مجله علمی-پژوهشی «رادار»

سال اول، شماره۱، پائیز ۱۳۹۲؛ ص ۱۳-۱

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

مجید حاجی‌پور*[۱]، سیدمحمود مدرس‌هاشمی[۲]

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

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

چکیده

به‌دلیل وجود انحراف حرکت در سکوی حامل رادار روزنهٔ مصنوعی، نمی‌توان تصاویری با کیفیت مناسب از سطح زمین بـه‌دسـت آورد. به همین جهت، روشی دو مرحله‌ای برای جبران‌سازی خطای حرکت در الگوریتم‌های تشکیل تصویر به‌کار گرفته مـی‌شـود. در مقالـهٔ حاضر، ابتدا با در نظرگرفتن یک مدل خطی تقریبی برای خطای حرکت و سپس اعمال تأثیر مرحلهٔ فشـرده‌سـازی بـرد در الگـوریتم RDA روی خطای باقیمانده، نشان داده می‌شود که فاز اضافه شونده در مرحلهٔ جبران‌سازی تفاضلی، تغییر خواهـد کـرد. سـپس روش ارائه‌شده، با اعمال یک مرحلهٔ میانی جبران‌سازی در حین فشرده‌سازی برد، به‌منظور اصلاح دقیق‌تر مهـاجرت بـرد بررسـی مـی‌شـود. سرانجام با شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به روش دو مرحله‌ای مرسوم خواهد داشت.

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

۱. مقدمه

امروزه به‌منظور دست‌یابی به تصاویری بـا کیفیـت مناسـب از سـطح زمین، از رادارهای روزنهٔ مصنوعی (SAR) استفاده می‌شود. شرط لازم برای داشتن تصاویر با کیفیت مناسب، قدرت تفکیـک مناسـب در دو جهت برد و سمت می‌باشد. به‌دلیـل اسـتفاده از سـکوی متحـرک در SAR، بیم باریکی تولید می‌شود که باعث افزایش قـدرت تفکیـک در جهت سمت می‌گردد [۱]. برای رسیدن به قدرت تفکیک مناسـب در جهت برد نیز از مفهـوم فشـرده‌سـازی پـالس اسـتفاده مـی‌شـود. از آنجایی‌که سیگنال‌های منعکس شده از سطح زمین، در هر دو جهـت برد و سمت پخش شده‌اند، نیاز به الگوریتمی مـی‌باشـد تـا بتـوان بـا پردازش سیگنال‌های منعکس شده، تصاویر نهـایی از سـطح زمـین را استخراج نمود [۲ و ۳ و ۴]. مهم‌ترین الگوریتم‌هـای تشـکیل تصـویر حوزهٔ فرکـانس بـرای پـردازش سـیگنال‌هـای دریـافتی، عبارتنـد از: RDA[۱]، CSA[۲] و Omega-k. در الگوریتم RDA در ابتدا فشرده‌سـازی 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، مرحلهٔ اصلاح مهاجرت برد (RCMC[۳]) انجـام می‌شود. در نهایت نیز با عبور دادن داده‌های فشـرده شـده در جهـت برد از فیلتر منطبق مناسب در جهت سمت، داده‌ها در جهـت سـمت فشرده می‌شوند تا تصویر نهایی استخراج گردد.

در تمامی الگوریتم‌ها، فرض بر این اسـت کـه سـکوی رادار در مسـیر مستقیم و با سرعت ثابت حرکت کند. از آنجایی‌که به‌دلیل اغتشاشات جوی و مانورهای هواپیمـا، حرکـت سـکوی رادار در مسـیر مسـتقیم نبوده و همراه بـا انحـراف مـی‌باشـد، الگـوریتم‌هـای تشـکیل تصـویر نمی‌توانند تصاویر مناسبی از سطح زمین فراهم کنند [۵]. با توجه به اینکه وجود انحراف حرکت، باعث تغییر فاصلهٔ رادار تا هدف می‌شود و فاصلهٔ رادار تا هدف بـه‌صـورت یـک فـاز در سـیگنال‌هـای دریـافتی مشاهده می‌شود، بنابراین برای جبران خطا باید با ضرب فازی، خطای به‌وجود آمده در فاز سیگنال دریافتی را جبران کرد. به‌منظور جبـران انحراف حرکت، روشی دو مرحله‌ای در الگوریتم‌هـای حـوزهٔ فرکـانس ارائه‌شده است [۶]. در مرحلهٔ اول، در هر لحظه سمت، میانگین خطـا برای تمامی نقاط رد بیم محاسبه می‌شود و بـا یـک ضـرب فـازی در سیگنال‌های دریافتی متناظر با آن لحظه سمت، بخـش عمـدهٔ خطـا جبران می‌شود. از آنجایی‌که در این مرحله، بخش عمدهٔ خطـا حـذف می‌شود، این مرحله، جبران‌سازی عمـده[۴] نـام دارد. توجـه شـود کـه جایگاه این مرحله، قبل از فشرده‌سازی برد می‌باشد.

