$  از هر پراکنده‌گر منفرد به کار برده شود [۱۲]. برای پراکنده‌گرهای سطحی فرض کنید که هر واحد مجزا شامل فقط یک پراکنده‌گر سطحی است پراکنش باید  $\Delta x \Delta s S_{surf}$  باشد در جایی که  $S_{surf}$  ماتریس پراکنش از پراکنده‌گر سطحی است. علاوه بر این پراکنش سطح به عنوان یک عارضه غیرقابل نفوذ که کاملاً مانع انتشار موج است مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین، ترم میرائی برای پراکنش سطحی مقدار صفر را می‌گیرد. با جمع‌بندی این دو مورد خواهیم داشت [۱۱]:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{n,i} &= \sum_{m=m_n}^{m_{n+1}} \sum_{p=p_i}^{p_{i+1}-1} \sum_{q=0}^{Q-1} \prod_{p'=0}^p \bar{E}_o^+(m, p', q) \times \prod_{p'=p}^0 \bar{E}_o^-(m, p', q) \\ \bar{S}_o(m, p, q) &= \begin{cases} \gamma V_0 \bar{S}_{vol}(m, p, q) \\ = V_{ef} \bar{S}_{vol}(m, p, q), \text{ for volume scatter} \\ \Delta x \Delta s \bar{S}_{surf}(m, p, q) \\ = a_{ef} \bar{S}_{surf}(m, p, q), \text{ for surface scatter} \end{cases} \quad (35) \end{aligned}$$

$$\bar{E}_o^\pm(m, p', q) = \begin{cases} \exp[-d_{ef} \kappa_e^\pm(m, p', q)], \text{ for volume scatter} \\ 0, \text{ for surface scatter} \end{cases} \quad (36)$$

که در آن،  $V_{ef}$  حجم موثر ابری از پراکنده‌گرهای حجمی در یک واحد مجزاست،  $a_{ef}$  سطح موثر پراکنده‌گر سطحی و  $d_{ef}$  عمق نفوذ موثر است. زیرنویس 0 پراکنندگی یا میرائی یک پراکنش‌گر منفرد را نشان می‌دهد. مطابق رابطه به‌دست‌آمده برای

فضای اخذ داده طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب  $dr, dx$  و  $rd\theta$  است. ناحیه تصویر شده آن متناظر  $dxdr$  در صفحه تصویر است و ناحیه تصویر موثر  $dxrd\theta$  است که یک برش عرضی عمود بر جهت فرود است. بر اساس نظریه انتقال تابشی وقتی که موج فرودی می‌رسد و در المان  $dv$  نفوذ می‌کند، شدت پراکنش به صورت رابطه (۳۰) نوشته می‌شود [۱۱]:

$$I_s(x, r, \theta) = E^+(x, r, \theta) P(x, r, \theta) E^-(x, r, \theta) I_i dr \quad (30)$$

در این رابطه،  $I_s$  شدت فرودی است (در واحد سطح) و  $E^-$  و  $E^+$  میرائی و تضعیف کامل در جهت‌های عقب و جلو هستند. تابع  $P$  المان پراکنش است.

در  $K^+(x, r, \theta)$  و  $K^-(x, r, \theta)$  ضرایب میرائی عقب و جلو از المان  $dv$  هستند که این‌ها میرائی  $\exp[-dr \cdot \kappa - e(x, r, \theta)]$  و  $\exp[-dr \cdot \kappa + e(x, r, \theta)]$  را به ترتیب ایجاد می‌کنند. در اینجا بالانویس مثبت و منفی جهات عقب و جلو را به ترتیب نشان می‌دهد. سپس مجموع میرائی  $E^+$  و  $E^-$  به دلیل المان‌های بین  $r \in [r_0, r_1]$  در طول زاویه فرودی  $\theta$  می‌تواند به صورت رابطه زیر نوشته شود [۱۱].

$$E^+(x, r, \theta) = \exp\left[-\int_{r_0}^r dr' \kappa_e^+(x, r, \theta)\right] \quad (31)$$

$$E^-(x, r, \theta) = \exp\left[-\int_{r_0}^r dr' \kappa_e^-(x, r, \theta)\right]$$

$$S(x, r) \quad (32)$$

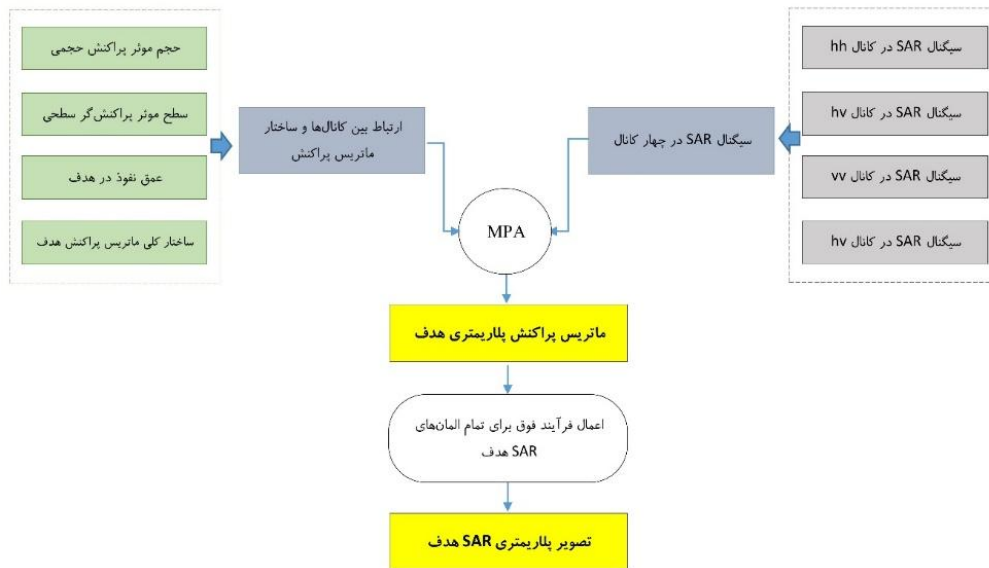
$$= \int_{\theta_0}^{\theta_1} I_s(x, r, \theta) r dx d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_1} E^+(x, r, \theta) P(x, r, \theta) E^-(x, r, \theta) I_i dr dx d\theta$$

