

# بررسی عملکرد یک الگوریتم پردازش سیگنال در یک سیستم رادار زمینی با روزه ترکیبی در محیط شبیه‌سازی شده

سید بنیامین حسینی<sup>۱</sup>، جلال امینی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

ben.hosseiny@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

jamini@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۷)

## چکیده

امروزه سیستم‌های تصویربرداری رادار روزه مصنوعی در مسائل گوناگونی از جمله سنجش‌ازدور کاربرد دارند. جهت استفاده از سیگنال دریافتی سیستم SAR نیاز به پردازش سیگنال خام دریافت‌شده و ایجاد سیگنال تصویر مختلط تک‌منظر (SLC)<sup>۱</sup>. از جمله کاربردی‌ترین این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم RMA اشاره کرد. این الگوریتم مختص سیستم‌های تصویربرداری فضا برد و هوا برد است. با این حال ویژگی‌های این الگوریتم باعث شده تا در کاربردهای برد کوتاه نیز نتایج مناسبی داشته‌باشد. در این مقاله عملکرد این الگوریتم بر یک سیستم تصویر برداری رادار روزه ترکیبی زمینی با برد خیلی کوتاه مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم Range Migration بر چندین هدف شبیه‌سازی شده طبق شرایط مورد نظر اجرا و در نهایت طبق معیارهای PSLR و ISLR مورد بررسی قرار گرفت. طبق این دو معیار، مقدار میانگین PSLR در راستای برد برابر با ۱۳/۱۱۴۳- دسی‌بل و در راستای آزیموت برابر با ۱۳/۲۱۵۳- دسی‌بل و مقدار میانگین ISLR در راستای برد برابر با ۵/۹۷۲۶- دسی‌بل و در راستای آزیموت برابر با ۶/۱۱۵۹- دسی‌بل گردید. با مقایسه نتایج حاصل با حالات تصویربرداری با برد بلندتر می‌توان به عملکرد مناسب و قابل قبول الگوریتم RMA برای سیستم‌های تصویربرداری با برد خیلی کوتاه پی‌برد.

**واژگان کلیدی:** رادار روزه ترکیبی، SAR، پردازش سیگنال، تشکیل تصویر، سکوی زمینی، Range Migration Algorithm

\* نویسنده رابط

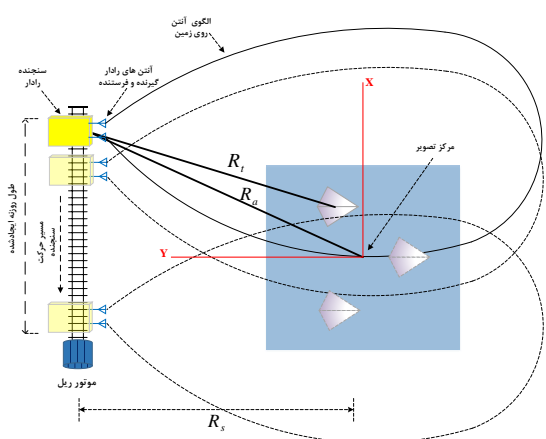
<sup>۱</sup> Single-Look Complex

۱- مقدمه

بسیار بالا و ساختار نسبتاً ساده‌تری دارند [۱]-[۳] با بررسی الگوریتم‌های متنوع تشکیل تصویر و پردازش سیگنال در حوزه زمان یا فرکانس در سیستم تصویربرداری رادار روزنه ساختگی، الگوریتم RMA را به‌عنوان الگوریتم برتر و مناسب‌ترین الگوریتم انتخاب می‌کنند.

در حال حاضر الگوریتم Range Migration دارای کاربرد فراوانی در پردازش سیگنال رادار روزنه ترکیبی با کیفیت و سرعت بالا دارد. [۳]، [۴] به ایجاد تصویر از سیستم‌های رادار روزنه ترکیبی و افزایش متمرکزسازی اهداف با بهره‌گیری از الگوریتم RMA می‌پردازند. در [۵] از الگوریتم RMA برای کشف اهداف متحرک توسط سیستم تصویربرداری رادار روزنه ترکیبی استفاده می‌شود در مقاله پیشرو، با کمک معادله سیگنال بازتابی از اهداف، طی تصویربرداری رادار روزنه ترکیبی در یک سکوی زمینی و بهره‌گیری از الگوریتم پردازش سیگنال RMA به بررسی نحوه متمرکزکردن اهداف و ایجاد تصویر خام از سیگنال‌های رادار بازتاب‌شده از اهداف پرداخته می‌شود.

در ادامه، در بخش ۲، هندسه تصویربرداری یک سیستم SAR زمینی بیان می‌گردد. بخش ۳ به نحوه تشکیل تصویر این سیستم می‌پردازد. در بخش ۴ نتایج و ارزیابی آن‌ها صورت می‌گیرد و در بخش ۵ نتیجه‌گیری حاصل از این مقاله بیان می‌گردد.



