

بهبود جبران‌سازی حرکت در رادارهای روزنه‌ مصنوعی با استفاده از تقریب خطای باقیمانده

مجید حاجی‌پور^{۱*}، سید محمود مدرس‌هاشمی^۲

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۰۷)

چکیده

به دلیل وجود انحراف حرکت در سکوی حامل رادار روزنه‌ مصنوعی، نمی‌توان تصاویری با کیفیت مناسب از سطح زمین به دست آورد. به همین جهت، روشی دو مرحله‌ای برای جبران‌سازی خطای حرکت در الگوریتم‌های تشکیل تصویر به کار گرفته می‌شود. در مقاله حاضر، ابتدا با در نظر گرفتن یک مدل خطی تقریبی برای خطای حرکت و سپس اعمال تأثیر مرحله فشرده‌سازی برد در الگوریتم RDA روی خطای باقیمانده، نشان داده می‌شود که فاز اضافه شونده در مرحله جبران‌سازی تفاضلی، تغییر خواهد کرد. سپس روش ارائه شده، با اعمال یک مرحله میانی جبران‌سازی در حین فشرده‌سازی برد، به منظور اصلاح دقیق‌تر مهاجرت برد بررسی می‌شود. سرانجام با شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به روش دو مرحله‌ای مرسوم خواهد داشت.

واژگان کلیدی: رادار روزنه‌ مصنوعی، تشکیل تصویر، خطای حرکت، جبران‌سازی حرکت.

۱. مقدمه

امروزه به منظور دستیابی به تصاویری با کیفیت مناسب از سطح زمین، از رادارهای روزنه‌ مصنوعی (SAR) استفاده می‌شود. شرط لازم برای داشتن تصاویر با کیفیت مناسب، قدرت تفکیک مناسب در دو جهت برد و سمت می‌باشد. به دلیل استفاده از سکوی متحرک در SAR، بیم باریکی تولید می‌شود که باعث افزایش قدرت تفکیک در جهت سمت می‌گردد [۱]. برای رسیدن به قدرت تفکیک مناسب در جهت برد نیز از مفهوم فشرده‌سازی پالس استفاده می‌شود. از آنجایی که سیگنال‌های منعکس شده از سطح زمین، در هر دو جهت برد و سمت پخش شده‌اند، نیاز به الگوریتمی می‌باشد تا بتوان با پردازش سیگنال‌های منعکس شده، تصاویر نهایی از سطح زمین را استخراج نمود [۲ و ۳ و ۴]. مهم‌ترین الگوریتم‌های تشکیل تصویر حوزه فرکانس برای پردازش سیگنال‌های دریافتی، عبارتند از: RDA^۱، CSA^۲ و Omega-k. در الگوریتم RDA در ابتدا فشرده‌سازی برد روی داده‌های دریافتی انجام می‌شود. در این مرحله با عبور دادن داده‌های دریافتی از فیلتر منطبق، آنها در جهت برد فشرده می‌شوند. پس از آن با درون‌یابی، مرحله اصلاح مهاجرت برد (RCMC^۳) انجام می‌شود. در نهایت نیز با عبور دادن داده‌های فشرده شده در جهت

برد از فیلتر منطبق مناسب در جهت سمت، داده‌ها در جهت سمت فشرده می‌شوند تا تصویر نهایی استخراج گردد. در تمامی الگوریتم‌ها، فرض بر این است که سکوی رادار در مسیر مستقیم و با سرعت ثابت حرکت کند. از آنجایی که به دلیل اغتشاشات جوی و مانورهای هواپیما، حرکت سکوی رادار در مسیر مستقیم نبوده و همراه با انحراف می‌باشد، الگوریتم‌های تشکیل تصویر نمی‌توانند تصاویر مناسبی از سطح زمین فراهم کنند [۵]. با توجه به اینکه وجود انحراف حرکت، باعث تغییر فاصله رادار تا هدف می‌شود و فاصله رادار تا هدف به صورت یک فاز در سیگنال‌های دریافتی مشاهده می‌شود، بنابراین برای جبران خطا باید با ضرب فازی، خطای به وجود آمده در فاز سیگنال دریافتی را جبران کرد. به منظور جبران انحراف حرکت، روشی دو مرحله‌ای در الگوریتم‌های حوزه فرکانس ارائه شده است [۶]. در مرحله اول، در هر لحظه سمت، میانگین خطا برای تمامی نقاط رد بیم محاسبه می‌شود و با یک ضرب فازی در سیگنال‌های دریافتی متناظر با آن لحظه سمت، بخش عمده خطا جبران می‌شود. از آنجایی که در این مرحله، بخش عمده خطا حذف می‌شود، این مرحله، جبران‌سازی عمده^۴ نام دارد. توجه شود که جایگاه این مرحله، قبل از فشرده‌سازی برد می‌باشد.

⁴ Bulk Motion Compensation

ایمیل نویسنده پاسخگو: m.hajipour@ec.iut.ac.ir

¹ Range Doppler Algorithm

² Chirp Scaling Algorithm

³ Range Cell Migration Compensation

نظرگرفتن خطای باقیمانده دنبال نموده و نشان می‌دهیم که در مرحله جبران‌سازی تفاضلی، رابطه فاز اضافه شونده کمی تغییر خواهد کرد. در ادامه نشان می‌دهیم که وجود خطای حرکت و حتی اعمال جبران‌سازی، می‌تواند منجر به ناکارآمدی RCMC شود. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن این مشکل، نشان می‌دهیم که یک مرحله میانی جبران‌سازی، باید در حین فشرده‌سازی برد انجام گیرد. پس از آن با شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که چگونه تغییرات پیشنهادی در جبران‌سازی باعث بهبود معیارهای کیفیت تصویر می‌گردند. در بخش دوم، به معرفی کامل الگوریتم RDA همراه با بلوک‌های جبران‌سازی حرکت (روش جبران‌سازی مرسوم) و در بخش سوم، به معرفی پیشنهادها ارائه‌شده و دو اصلاحی می‌پردازیم که برای بهبود جبران‌سازی مطرح شده است. در بخش چهارم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را برای روش‌های پیشنهادی نشان داده و آنها را با جبران‌سازی مرسوم مقایسه خواهیم نمود. سرانجام نیز در بخش آخر، نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲. الگوریتم RDA همراه با جبران‌سازی

الگوریتم RDA در سه مرحله، تصویر فشرده شده نهایی را فراهم می‌کند. در ابتدا با استفاده از FFT سیگنال دریافتی، به حوزه فرکانس برد و زمان سمت برده می‌شود، سپس با ضرب سیگنال به‌دست آمده در حوزه فرکانس برد و زمان سمت، در مزدوج مختلط تبدیل فوریه سیگنال ارسالی و آوردن سیگنال حاصل به حوزه زمان با استفاده از iFFT، فشرده‌سازی برد انجام می‌شود. این کار در واقع معادل عبور سیگنال دریافتی از یک فیلتر منطبق می‌باشد. در مرحله دوم با بردن سیگنال به حوزه زمان برد و فرکانس سمت، با استفاده از درون‌یابی (روش دقیق) یا ضرب فازی (روش تقریبی) به اصلاح مهاجرت برد پرداخته می‌شود و در مرحله سوم با استفاده از یک فیلتر منطبق در حوزه فرکانس سمت و زمان برد، فشرده‌سازی را در جهت سمت انجام می‌دهد [۱].

می‌دانیم که معادله سیگنال دریافتی برای یک هدف نقطه‌ای به صورت زیر است [۱]:

$$S(t, \eta) = p\left(t - \frac{2R(\eta)}{c}\right) w \sqrt{b^2 - 4ac} \times (\eta - \eta_0) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta)) \quad (1)$$

در این رابطه، $p(t)$ سیگنال ارسالی است که در دریافت به اندازه $\frac{2R}{c}$ شیفت زمانی پیدا کرده است. w نیز شدت سیگنال سمت می‌باشد. t زمان برد، η زمان سمت، η_0 زمان سمت متناظر با عبور مرکز بیم از روی هدف و λ بیانگر طول موج می‌باشد. وجود جمله نمایی، فاصله رادار را از هدف نشان می‌دهد. بنابراین در صورتی که فاصله رادار از هدف تغییر کند، سیگنال دریافتی دچار خطا می‌شود.