$$S(x, r) = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \exp\left[-\int_{r_0}^r dr' \kappa_e^+(x, r, \theta)\right] P(x, r, \theta) \exp\left[-\int_{r_0}^r dr' \kappa_e^-(x, r, \theta)\right] dr dx d\theta \quad (33)$$

با توجه به شدت پراکنش و ناحیه روشنایی موثر، سهم قدرت پراکنش المان می‌تواند با رابطه  $I_s(x, r, \theta) dxrd\theta$  به‌دست‌آید در نتیجه نقشه پراکنندگی  $S(x, r)$  می‌تواند از طریق یکپارچه سازی همه المان‌ها در طول کمان‌های نقشه تولید شود (رابطه ۳۲). تحت فرود شدت واحد با استفاده از روابط (۳۱) و (۳۲) به رابطه (۳۳) می‌رسیم [۱۱].

جداسازی فضای تصویر براری  $(x, r, s)$  به واحدهای مجزا به

اطلاعات پلاریمتری به تصویر SAR پیشنهاد می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶. الگوریتم اعمال اطلاعات پلاریمتری به تصویر SAR

ماتریس پراکنش برای سه حالت پایه سطحی، حجمی و دوسطحی ساخته می‌شود. در نهایت ترکیبی از ماتریس‌های پراکنش می‌تواند ملاک خوبی برای نمایش ساختار پلاریمتری هدف مورد نظر باشد.

### ۳-۳. روش ارزیابی

برای تعیین میزان اختلاف تصویر شبیه‌سازی شده با تصویر واقعی هدف در این مقاله از روش SAM استفاده شده است [۱۳]. این روش تصویر شبیه‌سازی شده را به صورت یک بردار ( $P_1$ ) در نظر می‌گیرد که جهت و زاویه آن نسبت به بردار حاصل از تصویر مرجع ( $P_2$ ) میزان تفاوت دو تصویر را نشان می‌دهد. این زاویه طبق رابطه (۳۱) بیان می‌گردد [۱۳]. مهمترین مزیت این روش سادگی و سریع بودن محاسبات آن است.

$$SAM = \cos^{-1} \left[ \frac{\int P_1 P_2}{[\int P_1^2]^{1/2} [\int P_2^2]^{1/2}} \right] \quad (31)$$

این زاویه بین ۰ و  $\frac{\pi}{2}$  می‌باشد که می‌توان مقدار نرمال شده آن را به کمک تبدیل (۹) به دست آورد.

$$NSAM = \frac{2 * |SAM|}{\pi} \quad (32)$$

### ۴. پیاده‌سازی و بحث

در این بخش پس از معرفی مقادیر پارامترهای مختلف سنجنده نحوه عملکرد روش در شبیه‌سازی تصویر SAR هدف نقطه‌ای و هدف سه‌بعدی تشریح می‌شود. در بخش دیگری هم به نحوه

ساختار ماتریس پراکنش یک هدف الگوریتمی، برای اعمال ساختار هندسی هدف به اطلاعات پلاریمتری و در نهایت افزودن

اطلاعات در پایه قطبش‌های دیگر بر مبنای دیتای خام و یا اطلاعات محدود از هدف قابل ساخت نیست به عبارت دیگر آنچه در مرحله قبل برای کانال‌های مختلف به دست آمد مقادیر نسبی آن‌ها است. آنچه این کانال‌ها را دارای مفهوم می‌کند نوع ارتباط آن‌ها و نسبت آن‌ها در ماتریس پراکنش می‌باشد.

در حالتی که هدف و پراکنش آن خالص باشند به عبارت دیگر دو شرط زیر برقرار باشد:

۱- قدرت تفکیک مکانی سنجنده و نحوه قرارگیری هدف در آن به گونه‌ای باشد که در هر پیکسل تنها و تنها یک نوع هدف موجود باشد.

۲- ساختار هندسی هدف به یکی از اهداف استاندارد شبیه باشد و ترکیبی از چند هدف نباشد.

با فرض این دو شرط می‌توان یکی از ساختارهای مورد بحث در بخش قبلی را به عنوان ساختار پلاریمتری هدف مورد نظر در نظر گرفت و داده شبیه‌سازی شده SAR را با آن ساختار پلاریمتری در ماتریس پراکنش قرار داد. برای برآورد مقادیر سهم پراکنش در هر جز پراکنش هم می‌توان از روابط (۳۵) تا (۳۷) استفاده کرد.

