



کاربرد روش های مجانبی در تولید داده خام رادار دهانه مصنوعی و جبران سازی خطای فاز به روش حداقل کردن آنتروپی

سید احمد نیری^{۱*}، محمود محمدطاهری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، ایران

چکیده :

در این مقاله داده خام مورد نیاز شبیه ساز رادار دهانه مصنوعی با مود عملکردی نواری، جهت پردازش با الگوریتم برد-داپلر، از طریق محاسبه میدان راه دور انعکاسی از ساختار مورد نظر، تولید شده است. میدان راه دور انعکاسی شامل اثرات قطبی شدگی آنتن های فرستنده-گیرنده، مشخصات فیزیکی ساختار (مانند ثابت دی الکتریک، تلفات و شکل هندسی)، زاویه رویت جسم توسط آنتن و فرکانس کاری می باشد. بنابراین، داده خام شبیه سازی شده از ساختار، یک تصویر واقعی تر ایجاد می کند. به منظور تسریع در محاسبه میدان راه دور از پراکنده کننده های بزرگ (نسبت به طول موج)، از روش های مجانبی بهره گرفته شده است. همچنین نشان داده می شود که تولید داده خام به روش تئوری تفرق یکنواخت نسبت به تئوری نور هندسی، باعث شده لبه های جسم در تصویر خروجی، با وضوح بیشتری نمایان شود. به عبارت دیگر، محاسبه دقیق تر میدان راه دور، جزئیات بیشتری از جسم در تصویر خروجی ظاهر می شود. همچنین، نشان داده می شود که تغییرات سرعت سکو در راستای سمت منجر به اضافه شدن خطای فاز در سیگنال دریافتی شده که اثر منفی در کیفیت و آنتروپی تصویر خواهد داشت. در پایان، خطای فاز ایجاد شده را به روش حداقل کردن آنتروپی تصویر با استفاده از الگوریتم بهینه ساز، جبران خواهیم نمود.

واژه های کلیدی : آنتروپی، خطای فاز، داده خام، رادار دهانه مصنوعی، روش های مجانبی، میدان راه دور.



۱- مقدمه

رادار دهانه مصنوعی^۱ با بزرگ کردن سطح روزنه آنتن به صورت مجازی، توانایی ایجاد تصاویری مشابه با تصاویر اپتیکی با حدتفکیک بالا در تمامی طول شبانه‌روز و شرایط نامساعد جوی (مانند باران، مه و ...) را دارد [۱]. رادار SAR، بر اساس نحوه‌ی اسکن کردن آنتن، قابلیت عمل کردن در سه حالت نقشه-نواری^۲، نور افکن^۳ و پیمایشی^۴ را دارد. در مود نقشه-نواری، که در این مقاله از آن بهره برده شده است، رادار با اسکن منطقه به موازات راستای حرکت سکو، داده‌خام را جمع‌آوری و به کمک یکی از الگوریتم‌های برد-داپلر^۵، مقیاس‌بندی چیرپ^۶ و عدد موج^۷ فرایند پردازش داده خام ایجاد شده را انجام می‌دهد [۲، ۳، ۴ و ۵].

در تحلیل و پردازش سیگنال‌های دریافتی رادار ایده‌آل، فرض می‌شود رادار با سرعت و فرکانس تکرار پالس^۸ ثابت بر روی یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند. اما در عمل، به دلیل آشفتگی‌های جوی و عدم دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری، این شرایط ایده‌آل برقرار نبوده و در سیگنال دریافتی خطای فاز فرکانس پایین^۹ و خطای فاز سینوسی فرکانس بالا^{۱۰} ایجاد شده که سبب کاهش کیفیت و حدتفکیک در راستای سمت تصویر می‌شود [۶ و ۷]. یکی از موثرترین روش‌های جبران‌سازی خطای فاز در پردازش سیگنال SAR، جبران‌سازی به روش تمرکز خودکار^{۱۱} است. روش تمرکز خودکار از تکنیک‌های پیشینه کردن کنتراست تصویر، حداقل کردن آنتروپی تصویر، تمرکز خودکار چند کاناله و الگوریتم مشتق‌فاز بهره می‌گیرد [۸، ۹ و ۱۰].