شکل ۱- نحوه تصویربرداری سیستم رادار روزنه ترکیبی زمینی

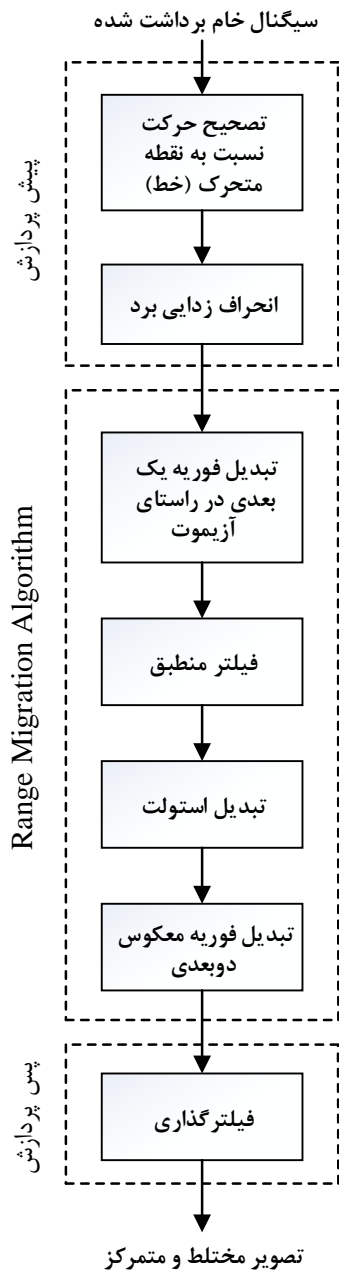
امروزه سیستم‌های تصویربرداری رادار روزنه ترکیبی در مسائل گوناگونی از جمله سنجش‌ازدور کاربرد دارند. برتری اصلی سیستم رادار روزنه ترکیبی<sup>۱</sup> (SAR) نسبت به سیستم‌های رادار معمولی را می‌توان در قدرت تفکیک مکانی بالای آن در راستای آزیموت دانست. این برتری با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال و با بهره‌گیری از هندسه تصویربرداری خاص این نوع سیستم تصویربرداری به‌وجود می‌آید. از جمله ویژگی‌های اصلی دیگر سیستم-های تصویربرداری رادار توانایی نفوذ بالا در سطوح مختلف مانند پوشش ابر و خاک است. این قدرت نفوذ بالا باعث گردیده تا شرایط جوی متفاوت مانند وجود ابر و بارش باران و برف بر انتشار امواج ارسالی و دریافتی در سکوهایی هوایی و ماهواره‌ای تاثیر بسیار ناچیزی داشته‌باشند. توانایی نفوذ در اجسام مختلف مانند پوشش‌های گیاهی و خاک نیز باعث‌گردیده تا بتوان به استخراج ویژگی‌های فیزیکی مربوط به سطوح مختلف پرداخت. توانایی ارسال و تولید سیگنال در سیستم‌های تصویربرداری رادار نیز امکان تصویربرداری را در هر لحظه از شبانه روز فراهم کرده‌است. هر پیکسل تصویر نهایی دارای اطلاعات فاز و دامنه مجزا است که به‌شکل مختلط با دو قسمت حقیقی و موهومی ذخیره می‌شود. ویژگی‌های ذکرشده برای تصاویر رادار روزنه ترکیبی باعث‌گردیده تا کاربردهای فراوانی در زمینه-های مختلف سنجش‌ازدور از جمله تهیه مدل رقومی ارتفاعی، طبقه‌بندی، کشف تغییرات، بررسی جابجایی‌های پوسته زمین، بررسی رطوبت خاک، بررسی زیست‌توده داشته‌باشند.

الگوریتم‌های پردازش سیگنال متفاوتی با هدف رسیدن به تصویر متمرکز از سیگنال خام توسعه یافته‌اند. بطور کلی می‌توان روند کار این الگوریتم‌ها را به دو حوزه زمان و فرکانس تقسیم‌بندی نمود. الگوریتم‌هایی مانند TDC<sup>۲</sup> و Back projection که در حیطه زمان هستند با وجود دقت بسیار بالا، سرعت بسیار پایین و بار محاسباتی زیادی دارند. در مقابل الگوریتم‌هایی که در حیطه فرکانس فعالیت می‌کنند مانند RDA<sup>۳</sup>، PFA<sup>۴</sup>، CSA<sup>۵</sup> و RMA<sup>۶</sup> سرعت عمل

۱ Synthetic Aperture Radar  
 ۲ Time Domain Correlation  
 ۳ Range-Doppler Algorithm  
 ۴ Polar Format Algorithm

۵ Chirp Scaling Algorithm  
 ۶ Range Migration Algorithm

مختلط و در نهایت ایجاد تصویر دامنه از اهداف متمرکز شده، بیان می‌گردد. در شکل ۲ این فرایند به شکل کلی و در سه بخش اصلی پیش‌پردازش سیگنال‌های خام دریافتی، پردازش سیگنال آماده‌شده و در نهایت مرحله پس‌پردازش و ایجاد تصویر متمرکز شده اهداف بیان می‌گردد.



شکل ۲- فرایند پردازش سیگنال رادار روزنه ترکیبی و تشکیل تصویر

الگوریتم منتخب این مقاله برای پردازش سیگنال‌های SAR، الگوریتم RMA است. خصوصیات و مراحل تشکیل-دهنده الگوریتم RMA باعث می‌شود که این الگوریتم برای شرایط تصویربرداری که دارای نوسانات در منحنی برد هستند، بسیار مناسب و کارآمد باشد. این شرایط معمولاً در

## ۲- هندسه یک سیستم زمینی راداری با روزنه ترکیبی

بطور کلی سیستم‌های SAR هندسه تصویربرداری مشابهی را دارا هستند. در اینجا بطور خاص به نحوه و فرایند تصویربرداری سیستم رادار روزنه ترکیبی در سکوی زمینی (GB-SAR)<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود.