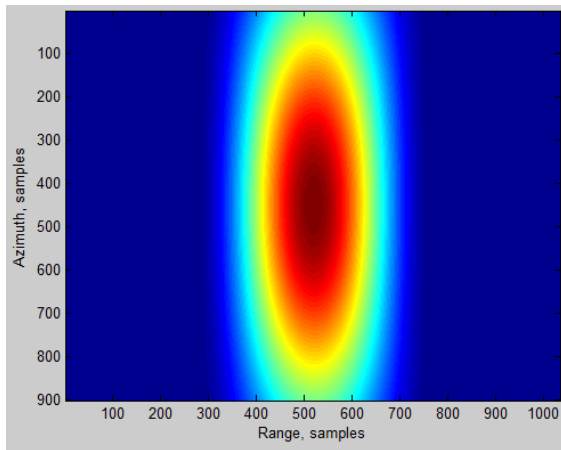
در حالتی که هدف پراکنشی غیر استاندارد و ترکیبی از چند پراکنش باشد:

پارامترهای تعریف شده نظیر عمق نفوذ موثر و سطح موثر در اهداف سطحی و همچنین میزان حجم موثر در پراکنش حجمی معیار ترکیب پراکنش‌ها خواهند بود. بنابراین، در این شرایط



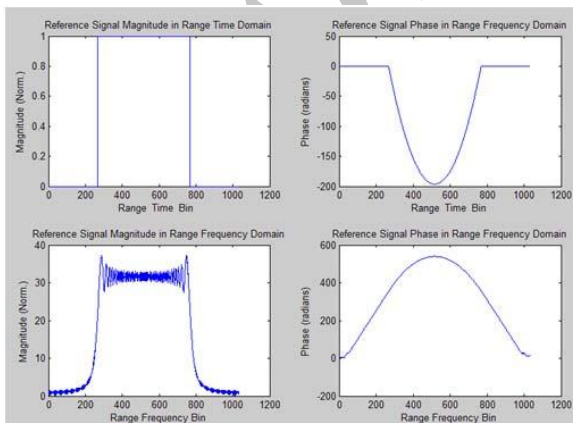
### • تولید سیگنال خام

بر اساس مشخصات سنجنده و همچنین اطلاعاتی که از تصویر SAR ذکر شد با روش ارائه‌شده، داده خام از هدف نقطه‌ای مورد بررسی حاصل می‌گردد (شکل ۸). داده خام در یک فضای دوبعدی سمت-برد تولید می‌شود. مطابق انتظار و آنچه در تئوری بیان شد این داده خام در هر دو جهت برد و سمت دچار کشیدگی و همچنین خمیدگی نیز در فضای داپلر است.



شکل ۸. داده خام شبیه‌سازی شده از هدف نقطه‌ای فشرده‌سازی در جهت برد

گام اول در تبدیل فضای خام سیگنالی به تصویر فشرده سازی در جهت برد است. برای درک این موضوع ابتدا سیگنال مرجع تولید شده خام در جهت برد در فضای زمان و فرکانس به طور مجزا در شدت و فاز در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹. سیگنال مرجع برد

استخراج مدل ماتریس پراکنش پلاریمتری هدف ارائه خواهد شد.

### ۴-۱. پارامترهای سنجنده

مشخصات و پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. درباره مفاهیم این پارامترها در بخش قبل بحث شده است.

جدول ۱. پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی تصویر SAR

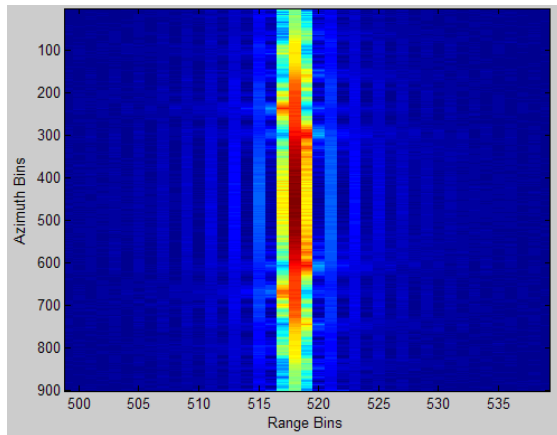
Symbol	Parameter Name	Value
PRF	Pulse Repetition Frequency	300 Hz
dur	Duration	3 seconds
$V_p$	Platform Velocity	200 m/s
$f_o$	Carrier Frequency	4.5 GHz
$L_a$	Antenna Actual Length	2 m
$X_c$	Minimum Range Distance	20 km
$X_0$	Half Target Area Width	200 m
$T_p$	Chirp Pulse Duration	2.5 $\mu$ s
$B_0$	Bandwidth	100 MHz
$\sigma_{noise}$	AWGN standard deviation	0.2 (normalized/unitless)
$a^{bins}$	Azimuth Bins	900
$b^{bins}$	Range Bins	1034

### ۴-۲. شبیه‌سازی تصویر SAR هدف نقطه‌ای

همان‌گونه که بیان شد با مشخص بودن پارامترهای مختلف سنجنده برای شبیه‌سازی داده خام یک هدف باید ماتریس دوبعدی نشان‌دهنده انعکاس داده با طول موج SAR موجود باشد. به این منظور به عنوان اولین هدف شبیه‌سازی یک هدف نقطه‌ای (هدفی که فقط یک پیکسل از صحنه را پر می‌کند) در یک تصویر خالی در نظر گرفته شد. تصویر ۸ بیتی این هدف در شکل ۷ نشان داده شده است. برای سادگی فرض شد این هدف حداکثر روشنایی را در تصویر SAR ایجاد کند و در همه جهات یکسان دیده شود.