جبران خطای باقیمانده که مقدار کوچک‌تری در مقایسه با خطای حذف شده در مرحله اول دارد، بعد از اصلاح مهاجرت برد با یک ضرب فازی مشابه مرحله اول انجام می‌گیرد. این خطا مقدار کوچکی داشته و مرحله جبران‌سازی تفاضلی^۱ نام دارد.

لازم به ذکر است که جایگاه مرحله دوم جبران‌سازی، بعد از اصلاح مهاجرت برد می‌باشد. به عبارت دیگر، مرحله دوم می‌تواند بلافاصله بعد از مرحله اول صورت گیرد، اما چون بعد از مرحله اول، باید ضرب فازی مرحله دوم روی تمامی سیگنال‌های دریافتی انجام گیرد، منجر به بار محاسباتی زیادی می‌شود. به همین دلیل (کاهش بار محاسباتی)، مرحله دوم جبران‌سازی بعد از RCMC انجام می‌شود. کاهش بار محاسباتی به این دلیل است که بعد از RCMC، تمامی داده‌ها در یک برد خاص متمرکز شده‌اند و ضرب فازی مرحله دوم فقط در یک برد خاص انجام می‌گیرد [۷ و ۸].

علاوه بر روش مرسوم دو مرحله‌ای فوق، موضوعات دیگری نیز در مقالات مربوطه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: جبران‌سازی در رادارهای موج پیوسته [۹ و ۱۰]، بهبود جبران‌سازی در حالت وجود هدف متحرک با به‌کارگیری کد باینری در فشرده‌سازی پالس [۱۱]، بهبود روش جبران‌سازی دو مرحله‌ای با در نظرگرفتن تأثیر خطای حرکت روی مقدار مهاجرت برد با بهره‌گیری از روش‌های MD^3 [۱۲]، PGA^2 ، بهبود روش‌های RDM و Autofocus با استفاده از مفهوم PSD^4 [۱۳ و ۱۴] جبران‌سازی در حالت استفاده از زاویه لوجی زیاد با در نظرگرفتن رابطه خطا و زاویه لوجی [۱۵]، جبران‌سازی با استفاده از مفهوم تقسیم فرکانسی در حالت استفاده از بیم وسیع [۱۶ و ۱۷] و روش سه مرحله‌ای برای بهبود جبران‌سازی با اصلاح دقیق مهاجرت برد و استفاده از تقسیم‌بندی روزنه [۱۸ و ۱۹].

در الگوریتم RDA همراه با بلوک‌های جبران‌سازی، اولین مرحله، جبران‌سازی عمده می‌باشد. پس از اعمال این مرحله، سیگنال دریافتی که فقط حاوی خطای باقیمانده است، باید وارد بلوک فشرده‌سازی برد شود. از آنجایی که خطای باقیمانده تابعی از زمان‌های برد و سمت می‌باشد، بنابراین فشرده‌سازی برد باید روی خطای باقیمانده تأثیر گذاشته و به عبارت دیگر باید تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای باقیمانده لحاظ شود [۲۰ و ۲۱]، اما در روش دو مرحله‌ای جبران‌سازی (روش مرسوم)، خطا در دو مرحله مجزا و مستقل از الگوریتم تشکیل تصویر، جبران می‌شود.

به همین علت هدف اصلی مقاله حاضر آن است که با در نظرگرفتن تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای باقیمانده، جبران‌سازی با دقت بیشتری انجام گیرد. برای این منظور در ابتدا با تقریب خطای حرکت با یک مدل خطی، مدل مناسبی جهت پردازش سیگنال‌های دریافتی در الگوریتم RDA ارائه می‌شود، سپس فشرده‌سازی برد را با در

¹ Differential Motion Compensation

² Phase Gradient Autofocus

³ Map Drift

⁴ Power Spectra Density

$$\Delta R_c(\eta) = \sqrt{(z+d(\eta))^2 + x^2(t_0)} - \sqrt{z^2 + x^2(t_0)} \quad (6)$$

$$\sqrt{z^2 + x^2(t_0)} \left(\sqrt{1 + \frac{2zd(\eta) + d(\eta)}{z^2 + x^2(t_0)}} - 1 \right)$$

که در آن، t_0 زمان متناظر با برد میانی می‌باشد. در رابطه بالا به صورت زیر قابل بیان است [۲۱]:

$$\Delta R_c(\eta) = R_0 \left(\sqrt{1 + \frac{2zd(\eta) + d(\eta)}{R_0^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

مرحله جبران سازی عمده، با ضرب رابطه زیر در سیگنال دریافتی انجام می‌شود [۷]:

$$\exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_c(\eta)) \quad (8)$$

جمله دوم که وابسته به زمان‌های برد و سمت می‌باشد و در مقایسه با جمله اول مقدار کمی دارد، خطای تفاضلی نامیده می‌شود و بعد از اصلاح مهاجرت برد حذف می‌گردد. به این مرحله، جبران سازی خطای باقیمانده گفته می‌شود. این خطا از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\Delta R_v(t, \eta) = \Delta R(t, \eta) - \Delta R_c(\eta) \quad (9)$$

جبران سازی تفاضلی نیز با ضرب فازی زیر انجام می‌گیرد [۷]:

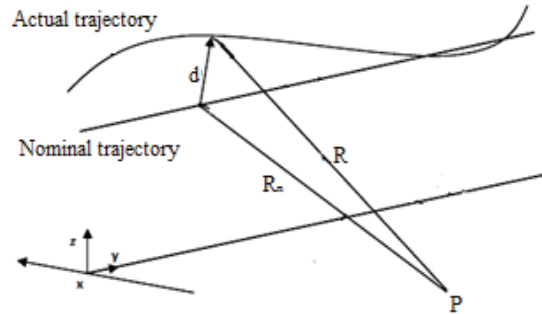
$$\exp(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_v(t, \eta)) \quad (10)$$

بلوک دیاگرام الگوریتم RDA بدون جبران سازی در شکل ۲ و در حالت همراه با جبران سازی، در شکل ۳ آمده است.



شکل ۲. الگوریتم RDA بدون جبران سازی خطا [۲۱]

در شکل ۱ که هندسه SAR با وجود خطا نشان داده شده است، فرض شده که سکوی رادار در جهت محور y حرکت نموده و ارتفاع آن در جهت محور z و به اندازه بردار d از مسیر خود منحرف شده باشد که در نتیجه آن فاصله رادار از هدف نقطه‌ای P از مقدار R_n به R تغییر می‌کند. همچنین سطح مورد نظر برای تصویربرداری که در این شکل، هدف نقطه‌ای P است، در صفحه xy می‌باشد.