داده‌خام رادار SAR را می‌توان به صورت تجربی یا شبیه‌سازی تولید نمود. اگر میدان راه‌دور انعکاسی از ساختار را به عنوان داده خام مورد نیاز در شبیه‌سازی، در نظر گرفته شود، آنگاه اثرات قطبش آنتن، پارامترهای الکترومغناطیسی ساختار، هندسه فیزیکی ساختار، راستای پرتوهای انتشاری از رادار، نوع مواد و ویژگی‌های سطح، در داده‌خام لحاظ شده که باعث ایجاد تصویر واقعی‌تر از ساختار می‌گردد [۱۱]. با استفاده از روش‌های مجانبی مانند نور هندسی^{۱۲}، نور فیزیکی^{۱۳} و تئوری تفرق یکنواخت^{۱۴} می‌توان میدان راه‌دور ناشی از اجسام بزرگ (نسبت به طول موج) را محاسبه کرد [۱۲ و ۱۳].

در این مقاله داده‌خام را از طریق روش مجانبی نور هندسی و تفرق یکنواخت برای رادار SAR در مود نقشه-نواری تولید کرده و با الگوریتم RDA پردازش می‌کنیم. همچنین، خطای فاز ناشی از تغییرات سرعت سکو در راستای سمت را در نظر گرفته و به روش حداقل‌سازی آنتروپی، هم‌زمان خطای فاز فرکانس پایین و بالا را جبران می‌نماییم. نوآوری این مقاله، استفاده از روش تقریب نور هندسی جهت تولید داده خام و ادغام آن با الگوریتم برد-داپلر، بررسی اثرات تفرق در ایجاد تصویر SAR به روش تئوری تفرق یکنواخت، بررسی تغییرات سرعت رادار و تاثیر آن بر آنتروپی تصویر، جبران‌سازی خطای فاز با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز می‌باشد.

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

² Stripmap mode

³ Spotlight mode

⁴ Scan mode

⁵ Range-Doppler Algorithm (RDA)

⁶ Chirp-Scaling Algorithm (CSA)

⁷ Wave Number Algorithm

⁸ Pulse Repetition Frequency (PRF)

⁹ Low-frequency phase error

¹⁰ High-frequency sinusoidal phase errors

¹¹ Autofocus

¹² Geometrical Optics (GO)

¹³ Physical Optics (PO)

¹⁴ Uniform Theory of Diffraction (UTD)



ادامه این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. بخش دوم تئوری تولید داده خام، بخش سوم مدل ریاضی خطای فاز، بخش چهارم محاسبه آنتروپی تصویر، بخش پنجم نتایج شبیه سازی و در نهایت در بخش ششم نتیجه گیری آورده شده است.

۲- تئوری تولید داده خام

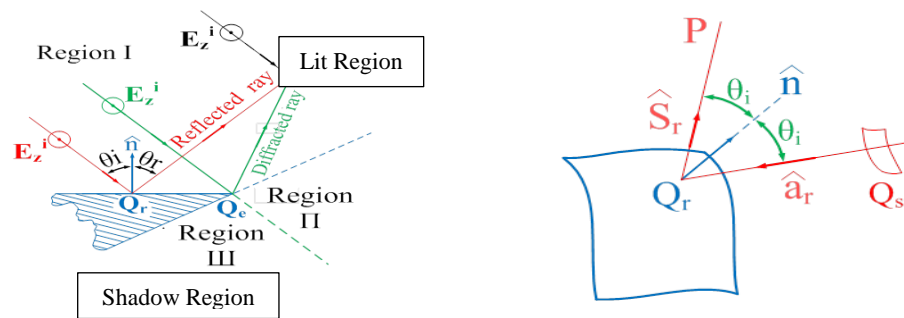
در رادار SAR، سیگنال تاخیر یافته بازگشتی ناشی از ارسال سیگنال چیرپ ($S(\tau) = w_r(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau + \pi K_r \tau^2)$) به عنوان داده خام ذخیره می گردد. سیگنال بازگشتی به صورت رابطه (۱) بیان می شود.

$$S_{rec}(\tau, \eta) = A_0 \operatorname{rect}\left(\frac{\tau}{T} - \frac{2R(\eta)}{Tc}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{L_a}{\lambda}(\eta - \eta_c)\right) \times \exp\left[j2\pi f_0\left(-\frac{2R(\eta)}{c}\right)\right] \times \exp\left[j\pi K_r\left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