شکل ۷. تصویر ۸ بیتی یک هدف نقطه‌ای به منظور استفاده در شبیه‌سازی تصویر SAR



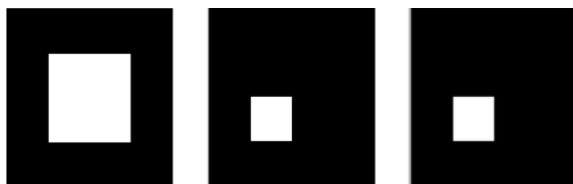
شکل ۱۲. اصلاح خمش

#### • فشردگی سازی در جهت سمت

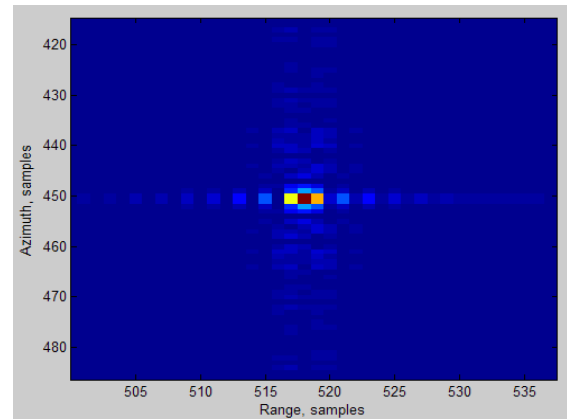
پس از اصلاح خمش و در همان فضای فوریه و در جهت آزیموت فشردگی سازی مطابق برد، با استفاده از فیلتر انطباق اعمال می‌شود. این گام نهایی تولید تصویر SAR می‌باشد. با اعمال این مرحله دقیقاً همان تصویر تک پیکسلی که مورد هدف ما بود در سنجنده SAR شبیه‌سازی شده است. در تصویر نهایی شبیه‌سازی شده نقطه‌ی هدف دارای یک پخش شدگی می‌باشد و اثرات سایه گونه‌ای از خود به جای می‌گذارد. این پدیده جزو همان محدودیت‌های SAR است که در اخذ داده دچار پدیده اکو و نهایتاً تشکیل نویز لکه یا همان اسپکل می‌شود (شکل ۱۰).

#### ۳-۴. شبیه‌سازی هدف سه بعدی در تصویر SAR

در دید سه‌بعدی از یک هدف سه سمت آن قابل دیدن است. شکل ورودی سه سوی هدف به عنوان ورودی برای تولید سیگنال از روی مقادیر درجه خاکستری آن‌ها و همچنین تعیین ارتفاع هدف استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی یک هدف سه‌بعدی ساده را در نظر گرفته‌ایم. این هدف دارای سه تصویر از سه جهت می‌باشد که در شکل ۱۳ آمده‌اند. این تصاویر به ترتیب متناظر با لایه‌های پروفیل برد و سمت در ارتفاع‌های ۱۰ و ۲ است. مدل کلی هدف مورد نظر هم در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



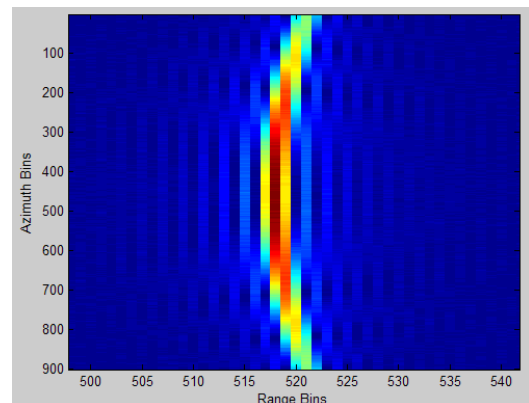
شکل ۱۳. پروفایل هدف سه بعدی



شکل ۱۰. فشردگی سازی در جهت سمت - تصویر SAR نهایی

در شکل ۱۰ سیگنال خام تولید شده در جهت برد و در مرکز آزیموت در فضای اولیه (بالایی سمت چپ)، در فضای فوریه (بالایی سمت راست)، در فضای فوریه پس از اعمال فیلتر منطبق یا همان فشردگی سازی در جهت برد (پایین سمت چپ) و در نهایت اعمال عکس تبدیل فوریه و سیگنال در فضای اولیه پس از اعمال فشردگی سازی در جهت برد (پایینی سمت راست) را نشان می‌دهد. پهن شده‌گی اولیه و تصحیح آن به خوبی در روند نشان داده شده مشخص است.