شکل ۱. هندسه SAR با وجود خطا برای هدف نقطه‌ای [۲۱]

از آنجایی که می‌خواهیم از یک سطح تصویربرداری کنیم، پس در صورت داشتن خطای حرکت، فاصله نقاط مختلف از رادار به میزان‌های مختلفی تغییر می‌کند. بنابراین میزان جبران خطای برد برای هر نقطه با سایر نقاط متفاوت می‌باشد. مقدار تغییر برد برای زمان‌های مختلف برد و سمت از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\Delta R(t, \eta) = R(t, \eta) - R_n(t) \quad (2)$$

در صورتی که پهنای بیم کم باشد، R و R_n در هر لحظه سمت (η) ثابت، به صورت زیر می‌باشند [۲۱]:

$$R(t, \eta) = \sqrt{(z+d(\eta))^2 + (x(t))^2} \quad (3)$$

$$R_n(t) = \sqrt{z^2 + (x(t))^2} \quad (4)$$

در این روابط z بیانگر ارتفاع رادار و $x(t)$ مکان هدف در ناحیه پوشش^۱ را مشخص می‌کند. برای جبران سازی از روش دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این روش مقدار ΔR را به دو جمله تجزیه می‌کنیم، به گونه‌ای که جمله اول مربوط به مقدار خطا در برد میانی و جمله دوم متناظر با خطای سایر نقاط باشد [۷]:

$$\Delta R(t, \eta) = \Delta R_c(\eta) + \Delta R_v(t, \eta) \quad (5)$$

جمله اول که بخش عمده خطا را تشکیل می‌دهد، وابسته به زمان سمت و مستقل از زمان برد بوده و قبل از شروع الگوریتم تشکیل تصویر، حذف می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، به این مرحله، جبران سازی عمده گفته می‌شود. برای محاسبه مقدار این خطا خواهیم داشت [۲۱]:

¹ Swath

برای مدل سازی خطای باقیمانده در خروجی فشرده ساز برد، می توان از رابطه (۱۲) استفاده نموده و تأثیر فشرده ساز برد بر آن را بررسی نمود که البته این کار بسیار دشواری خواهد بود. لذا برای ساده سازی دنبال نمودن اثر بلوک فشرده ساز برد، از تقریب های زیر استفاده می کنیم. در مرحله اول با استفاده از بسط مک لورن تابع رادیکالی به کار رفته در ΔR نسبت به متغیر t داریم [۲۱]:

$$\begin{aligned} \Delta R(t, \eta) &\approx (ct/2) \\ &\times \left\{ 1 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1\right) \left(\frac{1}{2} - 2\right) \dots \left(\frac{1}{2} - n + 1\right)}{n!} \right] \right. \\ &\times \left. \left(\frac{2zd(\eta) + d^2(\eta)}{(ct/2)^2} \right)^n - 1 \right\} \quad (13) \\ &= \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1\right) \left(\frac{1}{2} - 2\right) \dots \left(\frac{1}{2} - n + 1\right)}{n!} \right] \\ &\times \frac{[2zd(\eta) + d^2(\eta)]^n}{(ct/2)^{2n-1}} \end{aligned}$$

با صرف نظر کردن از جملات سوم به بعد خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \Delta R(t, \eta) &\approx \\ &0.5 \times \frac{2zd(\eta) + (d(\eta))^2}{(ct/2)} \quad (14) \\ &- 0.125 \frac{[2zd(\eta) + (d(\eta))^2]^2}{(ct/2)^3} \end{aligned}$$

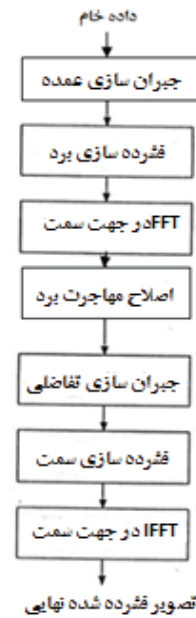
با بسط تیلور این تابع نسبت به t حول نقطه t_0 و صرف نظر از جملات سوم به بعد، داریم:

$$\begin{aligned} \Delta R(t, \eta) &\approx \\ &\left\{ 0.5 \times [2zd(\eta) + d^2(\eta)] \times \frac{2}{c} \times \frac{1}{t_0} \right\} \quad (15) \\ &- \left\{ 0.5 \times [2zd(\eta) + d^2(\eta)] \times \frac{2}{c} \times \left[\frac{1}{t_0^2} \right] \right\} (t - t_0) \end{aligned}$$

بنابراین در واقع می توان خطای مورد نظر را به صورت یک تابع خطی از t در نظر گرفت. در نهایت مدل خطا در ورودی الگوریتم به صورت زیر خواهد بود [۲۱]:

$$\Delta R(t, \eta) \approx \Delta R_c(\eta) + a(\eta) \times (t - t_0) \quad (16)$$

در این رابطه، جمله دوم همان خطایی است که در مرحله جبران سازی تفاضلی حذف می شود. a و ΔR_c در رابطه (۱۶) به صورت زیر به دست می آید:



شکل ۳. الگوریتم RDA همراه با جبران سازی خطا [۲۱]

۳. پیشنهاد روشی جدید برای تقریب خطای باقیمانده در خروجی بلوک RCMC

روشن است که در صورتی که پهنای بیم کم باشد، به ازای یک زمان سمت خاص (η ثابت)، برد هدف، تابعی از زمان برد می باشد، بنابراین براساس رابطه (۴) برد هدف به صورت زیر قابل بیان است:

$$R_n(t) = \frac{ct}{2} = \sqrt{z^2 + x(t)^2} \quad (11)$$

حال با روشی مشابه روش به کار گرفته شده در رابطه (۶) و استفاده از رابطه (۱۱) داریم [۲۱]:

$$\begin{aligned} \Delta R(t, \eta) &= \\ &\sqrt{z^2 + x(t)^2} \left(\sqrt{1 + \frac{2zd(\eta) + d(\eta)}{z^2 + x(t)^2}} - 1 \right) = \quad (12) \\ &(ct/2) \times \left(\sqrt{1 + \frac{2zd(\eta) + (d(\eta))^2}{(ct/2)^2}} - 1 \right) \end{aligned}$$

چنانکه مشاهده می شود $\Delta R(t, \eta)$ و به تبع آن $\Delta R_v(t, \eta)$ تابعی از t نیز می باشند. حال اگر پس از جبران سازی عمده و حذف ΔR_c ، فشرده سازی برد را به طور عادی (مانند روش جبران سازی دو مرحله ای استاندارد) انجام دهیم، در خروجی فشرده ساز برد، خطای باقیمانده تغییر کرده است؛ چرا که این خطا تابعی از زمان برد بوده و فشرده ساز برد نیز روی زمان برد عمل می کند.

این نکته در روش جبران سازی دو مرحله ای استاندارد در نظر گرفته نشده است. ایده جدید این مقاله (روش پیشنهادی اول)، لحاظ نمودن این تغییر خطای باقیمانده در خروجی فشرده ساز برد می باشد.

$$F(f, \eta) \approx S(f, \eta)P^*(f) = \frac{1}{\left|1 - \frac{2a(\eta)}{c}\right|} P^*(f) P\left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}}\right) w(\eta - \eta_0) \times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) + \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}}\right)(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0)]\right\} \quad (21)$$

اکنون با قرار دادن رابطه $P^*(f) = \text{rect}\left(\frac{f}{K_r\tau}\right) \exp(j\pi \frac{f^2}{K_r})$ در (۲۱) خواهیم داشت:

$$F(f, \eta) \approx \frac{1}{\left|1 - \frac{2a(\eta)}{c}\right|} \text{rect}\left(\frac{f}{K_r\tau}\right) \times \text{rect}\left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{(1 - \frac{2a(\eta)}{c})(K_r\tau)}\right) \times \exp(j\pi \frac{f^2}{K_r}) \exp\left(-j\pi \frac{(f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0)^2}{(1 - \frac{2a(\eta)}{c})^2 K_r}\right) \times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) + \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}}\right)(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0)]\right\} \quad (22)$$

از آنجایی که جملات نمایی موجود در سطر دوم رابطه (۲۲) در مقایسه با خطای باقیمانده، مقدار کوچکی دارند، می توان از مقدار آنها صرف نظر کرد.