در روابط بالا، τ و η به ترتیب زمان در راستای برد و سمت، f_0 فرکانس مرکزی، K_r نرخ چیرپ، T عرض پالس، $R(\eta)$ فاصله رادار تا پراکنده ساز، $w_a(\eta)$ الگوی تشعشعی آنتن فرستنده/گیرنده در راستای برد، L_a طول فیزیکی آنتن و A_0 ضریب انعکاس محیط بوده که وابسته به فرکانس، زاویه دید رادار و مشخصات فیزیکی ساختار می باشد.

با پردازش داده خام تولید شده به روش الگوریتم RDA تصویر جسم استخراج می شود. این الگوریتم در سه مرحله که عبارتند از: فشردگی در راستای برد، اصلاح مهاجرت سلولی و فشردگی سازی در راستای سمت، عملیات پردازش داده خام را انجام داده، که جزئیات این مراحل در مرجع [۵ و ۱۴] آورده شده است.

در شبیه سازی های رادار SAR، ضریب انعکاس سیگنال از ساختار A_0 یک عدد ثابت حقیقی در نظر گرفته می شود. به منظور اصلاح این ضریب انعکاس، میدان راه دور انعکاسی از ساختار را به عنوان داده خام در نظر می گیریم، و این سبب می شود که اثرات الگوی تشعشعی آنتن، فرکانس کاری، قطبش، پهنای باند آنتن، زاویه رویت جسم توسط آنتن و مشخصات فیزیکی پراکنده ساز مانند ثابت دی الکتریک، تلفات و شکل هندسی آن در دامنه و فاز A_0 لحاظ شوند.



(ب)

(الف)

شکل ۱: (الف) نمایش مکانیسم انعکاس یک پرتو از سطح (ب) پراکندگی از یک گوه در اثر تابش میدان صفحه ای [۱۵].

جهت محاسبه میدان راه دور اجسام بزرگ (نسبت به طول موج)، از روش های مجانبی مانند GO و UTD، می توان استفاده نمود که اصول روش محاسبه GO و UTD در زیر بخش زیر آورده شده اند.



۲-۱- محاسبه میدان راه دور به روش نور هندسی

اگر سطح یک پراکنده‌ساز سه بعدی و بردار یکه عمود بر سطح آن را بر اساس پارامترهای منحنی u و v ، به ترتیب به صورت $\vec{r} = x(u, v)\hat{x} + y(u, v)\hat{y} + z(u, v)\hat{z}$ و $\hat{n} = \frac{\nabla \vec{r}}{|\nabla \vec{r}|}$ نشان دهیم، آنگاه میدان پراکنده شده راه دور از پراکنده‌ساز در نقطه مشاهده P ، از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$E^r(P) = E^i(Q_r) R \sqrt{\frac{\rho_1^r \rho_2^r}{(\rho_1^r + s^r)(\rho_2^r + s^r)}} \exp[-jks^r] \quad (2)$$

مطابق شکل (۱-الف)، E^i میدان تابشی در نقطه آینه‌ای Q_r ، S^r فاصله بین دو نقطه Q_r و P ، ماتریس پلاریزاسیون، ρ_1^r و ρ_2^r شعاع انحنای منحنی بوده که ریشه‌های معادله درجه دو $(MQ - N^2)\xi^2 + (Mq - 2Nn + Qm)\xi + (mq - n^2) = 0$ می‌باشند. شعاع‌های انحنای منحنی به صورت $\rho_1^r = -\xi_1$ و $\rho_2^r = -\xi_2$ که ξ_1 و ξ_2 ریشه‌های معادله درجه دو می‌باشند. جزئیات محاسبه کمیت‌های M ، N ، Q ، m ، n و q در مرجع [۱۵] آورده شده است.