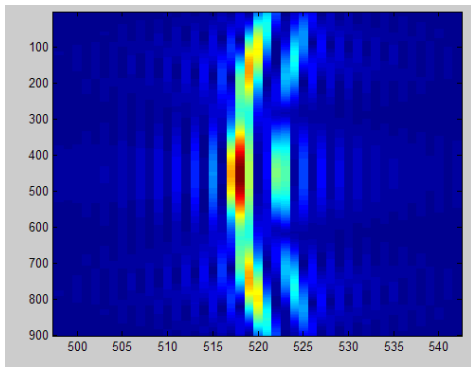
تصویر تولیدی اولیه (شکل ۸) پس از اعمال تصحیح فشردگی سازی در جهت برد در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



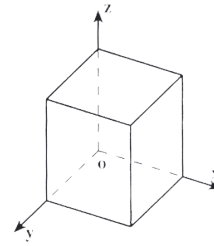
شکل ۱۱. فشردگی سازی در جهت برد

#### • اصلاح خمش

گام دوم در تبدیل فضای سیگنال به تصویر مطابق الگوریتم RDA اصلاح خمش در فضای برد-داپلر است. با تبدیل فوریه در جهت آزیموت و حفظ فضای برد انحنای موجود در مرحله قبل با اعمال مرحله RCMC حذف می‌شود (شکل ۱۲).



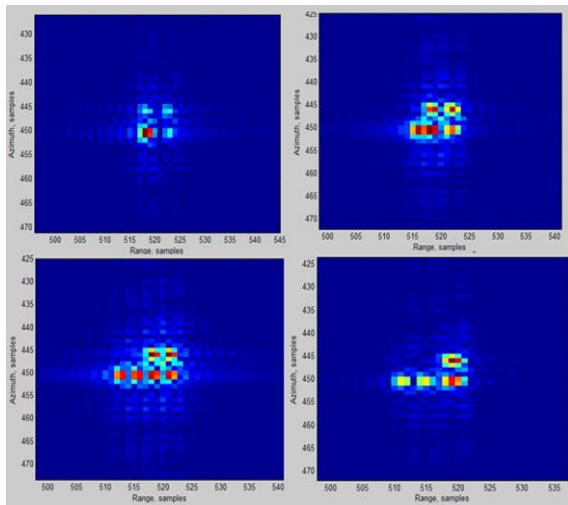
شکل ۱۶. فشرده‌سازی در جهت برد سیگنال هدف سه‌بعدی ( $\theta_l = 45^\circ$ )



شکل ۱۴. هندسه هدف سه بعدی مورد نظر

علاوه بر زاویه دید و نزدیک‌ترین فاصله در جهت برد زاویه دوران هدف می‌تواند در نظر گرفته شود که هدف را در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در صفحه آزیموت / برد دوران می‌دهد. این پارامترها نتایج ۱۴/۱۴۲۱ کیلومتر ارتفاع سکو و مقدار ۱۴/۱۴۲۱ کیلومتر کمترین فاصله در جهت برد هستند. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ فضای سیگنال داده خام SAR را برای مجموعه هدف سه‌بعدی مورد نظر قبل و پس از اعمال مرحله فشرده‌سازی در جهت برد نشان می‌دهند.

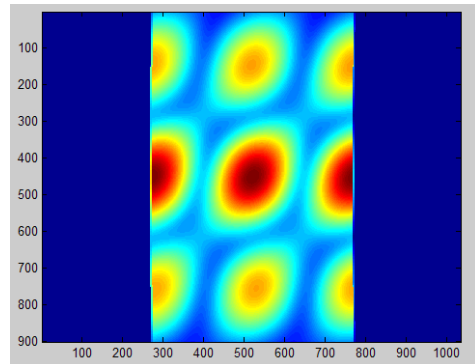
جهت مقایسه تأثیر شبیه‌سازی SAR سه‌بعدی با تغییر زوایای دید، شکل ۱۷ تصویر SAR پردازش شده برای زوایای ۰ درجه، ۲۰ درجه، ۴۵ درجه و ۶۵ درجه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشهود است که در زاویه دید ۰ درجه وجوه هدف نقطه‌هایی در بالای یکدیگر هستند و هیچ‌گونه پیچی در جهت آزیموت با تغییر زوایای دید وجود ندارد. با این حال با افزایش زاویه دید از ۰ تا ۴۵ درجه موقعیت‌های نقاط هدف در تصویر نهایی در جهت برد با توجه به ارتفاعشان از هم جدا شده‌اند. از زاویه ۴۵ تا ۶۰ درجه هدف نقاط در پیچ‌وتاب همان ارتفاع به یکدیگر نزدیک هستند. یک توضیح برای این موضوع این است که وقتی انتشار پرتو ارتفاع بر روی انتشار پرتو برد گسترده شده است، تفکیک‌پذیری در جهت برد بدتر می‌شود.



شکل ۱۷. تصویر نهایی SAR هدف سه‌بعدی در حالت‌های مختلف (بالا-چپ:  $\theta_l = 0^\circ$ ، بالا-راست:  $\theta_l = 20^\circ$ ، پایین-چپ:  $\theta_l = 45^\circ$ ، پایین-راست:  $\theta_l = 60^\circ$ )

#### ۴-۴. شبیه‌سازی تصویر SAR مدل سه‌بعدی یک ساختمان و مقایسه با نظیر آن در تصویر

ساختمان مورد نظر برای شبیه‌سازی سقفی شیب‌دار دارد. بنابراین، سقف ساختمان با توجه به نحوه دید سنجنده دو قسمت دارد. سمت ساختمان به طرف سنجنده و سوی مقابل آن. پراکنش از سمت ساختمان که در طرف سنجنده می‌باشد قوی‌تر است پس این منطقه در مدل پیشنهادی روشن‌تر از طرف مقابل آن خواهد بود (شکل ۱۸-الف). وجه عمود بر زمین و بزرگ‌تر ساختمان هم با رنگی روشن نشان دهنده پراکنش قوی آن است (شکل ۱۸-ب). سمت کوچک‌تر ساختمان اما وضعیت متفاوتی دارد و با توجه به توجیه ساختمان با توجه به زاویه فرود امواج ماکروویو از پراکنش ضعیف‌تری برخوردار است (شکل ۱۸-ج).