از مقدار $1 - \frac{2a(\eta)}{c}$ نیز به دلیل کوچک بودن، در تمامی قسمت ها به جز در مخرج تابع مستطیلی دوم، صرف نظر می کنیم. بنابراین خواهیم داشت [۲۱]:

$$a(\eta) = -0.5 \times [2zd(\eta) + d^2(\eta)] \times \frac{2}{c} \times \left[\frac{1}{t_0}\right] \quad (17)$$

$$\Delta R_c(\eta) = 0.5 \times [2zd(\eta) + d^2(\eta)] \times \frac{2}{c} \times \frac{1}{t_0} - 0.125 \times [2zd(\eta) + d^2(\eta)]^2 \times \left(\frac{2}{c}\right)^3 \times \left(\frac{1}{t_0}\right)^3 \quad (18)$$

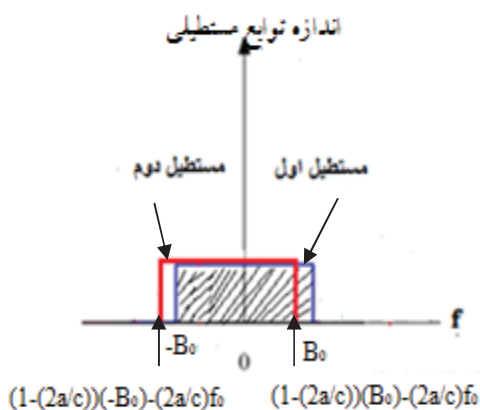
در واقع در روش پیشنهادی می خواهیم خطا را به صورت رابطه (۱۶) در نظر بگیریم تا بتوانیم روابط فشرده سازی برد را با در نظر گرفتن خطا دنبال کنیم. پس در صورتی که این رابطه را به عنوان خطا در معادله سیگنال دریافتی قرار دهیم، خواهیم داشت [۲۱]:

$$S(t, \eta) = p\left[t - \frac{2}{c}(R(\eta) + \Delta R(t, \eta))\right] \times w(\eta - \eta_0) \exp(-j(4\pi/\lambda)(R(\eta) + \Delta R(t, \eta))) = p\left[t - \frac{2}{c}(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) + a(\eta) \times (t - t_0))\right] \times w(\eta - \eta_0) \times \exp[-j(4\pi/\lambda)(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) + a(\eta) \times (t - t_0))] \quad (19)$$

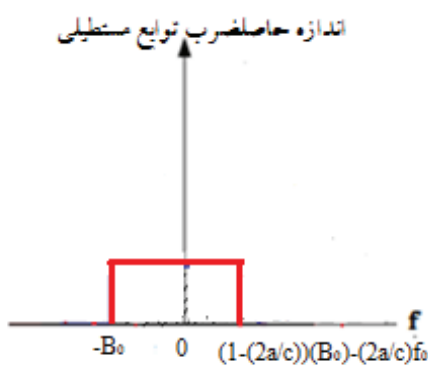
با اعمال مرحله جبران سازی عمده و حذف خطای ΔR_c در فاز سیگنال دریافتی و سپس تبدیل فوریه گرفتن از سیگنال دریافتی، جهت فشرده سازی برد، خواهیم داشت [۲۱]:

$$S(f, \eta) \approx \frac{1}{\left|1 - \frac{2a(\eta)}{c}\right|} P\left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}}\right) w(\eta - \eta_0) \times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) + \left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1 - \frac{2a(\eta)}{c}}\right)(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0)]\right\} \quad (20)$$

در این رابطه f_0 بیانگر فرکانس سیگنال ارسالی می باشد. با ضرب رابطه (۲۰) در $P^*(f)$ (مزدوج مختلط تبدیل فوریه سیگنال ارسالی) داریم:



شکل ۶. دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a > 0$



شکل ۷. حاصل ضرب دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a > 0$

مقدار پهنا $B_0 = k_r \tau$ بیانگر پهناى باند سیگنال ارسالی می‌باشد. مقدار پهنا (B_{01}) و جابه‌جایی مستطیل حاصل (D_1) برای حالت $a < 0$ زیر آمده است:

$$B_{01} = 2 \times [B_0 + \frac{a}{c}(f_0 - B_0)] \quad (24)$$

$$D_1 = \frac{a}{c}(f_0 - B_0) \quad (25)$$

همچنین مقدار پهنا (B_{02}) و جابه‌جایی مستطیل حاصل (D_2) برای حالت $a > 0$ در روابط ۲۶ و ۲۷ آمده است.

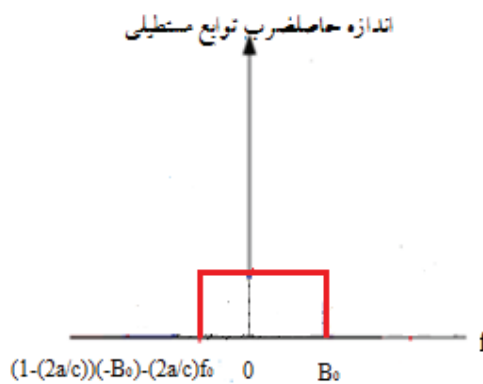
$$B_{02} = 2 \times [B_0 - \frac{a}{c}(f_0 + B_0)] \quad (26)$$

$$D_2 = \frac{a}{c}(f_0 - B_0) \quad (27)$$

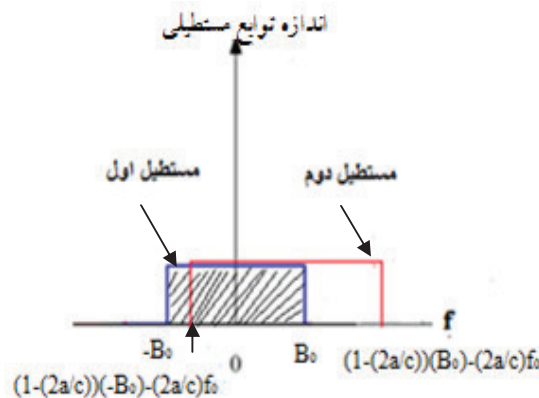
همان‌طور که می‌بینیم مقدار جابه‌جایی مستطیل جدید، برای هر دو حالت یکسان است، اما پهناى مستطیل حاصل ضرب در دو حالت با هم متفاوت است.

$$F(f, \eta) \approx \text{rect}\left(\frac{f}{K_r \tau}\right) \text{rect}\left(\frac{f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0}{(1 - \frac{2a(\eta)}{c})(K_r \tau)}\right) \times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} [f_0(R(\eta) - a(\eta)t_0) + (f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0)(R(\eta) + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_0)]\right\} \quad (23)$$

از آنجایی که تابع مستطیلی دوم، دارای پهناى متفاوت نسبت به تابع مستطیلی اول است و کمی هم نسبت به مبدأ جابه‌جا شده است، بنابراین حاصل ضرب این دو تابع، یک تابع مستطیلی با پهناى متفاوت خواهد بود که مقدار آن، وابسته به علامت a می‌باشد. این دو تابع مستطیلی همراه با حاصل ضرب آنها برای $a < 0$ در شکل‌های ۴ و ۵ و برای $a > 0$ در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۴. دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a < 0$



شکل ۵. حاصل ضرب دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a < 0$

$$\begin{aligned} & \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[\frac{a(\eta)}{c} (B_0)\right] (R(\eta))\right. \\ & \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o\right\} = \\ & \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[a(\eta)(B_0)\left(\frac{t}{2} + \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right)\right]\right\} \end{aligned} \quad (31)$$

با قرار دادن روابط (۳۰) و (۳۱) در رابطه (۲۹) و ضرب آن در جمله‌ی نمایی موجود در سطر سوم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} F(t, \eta) \approx & \frac{A}{K_r \tau} R_x \left\{ \frac{A}{K_r \tau} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta)) \right. \right. \\ & \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o \right] \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} (R(\eta) - a(\eta)t_o)\right\}$$

$$\times \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} a(\eta)t\right)$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \left[a(\eta) \left(\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right)\right]\right\}$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} B_0 \left[a(\eta) \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right]\right\}$$