در سیستم رادار روزنه ترکیبی زمینی، سیستم تصویربرداری بر روی یک ریل سوار است و در یک مسیر مشخصی (معمولاً مستقیم) روی آن به حرکت می‌پردازد و در حین حرکت ارسال و دریافت سیگنال صورت می‌گیرد. بدین صورت که سنجنده بصورت خودکار با فواصل مکانی مشخصی ( $\Delta x$ ) بر روی ریل حرکت و سپس توقف کرده و به ارسال و دریافت سیگنال می‌پردازد. سپس سنجنده دوباره شروع به حرکت کرده و در موقعیت بعدی روی ریل قرار می‌گیرد و فرایند برداشت را تکرار می‌کند. این فرایند تا رسیدن سنجنده به نقطه نهایی در انتهای ریل و برداشت پروفیل برد راستای نهایی ادامه می‌یابد. در نتیجه داده‌های برداشت‌شده توسط آنتن گیرنده در پروفیل‌های برد متوالی در یک آرایه دو بعدی  $s(x_n, t)$  ذخیره می‌گردند. این ماتریس شامل اطلاعات مربوط به پروفیل‌های برد برداشت-شده توسط آنتن گیرنده است و  $x_n$  بیانگر موقعیت  $n$  ام قرارگیری سنجنده بر روی ریل است [۶].

شکل ۱ هندسه تصویربرداری یک سیستم GB-SAR را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایان است، سیستم رادار در فاصله  $R_s$  از مرکز صحنه تصویر قرار دارد. سیستم رادار با حرکت بر ریلی به طول  $L$  باعث ایجاد آنتنی تحلیلی به این طول برای سیستم رادار، پس از فرایند پردازش سیگنال، می‌شود و بدین ترتیب یک سیستم تصویربرداری SAR ایجاد می‌گردد.  $R_a$  و  $R_t$  به ترتیب بیانگر، فاصله سنجنده در هر نقطه‌ای که از ریل قرار می‌گیرد، با مرکز صحنه تصویربرداری و یک هدف نقطه‌ای هستند.

## ۳- الگوریتم تشکیل تصویر در یک سیستم SAR

در این بخش روند تشکیل تصویر خام از ابتدایی‌ترین مرحله یعنی سیگنال برداشت‌شده توسط آنتن گیرنده سنجنده تا اعمال الگوریتم پردازش سیگنال و ایجاد تصویر

<sup>۱</sup> Ground-Based Synthetic Aperture Radar

### ۳-۲- فرایند تشکیل تصویر (IFP)\*

فرایند تشکیل تصویر توسط الگوریتم RMA شامل چهار مرحله اصلی تبدیل فوریه یک بعدی، اعمال فیلتر منطبق<sup>۵</sup>، تبدیل استولت<sup>۶</sup>، و تبدیل فوریه معکوس دوبعدی است. در ادامه به توضیح هر مرحله پرداخته می‌شود.

### ۳-۲-۱- تبدیل فوریه در راستای آزیموت

اولین مرحله در الگوریتم RMA، تبدیل فوریه از ماتریس داده ورودی در راستای حرکت سنجنده (آزیموت) است. در IFP این مرحله قبل از فشرده‌سازی در راستای برد و حذف چرپ سیگنال در راستای آزیموت صورت می‌پذیرد. در حوزه‌ی عدد موج<sup>۷</sup>، تصویر الگوریتم RMA در صفحه مایل  $K_X K_Y$  تشکیل می‌شود. این حوزه در شکل (۳) نمایش داده شده است.  $K_Y$  پس از تبدیل استولت<sup>۸</sup> بدست می‌آید.  $K_R$  بیانگر فرکانس مکانی برد<sup>۹</sup> و  $K_X$  بیانگر فرکانس مکانی آزیموت<sup>۱۰</sup> است. در سیگنال SAR مقدار فرکانس مکانی برد برابر با حاصل ضرب فرکانس سیگنال با مقدار ثابت  $\frac{4\pi}{c}$  است و واحد آن رادیان بر طول واحد است و در بازه  $\frac{4\pi(f_c - B/2)}{c}$  تا  $\frac{4\pi(f_c + B/2)}{c}$  تغییر می‌کند. مقدار  $K_X$  به منفی فرکانس داپلر وابسته است و واحد آن نیز رادیان بر طول واحد است. پس از تبدیل فوریه سیگنال در راستای جهت، محدوده مقدار  $K_X$  در بازه  $\frac{-\pi}{\Delta x}$  تا  $\frac{\pi}{\Delta x}$  قرار می‌گیرد.  $\Delta x$  بیانگر قدم‌های حرکتی سنجنده در مسیر پرواز است.

معادله نهایی سیگنال بعد از تبدیل فوریه در راستای جهت به شکل زیر می‌شود:

$$S(K_X, K_R) = a_t e^{-j\Phi_{AFT}(K_X, K_R)} \quad (5)$$

$$\Phi_{AFT}(K_X, K_R) = -K_X X_t - R_B \sqrt{K_R^2 - K_X^2} + K_R R_S \quad (6)$$

تصویربرداری از صحنه‌های بزرگ با قدرت تفکیک بالا، تصویربرداری با برد کوتاه، و تصویربرداری با فرکانس میانی پایین وجود دارند. ویژگی و برتری اصلی این الگوریتم در توانایی برطرف کردن این مشکل است. در این بخش به بررسی مرحله به مرحله الگوریتم RMA، پرداخته می‌شود. این الگوریتم بصورت خاص در کاربردهای فضابرد و هوابرد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]، [۸]. با این حال با توجه به خصوصیات آن در اینجا بر سنجنده‌ای زمینی و با برد کوتاه مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- مدل داده سیگنال‌های خام ورودی