شکل ۱۵. سیگنال خام اولیه هدف سه‌بعدی ( $\theta_l = 45^\circ$ )

#### ۴-۵. مدل سازی ماتریس پراکنش پلاریمتری

کانال های پلاریمتری از قطبش های خطی تشکیل شده اند (یعنی پارامتر نشان دهنده بیضی بودن  $T = 0$ ) که متناسب با جهتشان با محور افقی ( $\varphi$ ) به صورت افقی و یا عمودی هستند. در نتیجه با اعمال دو مقدار فوق در امواج فرودی (سیگنال مرجع) و امواج بازپراکنشی (شبیه سازی شده از سوی هدف) مطابق جدول ۲ کانال های پلاریمتری تشکیل می شوند.

برای اضافه کردن دانش پلاریمتری نیاز به دانش درباره نوع هندسه هدف و یا همان نوع بازپراکنش راداری آن است. که می تواند به طور خالص از هر یک از بازپراکنش های راداری پایه (حجمی، سطحی، دوسطحی، دوقطبی و ...) تشکیل شده باشد. به عبارت دیگر سهم هر پراکنش خالص در هدف مورد نظر باید با توجه به خصوصیات هندسی آن هدف شبیه سازی شود.

#### جدول ۲. نحوه تعیین پارامترهای پلاریمتری به امواج فرودی و

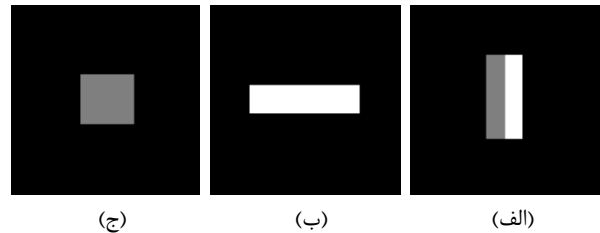
شبیه سازی شده پراکنش یافته برای تشکیل کانال ها

نام کانال	قطبش موج فرودی	قطبش موج بازپراکنش شده
$S_{hh}$	$\varphi_I = 0$	$\varphi_B = 0$
$S_{hv}$	$\varphi_I = 0$	$\varphi_B = 90$
$S_{vh}$	$\varphi_I = 90$	$\varphi_B = 0$
$S_{vv}$	$\varphi_I = 90$	$\varphi_B = 90$

#### • اعمال روش MP برای تشکیل ماتریس پراکنش

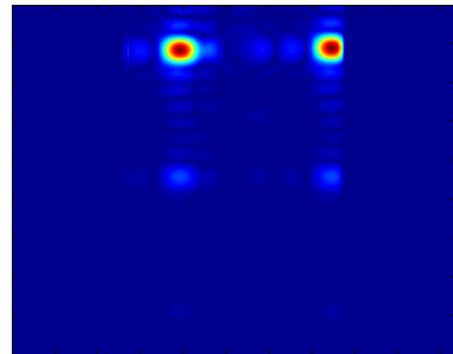
پراکنش سطحی: این مکانیسم ساده ترین نوع پراکنش هست که بازپراکنش حاصل از برخورد موج به یک سطح است. به این نوع پراکنش Single-bounce یا Odd-bounce گفته می شود. برای مثال پراکنش ناشی از برخورد موج با سطح آب ها، زمین بایر و سقف ساختمان ها از این دسته می باشند. در هدف های استاندارد اهدافی همچون یک هدف کروی<sup>۱</sup>، صفحه ای تخت<sup>۲</sup> و یا سه وجهی<sup>۳</sup> پراکنشی به صورت سطحی دارند. ماتریس پراکنش این اهداف در پایه قطبش کارترین ماتریس یکه است [۱۰].

در صورتی که این نوع پراکنش برای مدل تقاطع با کانال های محاسبه شده در بخش قبل در نظر گرفته شود آن گاه پارامترهای مختلف روش MP به صورتی خواهد بود که تنها پراکنش سطحی وجود داشته باشد. علاوه بر این باید ساختار ماتریس پراکنش به شکل سطحی باشد. به عبارت دیگر ضریب پراکنش در کانال hv و vh که در پراکنش حجمی وجود دارند باید صفر باشد. ضرایب موثر در تولید ماتریس پراکنش یک هدف سطحی در جدول ۳ آمده است. حجمی: این نوع مکانیسم پراکنش همراه با تغییر و بی نظمی در اطلاعات قطبش است. در واقع در این نوع مکانیسم پراکنش سهم کانال hv بیش از کانال های دیگر است. در طبیعت