۲-۲- محاسبه میدان تفرق شده از لبه

در ساختارهایی که سطوح آن شامل یک ناپیوستگی (لبه) می‌باشد، علاوه بر میدان‌های بازگشتی، میدان‌های تفرق شده نیز در میدان کل تاثیرگذار می‌باشد. بنابراین میدان بازگشتی در نواحی مختلف از فرمول (۲) پیروی نکرده و از فرمول تعمیم یافته (۳) پیروی می‌کند.

$$E_z^t = \begin{cases} E_z^i + E_z^r + E_z^d & \text{(Region I)} \\ E_z^i + E_z^d & \text{(Region II)} \\ E_z^d & \text{(Region III)} \end{cases} \quad (3)$$

همان‌طور که در شکل (۱-ب) مشاهده می‌شود، ناحیه روشن^{۱۵} شامل نواحی I و II و ناحیه سایه^{۱۶} از ناحیه III تشکیل شده است. در معادله (۳)، E_z^i و E_z^r به ترتیب میدان‌های تابشی و انعکاسی بوده و میدان انعکاسی نیز از روش GO محاسبه می‌گردد. علاوه بر این، E_z^d میدان تفرق یافته می‌باشد که جزئیات محاسبه آن، در مرجع [۱۶] آورده شده است.

۳- مدل ریاضی خطای فاز

در حالت ایده‌آل سیگنال دریافتی توسط رادار به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$S_{rec} = |S_{n'}(m')| \exp[j\phi_{n'}(m')] ; \quad n' = 1, 2, \dots, N' \quad , \quad m' = 1, 2, \dots, M' \quad (4)$$

که $|S_{n'}(m')|$ و $\phi_{n'}(m')$ به ترتیب دامنه و فاز داده‌خام در n' و m' امین نمونه‌برداری سیگنال در راستای برد و سمت، N' تعداد نمونه‌های فرکانسی در راستای برد و M' تعداد نقاط نمونه‌برداری در راستای سمت می‌باشد. خطای فاز ایجاد شده در رادار SAR غیر ایده‌آل، باعث اضافه شدن فاز $\exp[j(\theta_{eLF} + \theta_{eHF})]$ به سیگنال دریافتی S_{rec} شده که θ_{eLF} و

¹⁵ Lit region

¹⁶ Shadow region



به ترتیب بیان کننده خطای فاز فرکانس پایین و فرکانس بالا می باشند. یک مدل عملی برای توصیف خطای فاز فرکانس پایین و خطای فاز سینوسی فرکانس بالا به ترتیب به صورت روابط (۵) و (۶) در نظر گرفته می شود.

$$\theta_{eLF}(y) = \sum_{k=1}^K a_k y^k, \quad -\frac{L_{syn}}{2} \leq y \leq \frac{L_{sny}}{2} \quad (5)$$

$$\theta_{eHF}(y) = \sum_{k=1}^{N_h} R_k \cos(\omega_k y), \quad \omega_k = \frac{2\pi f_s}{A} k \quad (6)$$

که a_k ضریب مجهول خطای چندجمله مرتبه k ، L_{sny} طول دهانه مصنوعی رادار^{۱۷}، f_s فرکانس نمونه برداری سیگنال، R_k دامنه نویز تصادفی در فرکانس ارتعاشی ω_k و N_h تعداد کل ارتعاشات موثر می باشد. به منظور حذف خطاهای فاز، وظیفه الگوریتم های جبران ساز، ارائه بهترین تخمین θ_{eLF} و θ_{eHF} برای داده خام S_{rec} می باشد [۷ و ۱۷].

۴- محاسبه آنتروپی تصویر

در اثر حرکت غیر ایده آل رادار، فاز سیگنال دریافتی دچار خطا شده و سبب کاهش کیفیت تصویر می گردد. کاهش کیفیت تصویر به معنی افزایش آنتروپی تصویر نیز شناخته می شود. یکی از روش های مهم برای تمرکز خودکار، حداقل کردن آنتروپی تصویر بوده، که سبب بهبود کیفیت تصویر و جبران خطای فاز سیگنال می گردد [۹ و ۱۸]. اگر در الگوریتم RDA، ماتریس تصویر بدست آمده از مرحله فشرده سازی در راستای سمت را به صورت $S_{rec.ac}(\tau, \eta)$ نام گذاری شود، آنگاه آنتروپی تصویر که همواره یک عدد حقیقی بزرگتر از یک می باشد، مطابق رابطه (۷) محاسبه می گردد.

$$Entropy = -\sum_{n'=1}^{N'} \sum_{m'=1}^{M'} p(n', m') \ln(p(n', m')) \quad (7)$$

در این رابطه پارامتر $p(n', m')$ برابر است با:

$$p(n', m') = \frac{|S_{rec.ac}(n', m')|^2}{P} \quad (8)$$

$$P = \sum_{n'=1}^{N'} \sum_{m'=1}^{M'} |S_{rec.ac}(n', m')|^2 \quad (9)$$

که N' و M' نشان دهنده تعداد سطر و ستون های ماتریس تصویر $S_{rec.ac}(\tau, \eta)$ می باشد [۱۰].