مدل سیگنال ورودی الگوریتم RMA، برای هدف نقطه‌ای واقع در موقعیت  $(X_t, Y_t, Z_t)$ ، طبق هندسه شکل ۱، بصورت رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$s_{rd}(x_n, \hat{t}) = A_{rd} e^{j\Phi_{rd}(x_n, \hat{t})} \quad (1)$$

$$A_{rd} = a_t \text{rect}\left(\frac{X_a - X_{ac}}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_s/c}{T_p}\right) \quad (2)$$

$$\Phi_{rd}(x_n, \hat{t}) = -\frac{4\pi c_r}{c} \left[ \frac{f_c}{c_r} + \hat{t} - \frac{2R_s}{c} \right] (R_t - R_s) \quad (3)$$

در رابطه بالا  $c_r$  بیانگر نرخ چرپ<sup>۱</sup> سیگنال مدوله شده است و از نسبت پهنای باند و طول پالس ارسالی محاسبه می‌شود. در مدل سیگنال بیان شده، با تاکید بر تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا، اثر انحراف برد<sup>۲</sup> (فاز ویدیویی باقیمانده<sup>۳</sup>) طبق [۸] حذف شده است.

شکل تعمیم یافته رابطه ۱ برای N پراکنده‌گر، براساس مجموع هر کدام از پراکنده‌گرهای موجود، بصورت زیر بدست می‌آید [۶]:

$$s_{rd}(x_n, \hat{t}) = \sum_{i=1}^N A_{rd_i} e^{j\Phi_{rd_i}(x_n, \hat{t})} \quad (4)$$

آرایه دوبعدی  $s_{rd}$  به شکل مختلط است و هر سلول دارای فاز و دامنه است.

\* Image Formation Processor

۵ Matched Filter

۶ Stolt transform

۷ Wavenumber space

۸ Stolt transform

۹ Range spatial frequency

۱۰ Azimuth spatial frequency

۱ Chirp rate

۲ Range deskew

۳ Residual Video Phase (RVP)

### ۳-۲-۴- تبدیل فوریه معکوس دوبعدی

در مرحله آخر الگوریتم RMA، به منظور بازگشت به فضای تصویر، نیاز به اعمال تبدیل فوریه معکوس دوبعدی به سیگنال بدست آمده در مرحله قبل است. برای این منظور، بخشی (مستطیل شکل) از داده منحنی شکل بدست آمده بر اثر تبدیل استولت را انتخاب کرده و با اعمال تبدیل فوریه معکوس دوبعدی از حوزه سیگنال  $S_3(K_X, K_Y)$  به حوزه  $S(X, Y)$  منتقل می شویم. بدین ترتیب تصویر متمرکز در هر دو راستای جهت و برد از داده رادار روزنه ترکیبی تشکیل می گردد.

### ۳-۳- اعمال تابع هان

جهت کاهش اثرات گلبرگ های کناری بر گلبرگ اصلی اهداف و در کل کاهش نویز تصویر می توان از پنجره (تابع) هان<sup>۱</sup> طبق رابطه ۱۱ استفاده کرد. اعمال این پنجره به سیگنال باعث می گردد تا اثرات گلبرگ های کناری<sup>۲</sup>، پهنای پرتو<sup>۳</sup> و SNR<sup>۴</sup> حالت متعادلی پیداکنند [9], [10].

$$W_{Hann}(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 * \cos\left(\frac{2n}{N}\pi\right) & ; 0 \leq n \leq N \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (11)$$

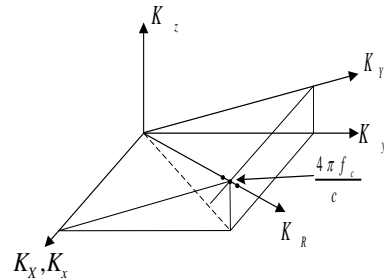
در این رابطه  $N$  بیانگر تعداد نمونه های سیگنال در راستای موردنظر است.

### ۳-۴- تصویر دسی بل

جهت نمایش تصویر نهایی ایجاد شده در یک سیستم مرجع، مقادیر شدت بدست آمده در تصویر نهایی به واحد دسی بل تبدیل می شوند. این تبدیل طبق رابطه (۱۲) صورت می گیرد.

$$\sigma_{(dB)} = 10 \log_{10} I \quad (12)$$

در رابطه بالا  $I$  بیانگر میزان شدت بدست آمده در هر نقطه از تصویر است که از مجموع مجذور قسمت موهومی و حقیقی هر پیکسل از تصویر مختلط بدست می آید.



شکل ۳- حوزه عدد موج: حوزه ی تشکیل تصویر در الگوریتم RMA

### ۳-۲-۲- فیلتر منطبق

مرحله دوم، اعمال تصحیحات فاز دو بعدی، تحت عنوان فیلتر منطبق، برای سیگنال بدست آمده از مرحله قبل است. این عمل گر، انحنای برد تمامی پراکنده گرهای که دارای برد  $R_s$  هستند را برطرف می کند. همچنین با اعمال فیلتر منطبق، چرپ آزمون سیگنال حذف می شود. فیلتر منطبق بصورت زیر تعریف می شود:

$$mf(K_X, K_R) = e^{j(-K_R R_s + R_s) \sqrt{K_R^2 - K_X^2}} \quad (7)$$

پس از ضرب فیلتر منطبق در سیگنال بدست آمده از مرحله قبل رابطه معادله سیگنال جدید بصورت زیر تغییر می کند:

$$S_2(K_X, K_R) = a_t e^{-j[K_X X_t + (R_B - R_s) \sqrt{K_R^2 - K_X^2}]} \quad (8)$$