با ضرب جملات نمایی اول و دوم رابطه (۳۲)، رابطه (۳۳) به دست می‌آید. در رابطه (۳۳) مشاهده می‌کنیم که جمله‌ی نمایی دوم، همان جمله‌ای است که در روش جبران‌سازی مرسوم با در نظر گرفتن خطا به صورت خطی، در مرحله دوم حذف می‌شود و جملات نمایی سوم و چهارم، جملاتی هستند که به دلیل فشرده‌سازی برد همراه با در نظر گرفتن خطا به وجود آمده‌اند و باید همراه با جمله‌ی نمایی دوم حذف شوند [۲۱].

$$\begin{aligned} F(t, \eta) \approx & \frac{A}{K_r \tau} R_x \left\{ \frac{A}{K_r \tau} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta)) \right. \right. \\ & \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o \right] \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

$$\times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta)\right\}$$

$$\times \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} a(\eta)(t - t_o)\right]$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \left[a(\eta) \left(\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right)\right]\right\}$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} B_0 \left[a(\eta) \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right]\right\}$$

چون در اینجا مقدار پهنای مستطیل اهمیت چندانی ندارد، از نماد B_{01} به جای آن استفاده می‌کنیم که می‌تواند هر یک از مقادیر B_{01} یا B_{02} باشد. با جای‌گذاری تابع مستطیل حاصل ضرب در رابطه (۲۳) داریم:

$$\begin{aligned} F(f, \eta) \approx & \text{rect}\left(\frac{f + \frac{a(\eta)}{c}(f_0 - B_0)}{A}\right) \\ & \times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} [R(\eta) - a(\eta)t_o]\right\} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[\left(f + \frac{2a(\eta)}{c} f_0\right) (R(\eta))\right. \right. \\ \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o\right]\right\}$$

سرانجام با اخذ IFFT از رابطه (۲۸)، سیگنال فشرده شده در جهت برد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} F(t, \eta) \approx & \frac{A}{K_r \tau} R_x \left\{ \frac{A}{K_r \tau} \left[t - \frac{2}{c} (R(\eta)) \right. \right. \\ & \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o \right] \right\} \\ & \times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} (R(\eta) - a(\eta)t_o)\right\} \\ & \times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} (f_0 - B_0) \left(\frac{a(\eta)t}{2}\right)\right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[\frac{a(\eta)}{c} (f_0) (R(\eta))\right. \right. \\ \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o\right]\right\}$$

$$\times \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[\frac{a(\eta)}{c} (B_0) (R(\eta))\right. \right. \\ \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o\right]\right\}$$

که در این رابطه، $R_x(t)$ تبدیل فوریه معکوس $\text{rect}\left(\frac{f}{K_r \tau}\right)$ می‌باشد.

با در نظر گرفتن $R = \frac{ct}{2}$ در η ثابت، جملات نمایی سوم و چهارم چنین نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} & \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} \left[\frac{a(\eta)}{c} (f_0) (R(\eta))\right. \right. \\ & \left. \left. + \Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o\right]\right\} = \\ & \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} \left[a(\eta) \left(\frac{t}{2} + \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c}\right)\right]\right\} \end{aligned} \quad (30)$$

RCMC را مانند حالت ایده‌آل انجام داد. در واقع روش پیشنهادی دوم، مکمل روش پیشنهادی اول می‌باشد. بلوک دیگرام روش پیشنهادی دوم در شکل ۸ آمده است. لازم به‌ذکر است که برای حذف آرگومان $\frac{2}{c}[\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o]$ می‌توان مرحله جبران‌سازی عمده را بلافاصله پس از تبدیل فوریه گرفتن از سیگنال ورودی با رابطه زیر انجام داد [۲۲]:

$$\exp\left\{j \frac{4\pi}{c} \left[f_0 \left(1 + \frac{2a(\eta)}{c} \right) + f \right] \times [\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o] \right\} \quad (38)$$

اما عیب این روش آن است که باید فاز بالا در کلیه داده‌ها ضرب شود؛ در حالی که مزیت روش پیشنهادی دوم آن است که چون پس از فشرده‌سازی برد انجام گرفته، این فاز فقط در داده‌های فشرده شده، ضرب و منجر به کاهش بار محاسباتی می‌شود. بنابراین انتظار داریم نتایج حاصل از مدل‌سازی خطا در خروجی این بلوک‌ها که در قسمت بالا شرح داده شد، منجر به بهبود کارایی جبران‌ساز گردد که این موضوع را در بخش بعد بررسی خواهیم نمود.

۴. شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از پارامترهای جدول ۱ و یک هدف نقطه‌ای استفاده شده است. در شبیه‌سازی، فرض بر این است که برای تصویربرداری از پهنای بیم باریک استفاده شده است. لازم به‌ذکر است که با افزایش پهنای بیم، از کارایی روش‌های پیشنهادی کاسته می‌شود و برای حل این مشکل باید از تقسیم‌بندی پهنای بیم استفاده و سپس روی هر قسمت از پهنای بیم جبران‌سازی به‌صورت جداگانه اعمال شود.

در شبیه‌سازی‌های مربوط به جبران‌سازی فرض شده است که انحراف حرکت به‌صورت سینوسی با فرکانس 0.01 هرتز باشد [۲۱]. از آنجایی که هدف اصلی در این مقاله بررسی کارایی روش‌های پیشنهادی بر حسب مقادیر مختلف خطا می‌باشد، لذا در تمامی شبیه‌سازی‌ها فرکانس خطا 0.01 هرتز در نظر گرفته شده و فقط دامنه خطا تغییر می‌کند. جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی را در حالت ایده‌آل (ستون اول)، در حالتی که خطایی سینوسی با دامنه ۱۰ متر وجود داشته و جبران‌سازی روی آن انجام نشده باشد (ستون دوم)، و نیز در حالت استفاده از روش‌های مختلف جبران‌سازی (ستون‌های ۳ تا ۵)، نشان می‌دهد. جدول ۳ نتایج مشابه را برای خطای ۲۰۰ متر نشان می‌دهد. از آنجایی که دو سینک در دو بعد برد و سمت، مختصات هدف را نشان می‌دهند، برای بررسی کیفیت تصویر، اندازه لوب‌های کناری مهم است. $PSLR^2$ نسبت بزرگترین لوب فرعی به لوب اصلی را نشان داده و $ISLR^3$ بیانگر مجموع انرژی موجود در لوب‌های کناری به لوب اصلی می‌باشد. IRW^4 نیز بیانگر عرض لوب

از آنجایی که معمولاً B_0 از f_0 بسیار کوچک‌تر می‌باشد، می‌توان از جمله‌نمایی آخر در رابطه (۳۳) صرف‌نظر کرده و از رابطه زیر در مرحله جبران‌سازی تفاضلی استفاده نمود [۲۱]:

$$\exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda} a(\eta)(t - t_o + t_1) \right] \quad (34)$$

$$t_1 = \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c} \quad (35)$$

این درحالی است که در روش‌های معمول، تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای باقیمانده، در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه در این روش‌ها خطای باقیمانده در خروجی بلوک فشرده‌ساز و اصلاح مهاجرت برد، همان خطای باقیمانده در ورودی این بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شود که امری نادرست است. بنابراین همان‌طور که مشاهده کردیم، بلوک دیگرام روش پیشنهادی اول، مانند روش جبران‌سازی مرسوم است و تنها در مقدار فاز اضافه شونده در مرحله دوم جبران‌سازی، با روش جبران‌سازی مرسوم تفاوت دارد. با استفاده از اصل ایستانی فاز (PSP^1) می‌توان با انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس داپلر، به اصلاح مهاجرت برد پرداخت. هنگامی که خطای حرکت وجود نداشته باشد، پس از اعمال قاعده PSP، پوش فرکانس سمت مستقل از η_0 و بنابراین نحوه اصلاح مهاجرت برد برای تمامی فرکانس‌های داپلر یکسان خواهد شد، اما در صورت وجود خطای حرکت، حتی با اعمال جبران‌سازی، به‌دلیل وجود آرگومان اضافه $\frac{2}{c}[\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o]$ در رابطه (۳۳)، در R_x ، پس از اعمال قاعده PSP، پوش فرکانس سمت وابسته به η_0 خواهد شد، بنابراین نمی‌توان مانند حالت ایده‌آل، مهاجرت برد را اصلاح کرد. برای غلبه بر این مشکل اصلاح، پیشنهادی دوم ارائه می‌شود، که در این روش از ضرب فازی زیر به‌عنوان مرحله میانی جبران‌سازی در رابطه (۲۸) استفاده می‌شود:

$$\exp\left\{ j \frac{4\pi}{c} f [\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o] \right\} \quad (36)$$