۵- نتایج شبیه سازی

در این بخش، ابتدا یک رادار SAR ایده آل را شبیه سازی کرده و با استفاده از روش های مجانبی و الگوریتم RDA تصویر یک صفحه مستطیل را استخراج می نماییم. سپس با غیر ایده آل در نظر گرفتن رادار SAR، داده خام را تولید کرده و پردازش سیگنال را مجدداً با استفاده از الگوریتم RDA تکرار می نماییم. در نهایت، خطای فاز موجود در

¹⁷ Synthetic aperture length



داده خام ایجاد شده در رادار SAR غیر ایده آل را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز ژنتیک^{۱۸} و مین‌مکس^{۱۹} و روش جبران‌ساز حداقل کردن آنتروپی، جبران می‌نماییم.

۵-۱- شبیه سازی تصویر یک صفحه در رادار دهانه مصنوعی ایده آل

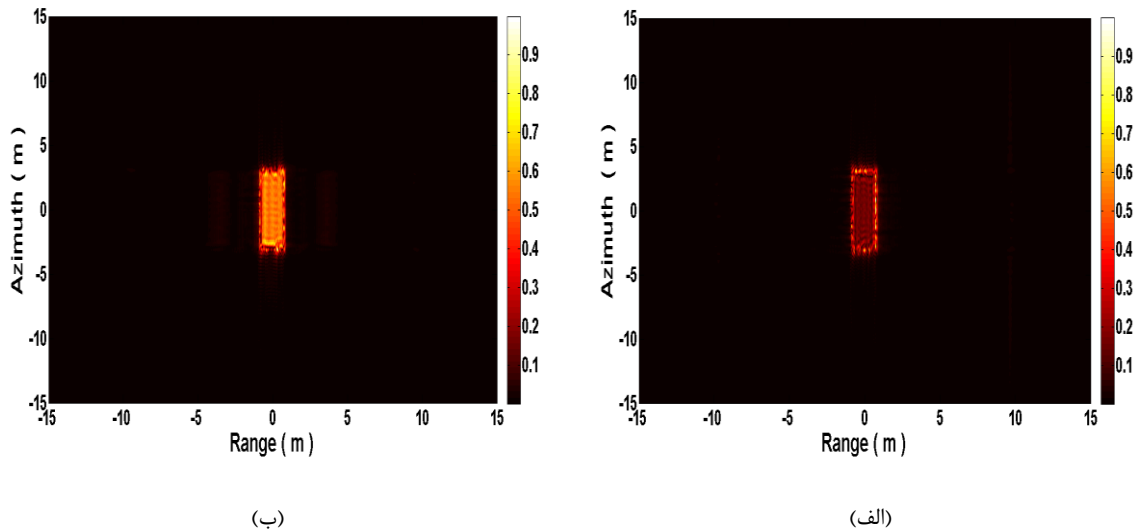
برای شبیه‌سازی تصویر یک صفحه در رادار دهانه مصنوعی ایده آل، یک صفحه فلزی به ابعاد $40.0\lambda_0 \times 13.3\lambda_0$ که λ_0 طول موج در فرکانس مرکز بوده، را در نظر می‌گیریم. همچنین مرکز صفحه در مبدا مختصان واقع شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای رادار SAR که مطابق جدول (۱) می‌باشد، میدان‌های راه‌دور انعکاسی را به روش GO محاسبه می‌نماییم. با پردازش داده خام با استفاده از الگوریتم RDA، تصویر صفحه فلزی مطابق شکل (۲-الف) استخراج می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابعاد و مختصات جسم به درستی تعیین شده است. مجدداً با استفاده از روش UTD داده خام را تولید و به کمک الگوریتم RDA داده خام بدست آمده را پردازش کرده، که تصویر بدست آمده از صفحه در این حالت، مطابق شکل (۲-ب) می‌باشد. با مقایسه شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) مشاهده می‌شود، که لبه‌های تصویر صفحه استخراج شده از روش UTD نسبت به روش GO، وضوح بیشتری دارد.