### ۳-۲-۳- تبدیل استولت

مرحله سوم در الگوریتم RMA، اعمال تبدیل استولت است. با اعمال این تبدیل به سیگنال SAR، بصورت یکجا انحنای برد تمام پراکنده گرها برطرف می گردد. تبدیل استولت از تابع سیگنال در حوزه  $(K_X, K_R)$  استفاده می کند و با استفاده از تبدیل رابطه ۹ آن را در حوزه  $(K_X, K_Y)$  تصویر می کند.

$$K_Y = \sqrt{K_R^2 - K_X^2} \quad (9)$$

اعمال تبدیل بالا باعث می شود سیگنال مطلوب به شکل رابطه ۱۰ بدست آید:

$$S_3(K_X, K_Y) = a_t e^{-j[K_X X_t + K_Y (R_B - R_s)]} \quad (10)$$

۱ Hann(ing) window  
۲ Sidelobe  
۳ Beamwidth  
۴ Signal to Noise Ratio

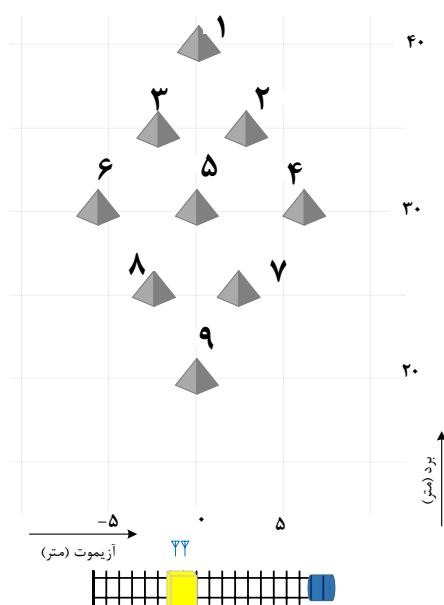
#### ۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش در ابتدا به بیان مشخصات داده استفاده شده و بعد به پیاده‌سازی آن طبق الگوریتم گفته شده و ایجاد تصویر پرداخته می‌شود. در نهایت نیز نتایج بدست آمده ارزیابی می‌شوند.

##### ۴-۱- مشخصات داده پیاده‌سازی

مشخصات کامل داده شبیه‌سازی شده و سیستم تصویربرداری در جدول ۱ نمایش داده شده است. آنتن‌های گیرنده و فرستنده این سیستم در باند S و با فرکانس میانی ۲/۴۵ گیگاهرتز با، پهنای باند ۱۰۰ مگاهرتز، به ارسال و دریافت امواج می‌پردازند. سایر مشخصات اساسی یک سیستم SAR زمینی مانند طول پالس، طول روزنه ساختگی، فواصل (قدم‌های) حرکت سنجنده در راستای آزیموت و فاصله سیستم تا مرکز صحنه تصویربرداری در جدول ۱ بیان شده است.

برای جامعیت بخشیدن به بررسی عملکرد الگوریتم، بطورکلی ۹ هدف نقطه‌ای با موقعیت‌های مکانی متفاوت در صفحه تصویر در نظر گرفته شده است. موقعیت قرارگیری هر هدف و فاصله آن‌ها با سیستم تصویربرداری نسبت به برد و آزیموت در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- موقعیت قرارگیری اهداف نقطه‌ای در داده شبیه‌سازی شده

#### ۴-۲- پیاده‌سازی

مدل سیگنال خام دریافت شده از اهداف نقطه‌ای طبق رابطه ۱ بدست می‌آید. سیگنال دریافتی بصورت مختلط است و بنابراین به دو قسمت حقیقی و فاز تجزیه می‌شود. شکل ۵ مقادیر حقیقی و فاز سیگنال خام دریافتی از داده مدنظر را بصورت مجزا نمایش می‌دهد. محور عمودی آرایه امواج دریافتی است که آنتن گیرنده به آن حساس است. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، سیگنال در نویز گم است و در آن اهداف قابل شناسایی نیستند.

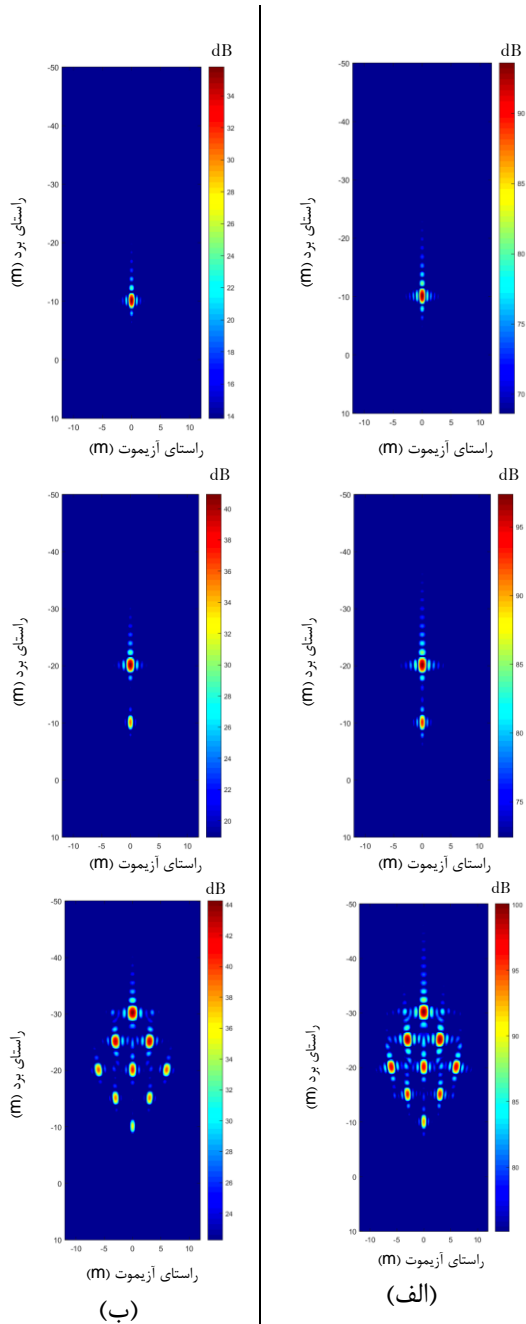
جدول ۱- پارامترهای سنجنده و موقعیت نقاط هدف

پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
فرکانس میانی	$f_c$	2.45 GHz (S - band)
پهنای باند	$B$	100 MHz
طول مایل بین مسیر پرواز و مرکز تصویر (swath center)	$R_s$	10 m
طول روزنه ساختگی	$L$	3 m
طول پالس (مدولاسیون)	$T$	2 ms
زاویه برخورد موج (incidence angle)	$\theta$	90 degree
قدرت تفکیک در راستای جهت (قدم‌های حرکت سنجنده)	$\Delta x$	2 cm
تعداد نمونه‌ها در راستای برد	$f_{steps}$	1000
تعداد اهداف نقطه‌ای (پراکنده‌گرها)		9
موقعیت قرارگیری اهداف نسبت به سنجنده		$p_1 = (0, -30)$ $p_2 = (3, -25)$ $p_3 = (-3, -25)$ $p_4 = (6, -20)$ $p_5 = (0, -20)$ $p_6 = (-6, -20)$ $p_7 = (3, -15)$ $p_8 = (-3, -15)$ $p_9 = (0, -10)$

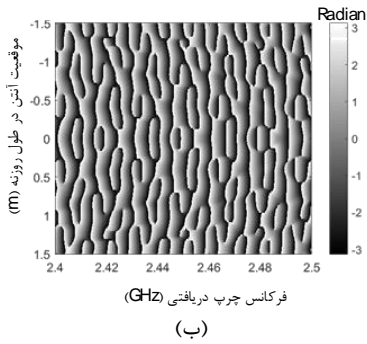
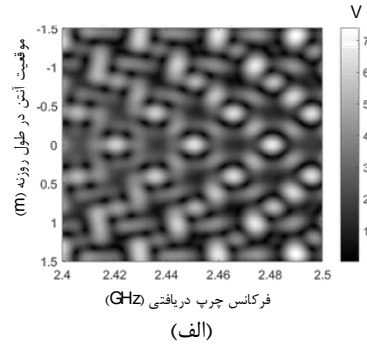
میزان توانایی سنجنده SAR و الگوریتم پردازشی مورد استفاده را در تشخیص اهداف ضعیف، بیان می کند.

$$PSLR = 10 \log_{10} \frac{I_s}{I_m} \quad (۱۳)$$

در این رابطه  $I_s$  بیانگر میزان شدت بزرگترین گلبرگ کناری و  $I_m$  بیانگر میزان شدت گلبرگ اصلی است.



شکل ۶- تصویر متمرکز به ترتیب در حالات ۱، ۲ و ۹ هدف نقطه‌ای (الف) ایجاد شده از الگوریتم RMA (ب) بعد از اعمال پنجره هان به تصویر ایجاد شده



شکل ۵- سیگنال خام دریافتی (الف) دامنه (ب) فاز

الگوریتم RMA در نهایت به ترتیب از حالت ۱ هدف نقطه‌ای موجود در محیط تا ۹ هدف نقطه‌ای تعریف شده طبق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ تصویر نهایی ایجاد شده از الگوریتم RMA و تصویر ایجاد شده بعد از اعمال پنجره هان را در حالت ۱، ۲ و ۹ هدف نقطه‌ای موجود نمایش می دهد. مقدار پیکسل های این تصویر به دسی بل تبدیل شده اند.

شکل ۷ یک پروفیل به موازات محور برد و عبورکننده از هدف شماره ۹ را در حالاتی که ۱ یا ۲ یا ۹ هدف در محیط وجود دارد را نمایش می دهد. طبق این مقایسه می توان به اثرات گلبرگ های کناری اهداف به یکدیگر در تصویر نهایی پی برد.

### ۴-۳- ارزیابی نتایج حاصل

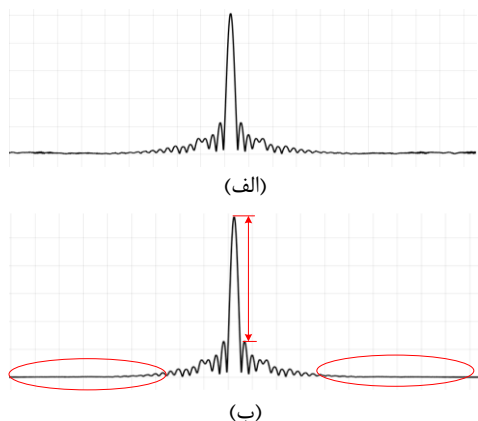
در بررسی دقت نتایج حاصل شده از دو روش <sup>۱</sup>PSLR و <sup>۲</sup>ISLR استفاده می شود. از نسبت بزرگترین گلبرگ کناری <sup>۳</sup> به گلبرگ اصلی <sup>۴</sup> در هر هدف، بصورت دسی بل طبق رابطه ۱۳ تعریف می گردد مقدار PSLR،

<sup>۱</sup> Peak Side Lobe Ratio (PSLR)  
<sup>۲</sup> Integrated Side Lobe Ratio (ISLR)  
<sup>۳</sup> Sidelobe  
<sup>۴</sup> Mainlobe