با انجام این مرحله جبران‌سازی، رابطه (۳۳) به‌صورت زیر خواهد شد:

$$F(t, \eta) \approx \frac{A}{K_r \tau} R_x \left\{ \frac{A}{K_r \tau} \left[t - \frac{2}{c} R(\eta) \right] \right\} \times w(\eta - \eta_0) \exp\left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta) \right\} \times \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} a(\eta)(t - t_o) \right] \times \exp\left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[a(\eta) \left(\frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c} \right) \right] \right\} \times \exp\left\{ -j \frac{4\pi}{c} B_0 \left[a(\eta) \frac{\Delta R_c(\eta) - a(\eta)t_o}{c} \right] \right\} \quad (37)$$

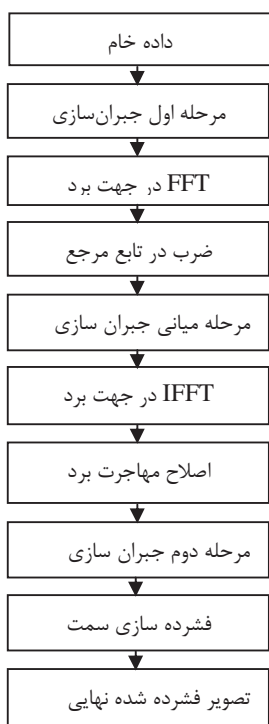
اکنون می‌توان با استفاده از PSP، داده‌ها را به حوزه داپلر برده و

² Peak Sidelobe Ratio
³ Integrated Sidelobe Ratio
⁴ Impulse Response Width

¹ Principle of Stationary Phase

جدول ۱. مقادیر پارامترهای شبیه سازی

مقدار	پارامتر
۲ متر	طول روزنه واقعی
۲۰۰ متر بر ثانیه	سرعت هواپیما
۳۰۰ هرتز	PRF
۱۰۰ مگاهرتز	پهنای باند سیگنال چرپ
۶۶ میلی متر	طول موج
۲/۵ میکروثانیه	دوره زمانی پالس
۱۴۱۴۰ متر	ارتفاع هواپیما
صفر	زاویه لوچی



شکل ۸. الگوریتم RDA همراه با روش جبران سازی پیشنهادی دوم

اصلی پاسخ ضربه می باشد. همان طور که می بینیم با وجود خطا، مقادیر PSLR و ISLR برای سمت خیلی بیشتر از برد تغییر می کنند و این نشان می دهد که تأثیر خطا روی سمت بیشتر از برد است. با اعمال جبران سازی دو مرحله ای، نتایج بهتر شده است، اما با استفاده از روش های پیشنهادی نتایج به حالت ایده آل نزدیک می شوند.

از طرفی با مشاهده نتایج مربوط به IRW می بینیم که با وجود اینکه با روش های جبران سازی پیشنهادی، مقادیر IRW به حالت ایده آل نزدیک تر می شوند، اما همواره مقادیر IRW از حالت ایده آل بیشتر هستند. به عبارت دیگر جبران سازی باعث افزایش IRW (افزایش پهنای تصویر فشرده شده در جهت های برد و سمت) می شود.

تصویر فشرده شده نهایی برای خطای ۱۰ متر و ۲۰۰ متر، در حالی که جبران سازی اعمال نشده باشد، در شکل ۹ آمده است [۲۱]. همان طور که مشاهده می کنیم بدون جبران سازی نمی توان هدف نهایی را تشخیص داد. همچنین تصویر فشرده شده نهایی در حالت ایده آل در شکل ۱۰، در حالت استفاده از روش جبران سازی مرسوم در شکل ۱۱، در حالت استفاده از روش جبران سازی پیشنهادی اول در شکل ۱۲، و در حالت استفاده از روش جبران سازی پیشنهادی دوم، در شکل ۱۳ آمده است.

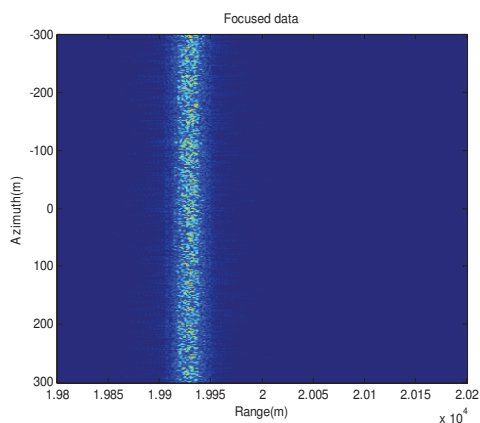
نمودارهای سینک مربوط به جهت سمت در هر پنج حالت در شکل های ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ آمده است. سرانجام نیز کارایی روش های جبران سازی (PSLR و ISLR) در مقابل مقدار خطا (از ۸۰ تا ۱۰۰۰ متر) در شکل های ۱۹ و ۲۰ مقایسه شده اند که حاکی از برتری قابل توجه روش های پیشنهادی و به ویژه روش دوم است. در شکل های ۱۹ و ۲۰، منحنی آبی عملکرد روش مرسوم جبران سازی، منحنی سبز، عملکرد روش پیشنهادی اول و منحنی قرمز، عملکرد روش پیشنهادی دوم را نشان می دهد.

جدول ۲. نتایج جبران سازی در حالت وجود خطای ۱۰ متر

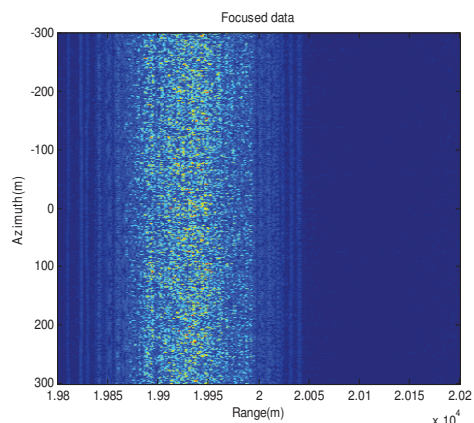
	ideal	Without mocomp	Two step mocomp	Proposed mocomp(1)	Proposed mocomp(2)
Azimuth PSLR(dB)	-۱۴/۸۰	-۱/۷۲	-۱۰/۳۳	-۱۰/۶۴	-۱۰/۶۷
Azimuth ISLR(dB)	-۹/۴۴	۱۳/۱۶	-۷/۷۸	-۷/۹۱	-۷/۹۳
Range PSLR(dB)	-۱۳/۴۲	-۱۲/۴۶	-۱۲/۸۹	-۱۲/۹۶	-۱۲/۹۹
Range ISLR(dB)	-۱۰/۷۹	-۸/۶۶	-۹/۴۹	-۱۰/۱۳	-۱۰/۱۶
Azimuth IRW(samples)	۶/۱۵	۲/۶۶	۸/۴۶	۸/۲۰	۸/۱۵
Range IRW(samples)	۳/۹۲	۶/۱۶	۶/۰۹	۶/۰۷	۶/۰۵