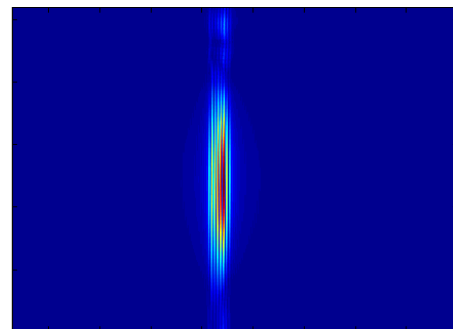


شکل ۱۸. مدل یک ساختمان. الف) مدل سقف ساختمان، ب) مدل وجه بزرگ تر و در سمت سنجنده، ج) مدل وجه کوچکتر ساختمان

با استفاده از روش پیشنهادی برای شبیه سازی اهداف سه بعدی و با استفاده از پارامترهای معرفی شده تصویر SAR این ساختمان شبیه سازی شده است. با در نظر گرفتن زاویه توجیه صفر برای ساختمان شبیه سازی انجام شده است. شکل ۱۹ سیگنال خام را نشان می دهد. پس از تصحیحات و تبدیلات روش RDA تصویر این ساختمان حاصل می شود (شکل ۲۰). پارامتر SAM برای ارزیابی میزان شباهت روش پیشنهادی با تصویر واقعی SAR ساختمان مقدار ۰/۳۸ برآورد شد. اختلاف داده شبیه سازی شده با داده واقعی یک ساختمان در تصویر قابل قبول است چراکه وضعیت فیزیکی یک ساختمان دارای پیچیدگی های بیشتری از مدل پیشنهادی می باشد همچنین زاویه توجیه ساختمان نسبت به سنجنده هم به صورت تقریبی صفر در نظر گرفته شده است. همه این دلایل نشان می دهد به طور کلی روش پیشنهادی در مدل سازی عملکرد سنجنده SAR در اخذ داده از یک ساختمان به صورت سه بعدی عملکرد مناسبی داشته است.



شکل ۱۹. سیگنال SAR شبیه سازی شده



شکل ۲۰. تبدیل سیگنال به تصویر

<sup>1</sup> Sphere

<sup>2</sup> Flat plate

<sup>3</sup> Trihedral

از هدف می‌باشد. در تشکیل فضای سیگنال به روش پیشنهادی این تحقیق پارامترهایی نظیر تعداد نمونه‌های برد و سمت، مدت‌زمان اخذ داده، فرکانس موج ماکروویو، فرکانس تکرار پالس، سرعت سکوی سنجنده، مدت‌زمان چیرپ و انحراف معیار نویز اسپکل از طرف سنجنده مدل و تأثیرشان بر تصویر SAR تعیین می‌شود. خصوصیات متفاوت هدف در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی در مرحله تشکیل سیگنال مدل‌سازی می‌شود. پارامترهایی نظیر نصف عرض منطقه‌ی هدف، کمترین فاصله در جهت برد تا هدف و تصویر ۸ بیتی به‌عنوان نماینده‌ای از خصوصیات انعکاسی هدف از جمله این متغیرهای مدل‌سازی شده در حالت‌های دوبعدی و سه‌بعدی هستند. فاصله اریب تا هدف، زاویه دید و زاویه بین فاصله اریب و صفحه صفر داپلر نیز از جمله پارامترهایی هستند که در مدل‌سازی تصویر SAR هدف‌های سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شوند.

فرکانس انتشار موج، سرعت انتشار موج و طول موج انتشار موج در محیط نیز از جمله عوامل مؤثر از سمت محیط هستند که در تشکیل تصویر SAR پراهمیت و در مدل‌سازی پیشنهادی لحاظ شده است. در این تحقیق روشی برای مدل کردن اطلاعات پلاریمتری در قالب ماتریس پراکنش ارائه شد. بر اساس روش پیشنهادی که بر مبنای روش MP می‌باشد ساختار ماتریس پراکنش بر اساس برخی خصوصیات هدف‌ها مربوط می‌شود. در روش پیشنهادی سطح مؤثر هدف، عمق نفوذ مؤثر در اهداف حجمی، حجم مؤثر هدف و توجیه هدف نسبت به موج فرودی از جمله پارامترهای هدف هستند که در تعیین نوع پراکنش داده پلاریمتری است.

## ۶. مراجع

- [1] Y. Q. Jin and F. Xu, "Polarimetric Scattering and SAR Information Retrieval," John Wiley & Sons, 2013.
- [2] C. Camporeale and G. Galati, "Digital Computer Simulation of Synthetic Aperture Systems and Images," European Transactions on Telecommunications, vol. 2, pp. 343-352, 1991.
- [3] J. C. Holtzman, V. S. Frost, J. L. Abbott, and V. H. Kaupp, "Radar Image Simulation," IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. 16, pp. 296-303, 1978.
- [4] R. K. Raney and G. J. Wessels, "Spatial Considerations in SAR Speckle Consideration," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, pp. 666-672, 1988.
- [5] C. Brown, K. Sarabandi, and M. Gilgenbach, "Physics-Based Simulation of High-Resolution Polarimetric SAR Images of Forested Areas," In proc. of the Geoscience and Remote Sensing Symposium 2002, pp. 466-468, 2002.
- [6] G. Franceschetti, M. Migliaccio, D. Riccio, and G. Schirrinzi, "SARAS: A Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30, pp. 110-123, 1992.

عوارضی همچون جنگل‌ها و پوشش‌های گیاهی عامل ایجاد پراکنش حجمی می‌باشند. ضرایب مؤثر در روش MP مطابق جدول ۳ است.