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده جهت شبیه سازی رادار SAR.

مقدار پارامتر	نوع پارامتر
محور y	راستای حرکت رادار
2GHz	فرکانس مرکزی
300Hz	فرکانس تکرار پالس
200m/s	سرعت هواپیما
2.5 μ s	نرخ چیرپ
100MHz	پهنای باند
3s	مدت زمان نمونه برداری
28.3km	حداقل فاصله رادار از مرکز ناحیه تصویر
2m	طول فیزیکی آنتن
عمودی	پلاریزاسیون آنتن فرستنده
عمودی	پلاریزاسیون آنتن گیرنده
sinc	الگوی تشعشی آنتن

¹⁸ Genetic optimization algorithm

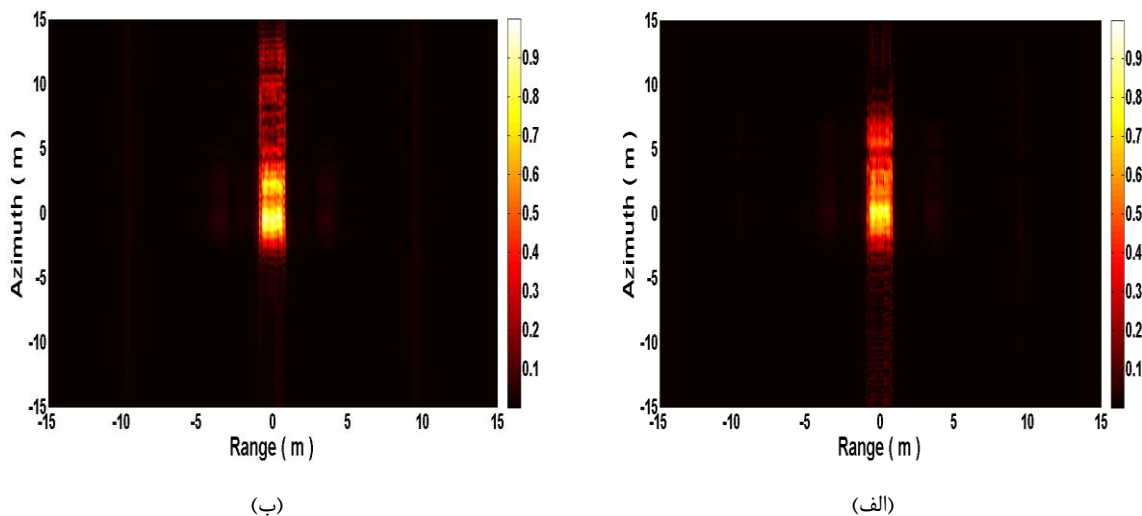
¹⁹ Minimax optimization algorithm



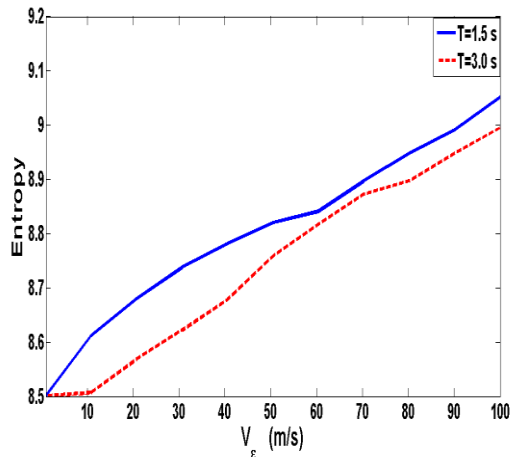
شکل ۲: نتایج شبیه سازی مربوط به صفحه فلزی با محاسبه میدان راه دور با استفاده از (الف) روش تقریبی GO (ب) روش UTD.