جدول ۳. نتایج جبران سازی در حالت وجود خطای ۲۰۰ متر

	ideal	Without mocomp	Two step mocomp	Proposed mocomp(1)	Proposed mocomp(2)
Azimuth PSLR(dB)	-۱۴/۸۰	-۰/۲۶	-۴/۷۴	-۷/۳۱	-۷/۴۹
Azimuth ISLR(dB)	-۹/۴۴	۱۸/۸۴	-۳/۲۵	-۵/۰۶	-۵/۱۴
Range PSLR(dB)	-۱۳/۴۲	-۴/۰۴	-۱۱/۸۸	-۱۲/۶۲	-۱۲/۷۳
Range ISLR(dB)	-۱۰/۷۹	۵/۱۶	-۵/۹۴	-۷/۲۲	-۷/۳۲
Azimuth IRW(samples)	۶/۱۵	۲/۵۴	۸/۹۸	۸/۶۵	۸/۵۷
Range IRW(samples)	۳/۹۲	۶/۴۹	۸/۴۹	۸/۳۹	۸/۳۱

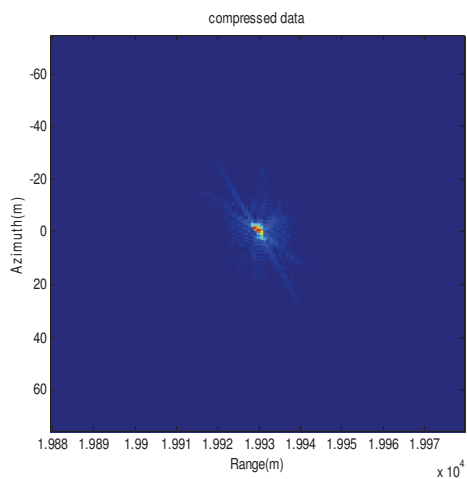


(ب)

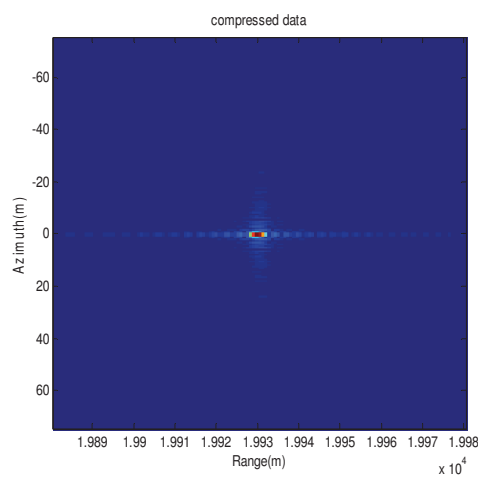


(الف)

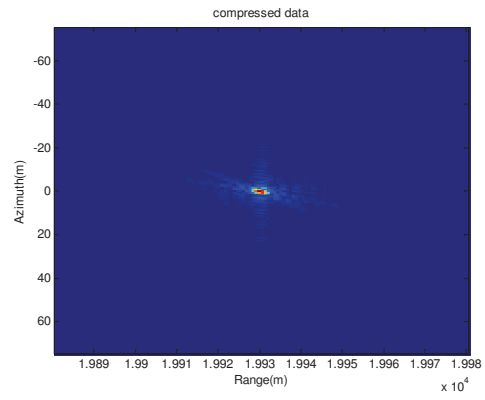
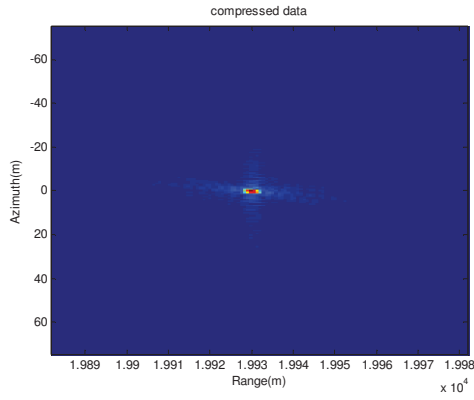
شکل ۹. تصویر نهایی بدون جبران سازی برای خطای با دامنه (الف) ۱۰ متر (ب) دامنه ۲۰۰ متر



شکل ۱۱. تصویر فشرده شده با جبران سازی مرسوم

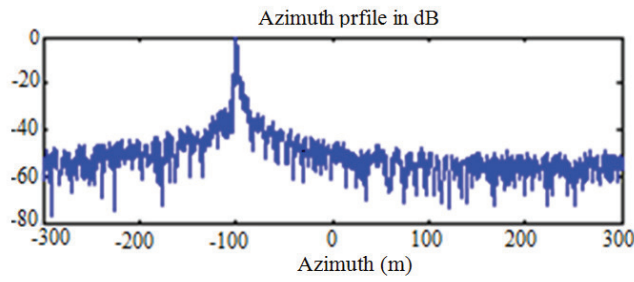


شکل ۱۰. تصویر فشرده شده در حالت ایده آل

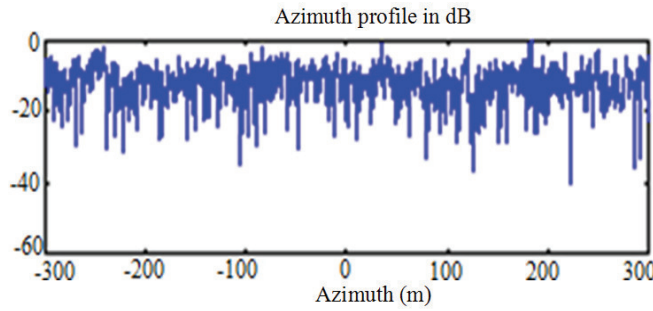


شکل ۱۳. تصویر فشرده شده با جبران سازی به روش دوم پیشنهادی

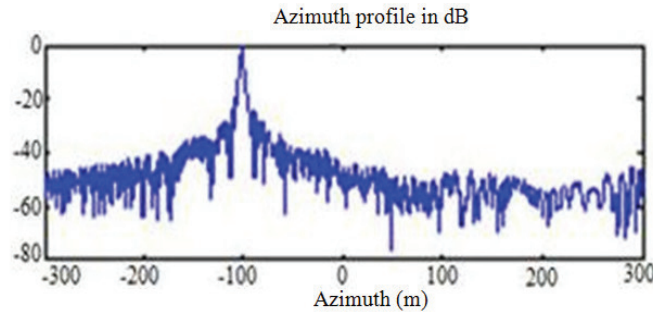
شکل ۱۲. تصویر فشرده شده با جبران سازی به روش اول پیشنهادی



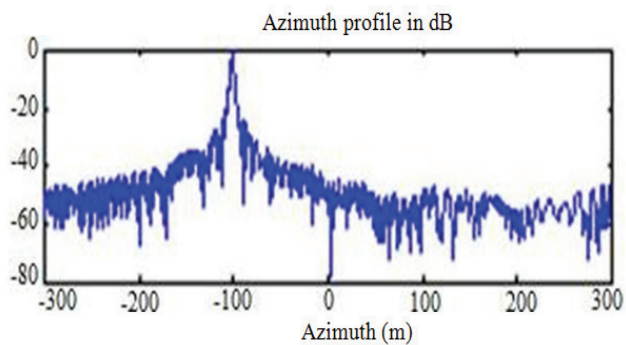
شکل ۱۴. نمودار سمت در حالت ایده آل



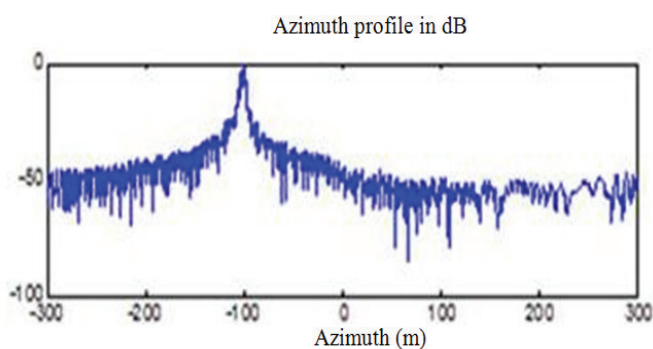
شکل ۱۵. نمودار سمت در حالت وجود خطا و بدون جبران سازی