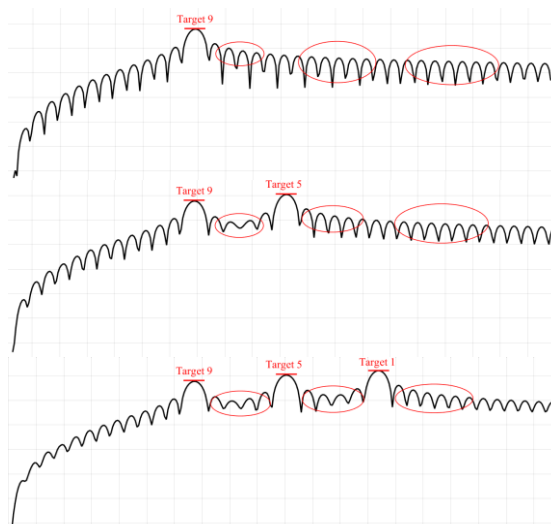
بدست آمده برای اهداف نقطه‌ای معمولاً در بازه ۱۰- تا ۲۰- دسی‌بل و مقادیر  $ISLR$  معمولاً بیشتر از  $PSLR$  هستند و از ۵- دسی‌بل کوچک‌ترند.

نتایج حاصل از ارزیابی تصویر ایجاد شده با معیارهای  $PSLR$  و  $ISLR$  در جدول (۲) قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی نتایج دارای مقادیر منفی هستند که این به معنی اثر بسیار بیشتر گلبرگ اصلی هر هدف نسبت به گلبرگ‌های کناری آن است. مقادیر  $ISLR$  به علت ماهیت جمعی که نسبت به گلبرگ‌های کناری دارند، مقادیر بیشتری نسبت  $PSLR$  می‌دهند.

شکل ۹ تاثیر اعمال پنجره هان بر کاهش نویز و اثر گلبرگ‌های کناری و بهبود کیفیت تصویر را در یک راستای پروفیلی از تصویر، نمایش می‌دهد. طبق این شکل، دیده می‌شود که مقادیر نویز در اطراف سیگنال حذف شده‌اند و همچنین شدت گلبرگ اصلی به نسبت افزایش یافته‌است.



شکل ۹- پروفیلی از هدف ۴ به موازات آزیموت (الف) قبل از اعمال پنجره هان (ب) بعد از اعمال پنجره هان

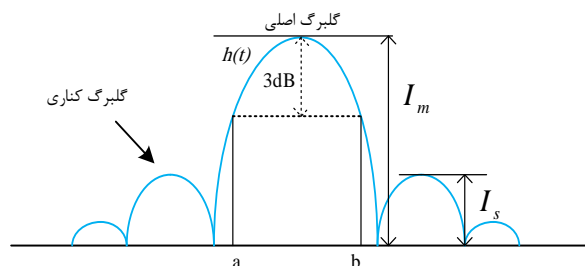


شکل ۷- مقایسه اثرات گلبرگ‌های کناری اهداف در وجود تعداد مختلفی از اهداف در تصویر

$ISLR$  بصورت نسبت بین گلبرگ اصلی و مجموع تمام گلبرگ‌های کناری یک هدف نقطه‌ای، طبق رابطه ۱۴، تعریف می‌شود. مقدار  $ISLR$ ، میزان توانایی استخراج اهداف ضعیف در اطراف اهداف روشن‌تر و قوی‌تر را بیان می‌کند [۱۱]، [۱۲].

$$ISLR = 10 \log_{10} \frac{\int_{-\infty}^a |h(\tau)|^2 d\tau + \int_b^{\infty} |h(\tau)|^2 d\tau}{\int_a^b |h(\tau)|^2 d\tau} \quad (14)$$

در این رابطه  $h(\tau)$  بیانگر تابع پاسخ ضربه اهداف<sup>۱</sup> در راستای برد و یا آزیموت است. بازه  $[a, b]$  بیانگر محدوده بین گلبرگ اصلی با سه دسی‌بل توان ضعیف‌تر است. این مقادیر در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۸- سیگنال مربوط به یک هدف نقطه‌ای و پارامترهای آن

منفی‌تر بودن مقادیر  $PSLR$  و  $ISLR$  با بالا بودن کیفیت و دقت نتایج رابطه مستقیم دارد. طبق [۱۳]-[۱۶]، در تصاویر ایجاد شده از سکوه‌های هوا برد<sup>۲</sup>، مقادیر  $PSLR$

<sup>۱</sup> Impulse Response Function (IRF)  
<sup>۲</sup> Airborne



جدول ۲- مقادیر PSLR و ISLR مربوط به هر هدف نقطه‌ای در دو راستای برد و آزیموت

PSLR (dB)		ISLR (dB)		هدف
راستای آزیموت	راستای برد	راستای آزیموت	راستای برد	
-۱۵/۶۱۸۷	-۱۲/۹۱۵۹	-۵/۲۶۱۹	-۵/۹۶۵۱	۱
-۱۳/۱۵۷۱	-۱۲/۵۷۲۶	-۵/۲۸۳۷	-۵/۸۹۱۵	۲
-۱۲/۵۴۹۴	-۱۳/۳۶۲۸	-۷/۱۸۷۷	-۶/۲۰۵۰	۳
-۱۲/۳۷۱۸	-۱۳/۱۸۹۹	-۶/۳۹۲۰	-۵/۷۱۰۷	۴
-۱۱/۹۰۳۴	-۱۳/۰۲۰۵	-۵/۹۲۶۰	-۶/۰۹۸۶	۵
-۱۱/۸۲۱۷	-۱۳/۰۶۱۵	-۶/۵۱۴۶	-۵/۹۰۲۹	۶
-۱۳/۱۵۴۷	-۱۲/۵۷۲۶	-۵/۲۸۱۱	-۶/۲۱۳۹	۷
-۱۲/۵۴۳۷	-۱۳/۳۶۲۸	-۷/۱۹۱۷	-۵/۸۰۰۳	۸
-۱۵/۷۹۷۲	-۱۳/۹۷۰۰	-۵/۲۷۹۱	-۵/۹۶۵۷	۹
-۱۳/۲۱۵۳	-۱۳/۱۱۴۳	-۶/۱۱۵۹	-۵/۹۷۲۶	میانگین (dB)