۵-۲- شبیه سازی تصویر یک صفحه در رادار دهانه مصنوعی غیر ایده آل

به منظور غیر ایده آل در نظر گرفتن رادار SAR، فرض می کنیم سرعت سکو در راستای محور y دارای غیر یکنواختی به شکل $V(m/s) = 200 + V_\epsilon \times \sin(\frac{2\pi}{T}t)$ است که t بازه زمانی $0 < t < 3s$ و T دوره تناوب حرکت می باشد. جهت شبیه سازی، پارامترهای T و V_ϵ را به ترتیب برابر $3, 1.5$ و $V_\epsilon(m/s) = 0, 10, \dots, 100$ با گام های $10m/s$ انتخاب و با استفاده از روش UTD و الگوریتم RDA داده خام را تولید و پردازش می نماییم. همان طور که از شکل های (۳-الف) و (۳-ب) مشاهده می شود، خطای فاز ایجاد شده، باعث کاهش حدتفکیک در راستای سمت می گردد. در شکل (۴)، افزایش آنتروپی تصویر ناشی از افزایش تغییرات سرعت سکو در راستای سمت V_ϵ یا کاهش دوره تناوب T را نشان می دهد.



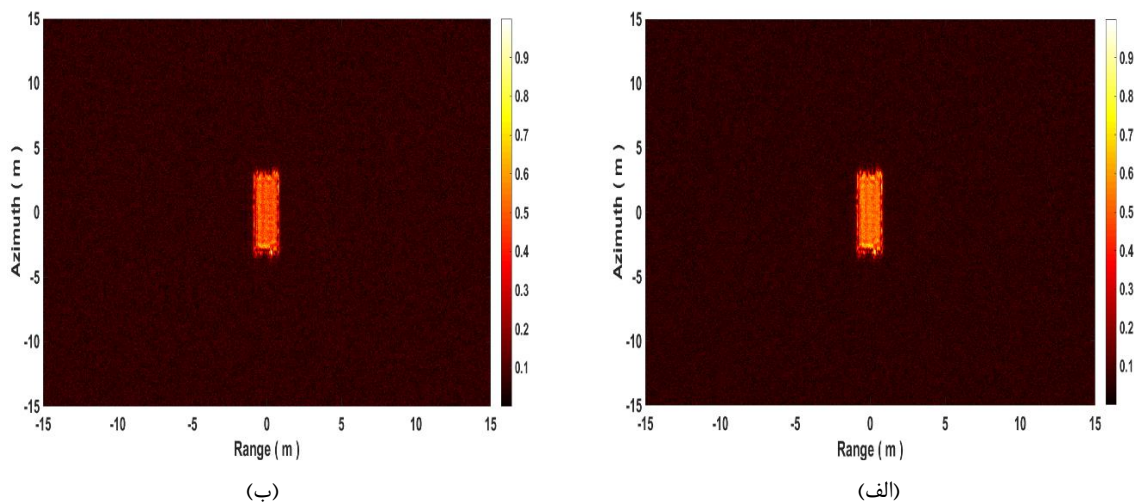
شکل ۳: نتایج شبیه سازی مربوط به صفحه فلزی با استفاده از روش UTD برای رادار غیر ایده آل با $V_\epsilon = 100(m/s)$ و دوره تناوب (الف) $T = 1.5(s)$ (ب) $T = 3(s)$.



شکل ۴: نمودار آنتروپی تصویر برای رادار SAR غیر ایده آل با دوره تناوب و سرعت سکو متفاوت.

۳-۵- جبران سازی خطای فاز

همان طور که مشاهده شد، غیر ایده آل بودن رادار SAR باعث کاهش کیفیت و افزایش آنتروپی تصویر می‌گردد. در این قسمت به منظور حذف خطای فاز فرکانس پایین و فرکانس بالا، با اعمال الگوریتم‌های بهینه‌ساز ژنتیک و مین‌مکس بر روی چهار جمله اول انتخابی روابط (۵) و (۶)، جبران‌سازی خطای فاز به روش حداقل کردن آنتروپی تصویر انجام می‌شود. تصویر رادار غیر ایده آل SAR برای حالتی که $V_e = 100$ (m/s) و $T = 1.5, 3$ (s) به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) و تصویر جبران شده به روش حداقل کردن آنتروپی و الگوریتم‌های بهینه‌ساز ژنتیک و مین‌مکس، به ترتیب در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، جبران‌سازی خطای فاز، باعث افزایش کیفیت و کاهش آنتروپی تصویر می‌گردد.