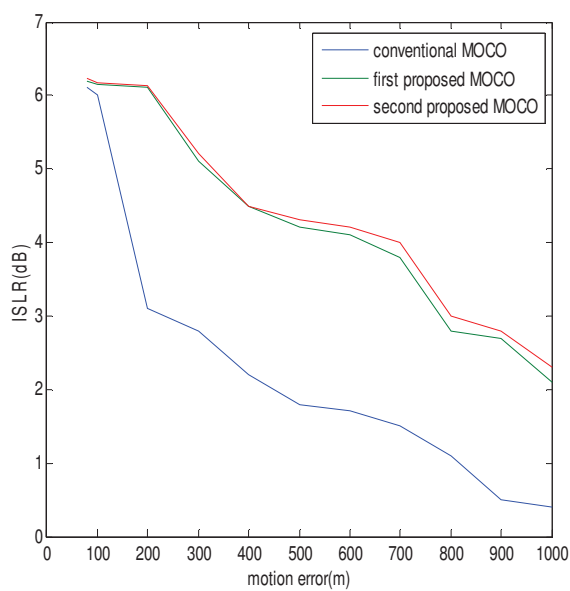
شکل ۱۶. نمودار سمت در حالت وجود خطا و جبران سازی مرسوم



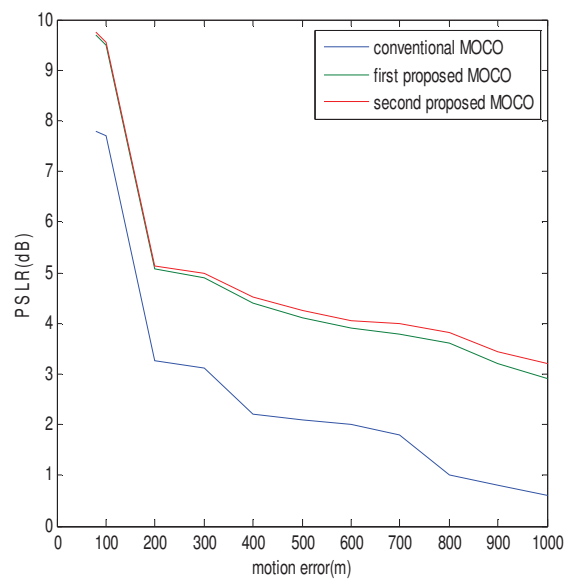
شکل ۱۷. نمودار سمت در حالت وجود خطا و روش اول پیشنهادی



شکل ۱۸. نمودار سمت در حالت وجود خطا و روش دوم پیشنهادی



شکل ۲۰. مقایسه عملکرد ISLR در روش‌های جبران‌سازی



شکل ۱۹. مقایسه عملکرد PSLR در روش‌های جبران‌سازی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم که در روند جبران‌سازی حرکت، هرگاه تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای تفاضلی در نظر گرفته شود، مقدار فازی که باید در مرحله جبران‌سازی تفاضلی اضافه شود، به‌صورت دقیق‌تر به‌دست آمده و این مقدار، کمی با روش جبران‌سازی دو مرحله‌ای مرسوم متفاوت است، اما همین تفاوت کم، باعث بهبود چشم‌گیری در جبران خطاهای نسبتاً زیاد می‌شود. لذا با تقریب خطی خطا در ورودی الگوریتم، اثر بلوک فشرده‌ساز برد را روی آن مد نظر قرار داده، اصلاحی را در قسمت جبران‌سازی تفاضلی (نسبت به روش مرسوم دو مرحله‌ای) پیشنهاد نمودیم. از طرفی با اعمال یک مرحله میانی جبران‌سازی، تأثیر خطا را در عملکرد بلوک اصلاح مهاجرت برد، کاهش دادیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیانگر توانایی بسیار بهتر این روش در متمرکز نمودن تصاویر، به‌ویژه برای خطاهای نسبتاً زیاد می‌باشد، به‌گونه‌ای که برای خطاهای زیاد، مقادیر ISLR و PSLR حدود دو دسیبل، بهتر می‌شوند.

۶. مراجع

- [9] Zaugg, E.C., Long, D.G., "Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing., Vol. 46, No. 10, pp. 2990–2998, Oct. 2008.
- [10] Wang, R., Luo, Y., Deng, Y., Zhang, Z., Liu, Y., "Motion Compensation for High-Resolution Automobile FMCW SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. pp. pp. 1-5, early access.
- [11] Lu, Y., Xu, Z., Yao, J., Geng, X., "Airborne SAR motion compensation and moving target indication", 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, pp. 681 – 685, 2012.
- [12] Daiyin, Z., "SAR signal based motion compensation through combining PGA and 2-D map drift", 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 435 – 438, 2009.
- [13] Hao, G., Yang, L., Qiulin, Q., Peiqing, L., "Studying atmospheric turbulence effects on aircraft motion for airborne SAR motion compensation requirement", IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), pp. 152 – 157, 2012.
- [14] Cantalloube, Hubert, M.J, Nahum, C., "Real-time Airborne SAR Imaging. Motion compensation and Autofocus issues", 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 734 – 737, 2012.
- [15] Fornaro, G., Franceschetti, G., Perna, S., "Motion compensation of squinted airborne SAR raw data: role of processing geometry", IEEE International conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol.2, pp. 1518 – 1521, 2004.
- [16] Li, Y., "Improvements to the Frequency Division-Based Subaperture Algorithm for Motion Compensation in Wide-Beam SAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 99, pp.1-5, 2013.
- [17] Guccione, P., Cafforio, C., "Motion Compensation Processing of Airborne SAR Data", IEEE International conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol.3, pp. 1154-1157, 2008.
- [18] Xing, M., "Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, pp. 2870 – 2883, 2009.
- [19] Zhang, L., "A Robust Motion Compensation Approach for UAV SAR Imagery", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, pp. 3202 – 3218, 2012.
- [۲۰] حاجی‌پور، م.، مدرس هاشمی، م. (۱۳۹۲) روشی جدید برای بهبود جبران‌سازی حرکت در رادارهای روزنه مصنوعی، مجموعه مقالات بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق، دانشگاه فردوسی، مشهد.
- [۲۱] حاجی‌پور، م. (۱۳۹۱) بررسی جبران‌سازی حرکت در تصاویر رادارهای روزنه مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
- [22] Franceschetti, G., Iodice, A., Perna, S., Riccio, D., "Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, pp. 2851-2860, 2006.
- [1] Wong, F.H., Cumming, I.G., Digital processing of synthetic aperture Radar data algorithms and implementation, Artech house, 2005.
- [2] Wang, B.C., Digital signal processing techniques and applications in Radar image processing, Wiley, 2008.
- [3] Raney, R.k., Balmer, R., "Precision SAR processing using chirp scaling", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., Vol. 32, No. 4, pp.786-799,1994.
- [4] Rocca, F., Prati, C., "SAR data focusing using seismic migration technique", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems , Vol. 27, No. 2, pp.194-207, 1991.
- [5] Kirk, J.C., "Motion compensation for synthetic aperture radar", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems , Vol AES-11, No. 3, pp.338-348, 1975.
- [6] Moreira, A., Huang, Y., "Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.32, pp.1029-1040, September 1994.
- [7] Fornaro, G., "Trajectory deviations in airborne SAR Analysis and compensation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 3, pp. 997–1009, Jul, 1999.
- [8] Fornaro, G., Franceschetti, G., Perna, S., "On center-beam approximation in SAR motion compensation", IEEE Transaction On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 3, No.2, pp. 276–280, Apr. 2006.