پراکنش دوسطحی: در این حالت موج ابتدا به یک شیء عمودی (افقی) برخورد کرده سپس به سمت یک سطح افقی (عمودی) بازتاب می‌شود و در نهایت به سمت آنتن روانه می‌شود. نمونه‌ی بارز این نوع مکانیسم، برخورد موج با دیوار (سطح زمین)، سپس بازتاب به سطح زمین (دیوار) و سپس بازتاب به سمت آنتن می‌باشد. همچنین برخورد موج به تنه‌ی درختان و سپس بازتاب به سطح زمین و روانه شدن به سمت آنتن نیز در این دسته مکانیسم پراکنش قرار می‌گیرد. به این نوع پراکنش double-bounce یا even-bounce گفته می‌شود. ماتریس پراکنش یک دوسطحی افقی مطابق رابطه (۳۳) است [۱۰].

$$S^{Dihedral} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

درباره هدف دوسطحی زاویه توجیه مهم است. از این رو ماتریس پراکنش یک دوسطحی با زاویه توجیه  $\emptyset$  مطابق رابطه (۳۴) است [۱۰].

$$S = \begin{bmatrix} \cos 2\emptyset & \sin 2\emptyset \\ \sin 2\emptyset & -\cos 2\emptyset \end{bmatrix} \quad (34)$$

همان‌طور که مشخص است پارامترهای توجیه و سطح مؤثر در تشکیل یک ماتریس پراکنش برای هدف دوسطحی مؤثر است (جدول ۳ را ببینید).

جدول ۳. پارامترهای مؤثر برای هدف‌های مختلف در تشکیل

ماتریس پراکنش

نماد پارامتر	توصیف	سطحی	حجمی	دوسطحی
$V_{ef}$	حجم مؤثر	۰	$V_{ef} > 0$	۰
$d_{ef}$	عمق نفوذ (متناسب با میرایی)	۰	$d_{ef} \geq 0$	۰
$a_{ef}$	سطح مؤثر	$a_{ef} > 0$	0	$a_{ef} > 0$
$\emptyset$	توجیه هدف	بی‌تأثیر	بی‌تأثیر	$\emptyset \geq 0$

## ۵. نتیجه‌گیری

روش پیشنهادی این تحقیق برای شبیه‌سازی تصویر SAR و مدل‌سازی ماتریس پراکنش پلاریمتری در سه بخش کلی جای می‌گیرد. در بخش نخست با استفاده از اطلاعات سنجنده و همچنین یک تصویر ۸ بیتی به‌عنوان نماینده‌ای از خصوصیات هدف، سیگنال خام تولید می‌شود. در بخش دوم، برای تشکیل تصویر SAR منطقه، نگاشتی از این فضای سیگنالی به فضای تصویر انجام می‌گردد. الگوریتم RDA در سه بخش فشرده‌سازی در جهت برد، اصلاح خمش و فشرده‌سازی در جهت سمت برای این مرحله در نظر گرفته شده است. بخش سوم روش مربوط به افزودن اطلاعات پلاریمتری به کانال‌های پلاریمتری تصویر SAR

- [7] M. J. Collins and J. M. Allan, "Modeling and Simulation of SAR Image Texture," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, pp. 3530-3546, 2009.
- [8] B. Zaharris, "Two-dimensional Synthetic Aperture Radar Imaging and Moving Target Tracking using the Range Doppler Algorithm Simulated in MATLAB: A Thesis," California Polytechnic State University, 2007.
- [9] J. C. Curlander and R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar, John Wiley & Sons, 1991.
- [10] J. S. Lee and E. Pottier, "Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications," CRC press, 2009.
- [11] F. Xu and Y.Q. Jin, "Imaging Simulation of Polarimetric SAR for a Comprehensive Terrain Scene using the Mapping and Projection Algorithm," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, pp. 3219-3234, 2006.
- [12] K. Tragl, "Polarimetric Radar Backscattering from Reciprocal Random Targets," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, pp. 856-864, 1990.
- [13] F. Kruse, A. Lefkoff, J. Boardman, K. Heidebrecht, A. Shapiro, and P. Barloon, "The Spectral Image Processing System (SIPS)—Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data," Remote sensing of environment, vol. 44, pp. 145-163, 1993.

Archive of SID

---

## **Simulation of SAR Images and Polarimetric Scattering Model of Three-Dimensional Targets**

**M. Jafari, S. Khazaei\***

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 15/11/2015, Accepted: 01/08/2016)

### **Abstract**

In recent years, synthetic aperture radar (SAR) images have played an important role in the detection and monitoring of ground targets because of their advantages such as independence from climatic conditions and sensitivity to the target geometry. The complexity of SAR imaging sensors, especially in the conversion process from raw data to image, has made it difficult to interpret the behavior of sensors and their images. Hence, using the simulation of SAR images can be effective in resolving this problem. In this regard, SAR image simulation of three-dimensional objects is an essential step. In this paper, a method is presented to simulate SAR images of three-dimensional targets and, thus, the polarimetric scattering matrix for pure and distributed targets is developed. Also, the effects of sensor parameters and the geometry of target are investigated in simulating the SAR images of 3D targets.

**Keywords:** Simulation, Polarimetric SAR Himage, 3D Targets, Scattering Model

---

\* Corresponding author E-mail: skhazai@ihu.ac.ir