شکل ۵: نتایج شبیه سازی مربوط به جبران سازی خطای فاز یک صفحه فلزی به روش حداقل کردن آنتروپی برای رادار SAR غیر ایده آل با $V_e = 100$ (m/s) و دوره تناوب (الف) $T = 1.5$ (s) آنتروپی برابر ۸.۵۰۱ (ب) $T = 3$ (s) آنتروپی برابر ۸.۵۰۱.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور شبیه‌سازی رادار SAR در مود عملکردی نواری، داده‌خام مورد نیاز برای الگوریتم پردازش سیگنال RDA را با محاسبه میدان راه‌دور با روش‌های مجانبی تولید می‌نماییم. استفاده از میدان راه دور به عنوان داده



خام باعث شد که بتوان اثرات الگوی تشعشعی آنتن، فرکانس کاری، قطبش، پهنای باند آنتن، زاویه رویت جسم توسط آنتن و مشخصات فیزیکی پراکنده ساز مانند ثابت دی الکتریک، تلفات و شکل هندسی آن در تولید داده خام لحاظ نمود. استفاده از روش UTD در تولید داده خام باعث شد که کیفیت تصویر جسم نسبت به روش GO بهبود یابد. سرانجام با شبیه سازی حرکت غیر ایده آل رادار، خطای فاز ایجاد شده در سیگنال دریافتی را با استفاده از الگوریتم های بهینه ساز و روش حداقل کردن آنتروپی جبران سازی نمودیم.

مراجع

- 1- M. Mahfouz, A. Fathy, Y. Yang, E. E. Ali, and A. Badawi, "See-through wall imaging using ultra wideband pulse systems," in Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop, 2005. Proceedings. 34th. IEEE, 2005, pp. 6-pp.
- 2- D. C. Munson Jr and R. L. Visentin, "A signal processing view of strip-mapping synthetic aperture radar," Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 12, pp. 2131-2147, 1989.
- 3- C. Wu, K. Liu, and M. Jin, "Modeling and a correlation algorithm for spaceborne sar signals," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, no. 5, pp. 563-575, 1982.
- 4- M. Soumekh, Synthetic aperture radar signal processing. New York: Wiley, 1999.
- 5- B.-C. Wang, Digital signal processing techniques and applications in radar image processing. John Wiley & Sons, 2008, vol. 91.
- 6- W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, "Spotlight synthetic aperture radar- signal processing algorithms(book)," Norwood, MA: Artech House, 1995., 1995.
- 7- T. S. Lim, V. C. Koo, H.-T. Ewe, and H.-T. Chuah, "A sar autofocus algorithm based on particle swarm optimization," Progress In Electromagnetics Research B, vol. 1, pp. 159-176, 2008.
- 8- J. R. Fienup, "Phase error correction for synthetic-aperture phased-array imaging systems," in International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2000, pp. 47-55.
- 9- X. Xu, E. L. Miller, and C. M. Rappaport, "Minimum entropy regularization in frequency-wavenumber migration to localize subsurface objects," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 41, no. 8, pp. 1804-1812, 2003.
- 10- T. J. Kragh, "Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus," in Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop],(June 2006), 2006.
- 11- M. I. Skolnik, "Introduction to radar," Radar Handbook, vol. 2, 1962.
- 12- G. L. James, Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves. IET, 1986, no. 1.
- 13- V. A. Borovikov and B. E. Kinber, Geometrical theory of diffraction. IET, 1994, no. 37.
- 14- M. Cheney, "A mathematical tutorial on synthetic aperture radar," SIAM review, vol. 43, no. 2, pp. 301-312, 2001.
- 15- D. McNamara, C. Pistorius, and J. Malherbe, "The uniform geometrical theory of diffraction," Artech House, London, 1990.
- 16- R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, 1974.
- 17- Y. Chen, H. Zhao, H. Sun, and S. Chen, "Study on minimum entropy-based autofocus algorithm simulation for spotlight sar imaging." International Journal of Advancements in Computing Technology, vol. 4, no. 20, 2012.
- 18- T. Zeng, R. Wang, and F. Li, "Sar image autofocus utilizing minimum entropy criterion," Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 10, no. 6, pp. 1552-1556, 2013.