### ۵- نتیجه‌گیری

تابع هان استفاده شد. از دو پارامتر متداول PSLR و ISLR برای بررسی دقت و کیفیت نتایج بدست آمده استفاده گردید. طبق نتایج حاصل، مقدار میانگین این دو پارامتر به ترتیب برای ۹ هدف موجود در راستای برد ۱۳/۱۱۴۳- و ۵/۹۷۲۶- دسی بل و در راستای آزیموت ۱۳/۲۱۵۳- و ۶/۱۱۵۹- دسی بل بدست آمدند که در مقایسه با حالات تصویربرداری با بردهای بلندتر و با توجه به خیلی کوتاه بودن برد اهداف در مساله مورد بررسی، مقادیر قابل قبولی هستند و نشان می‌دهد که الگوریتم RMA علاوه بر کاربردهای فضا برد و هوا برد برای سکوهای زمینی و کاربردهایی با برد خیلی کوتاه نیز عملکردی قابل قبول و مناسب دارد.

در این مقاله، به پیاده‌سازی و بررسی الگوریتم RMA برای یک سیستم رادار روزنه ترکیبی با سکوی زمینی پرداخته شد. بدین منظور در ابتدا به شبیه‌سازی تصویربرداری رادار روزنه ترکیبی زمینی پرداخته شد. در نهایت معادله سیگنال خام دریافتی برای ۹ هدف نقطه‌ای شبیه‌سازی فراهم گردید. پس از ایجاد سیگنال خام، به پیاده‌سازی الگوریتم RMA بر روی این داده در حالاتی با تعداد متنوعی از اهداف در صحنه تصویر پرداخته شد و در نهایت تصاویر متمرکز شده اهداف به عنوان خروجی بدست آمد و مورد بررسی قرار گرفت. برای کاهش اثرات گلبرگ-های کناری اهداف و افزایش نسبت سیگنال به نویز، از

### مراجع

- [1] M. Okoń-Fajfara, P. Serafin, and A. Kawalec, "An analysis of Chosen Image Formation Algorithms for Synthetic Aperture Radar with FMCW," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 62, no. 4, pp. 323–328, Jan. 2016.
- [2] A. Reigber et al., "Very-High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Imaging: Signal Processing and Applications," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 759–783, Mar. 2013.
- [3] G. L. Charvat and L. C. Kempel, "Synthetic aperture radar imaging using a unique approach to frequency-modulated continuous-wave radar design," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 48, no. 1, pp. 171–177, Feb. 2006.
- [4] Y. Li and S. O'Young, "Focusing Bistatic FMCW SAR Signal by Range Migration Algorithm Based on Fresnel Approximation," *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 32123–32137, Dec. 2015.
- [5] P. Cheng, Q. Xin, J. Wan, and Z. Wang, "Refocusing of ground moving targets for range migration algorithm in FMCW SAR," 2015, vol. 9642, p. 96420R.
- [6] G. L. Charvat, "A Low-Power Radar Imaging System, 2nd Edition," Michigan State University, 2007.
- [7] C. Cafforio, C. Prati, and F. Rocca, "SAR data focusing using seismic migration techniques," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 194–207, Mar. 1991.

- [8] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight synthetic aperture radar : signal processing algorithms*. Boston : Artech House, 1995.
- [9] G. Brooker, *Introduction to sensors for ranging and imaging*, no. 1c. The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [10] P. Podder, T. Z. Khan, M. H. Khan, and M. M. Rahman, "Comparative Performance Analysis of Hamming, Hanning and Blackman Window," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 96, no. 18, pp. 975–8887, 2014.
- [11] Xin Lu and Hong Sun, "Parameter assessment for SAR image quality evaluation system," in *2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2007, pp. 58–60.
- [12] A. Martinez and J. L. Marchand, "SAR image quality assessment," *Rev. Teledetec.*, vol. 2, pp. 12–18, 1993.
- [13] R. Wang, O. Loffeld, H. Nies, S. Knedlik, M. Hagelen, and H. Essen, "Focus FMCW SAR Data Using the Wavenumber Domain Algorithm," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 4, pp. 2109–2118, Apr. 2010.
- [14] F. Liu, C. Hu, T. Zeng, T. Long, and L. Jin, "A novel Range Migration Algorithm of GEO SAR echo data," in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010, pp. 4656–4659.
- [15] L. Du, Y. Wang, W. Hong, W. Tan, and Y. Wu, "A Three-Dimensional Range Migration Algorithm for Downward-Looking 3D-SAR with Single-Transmitting and Multiple-Receiving Linear Array Antennas," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2010, no. 1, p. 957916, Dec. 2010.
- [16] Q. Wu, Y. Liang, M. Xing, C. Qiu, Z. Bao, and T. S. Yeo, "Focusing of tandem bistatic-configuration data with range migration algorithm," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 88–92, Jan. 2011.