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

[1] Range Doppler Algorithm
[2] Chirp Scaling Algorithm
[3] Range Cell Migration Compensation
[4] Bulk Motion Compensation

جبران خطای باقیمانده که مقدار کوچک‌تری در مقایسه با خطای حذف شده در مرحلهٔ اول دارد، بعد از اصلاح مهاجرت برد با یک ضرب فازی مشابه مرحلهٔ اول انجام می‌گیرد. این خطا مقدار کوچکی داشته و مرحلهٔ جبران‌سازی تفاضلی [1] نام دارد.

لازم به‌ذکر است که جایگاه مرحلهٔ دوم جبران‌سازی، بعد از اصلاح مهاجرت برد می‌باشد. به‌عبارت دیگر، مرحلهٔ دوم می‌تواند بلافاصله بعد از مرحلهٔ اول صورت گیرد، اما چون بعد از مرحلهٔ اول، باید ضرب فازی مرحلهٔ دوم روی تمامی سیگنال‌های دریافتی انجام گیرد، منجر به بار محاسباتی زیادی می‌شود. به همین دلیل (کاهش بار محاسباتی)، مرحلهٔ 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 مرحلهٔ دوم فقط در یک برد خاص انجام می‌گیرد [۷و۸].

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 PGA [2] و MD [3] [۱۲]، بهبود روش‌های RDM و Autofocus با استفاده از مفهوم PSD [4] [۱۳و۱۴] جبران‌سازی در حالت استفاده از زاویهٔ لوچی زیاد با در نظرگرفتن رابطهٔ خطا و زاویهٔ لوچی [۱۵]، جبران‌سازی با استفاده از مفهوم تقسیم فرکانسی در حالت استفاده از بیم وسیع [۱۶و۱۷] و روش سه مرحله‌ای برای بهبود جبران‌سازی با اصلاح دقیق مهاجرت برد و استفاده از تقسیم‌بندی روزنه [۱۸و۱۹].

در الگوریتم RDA همراه با بلوک‌های جبران‌ساز، اولین مرحله، جبران‌سازی عمده می‌باشد. پس از اعمال این مرحله، سیگنال دریافتی که فقط حاوی خطای باقیماندهٔ است، باید وارد بلوک فشرده‌سازی برد شود. از آنجایی‌که خطای باقیماندهٔ تابعی از زمان‌های برد و سمت می‌باشد، بنابراین فشرده‌سازی برد باید روی خطای باقیمانده تأثیر گذاشته و به‌عبارت دیگر باید تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای باقیمانده لحاظ شود [۲۰و۲۱]، اما در روش دو مرحله‌ای جبران‌سازی (روش مرسوم)، خطا در دو مرحلهٔ مجزا و مستقل از الگوریتم تشکیل تصویر، جبران می‌شود.

به همین علت هدف اصلی مقالهٔ 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 نظرگرفتن خطای باقیمانده دنبال نموده و نشان می‌دهیم که در مرحلهٔ جبران‌سازی تفاضلی، رابطهٔ 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 مرحلهٔ 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 شدهٔ نهایی را فراهم می‌کند. در ابتدا با استفاده از FFT سیگنال دریافتی، به حوزهٔ فرکانس برد و زمان سمت برده می‌شود، سپس با ضرب سیگنال به‌دست آمده در حوزهٔ فرکانس برد و زمان سمت، در مزدوج مختلط تبدیل فوریه سیگنال ارسالی و آوردن سیگنال حاصل به حوزهٔ زمان با استفاده از IFFT، فشرده‌سازی برد انجام می‌شود. این کار در واقع معادل عبور سیگنال دریافتی از یک فیلتر منطبق می‌باشد.

در مرحلهٔ دوم با بردن سیگنال به حوزهٔ زمان برد و فرکانس سمت، با استفاده از درون‌یابی (روش دقیق) یا ضرب فازی (روش تقریبی) به اصلاح مهاجرت برد پرداخته می‌شود و در مرحلهٔ سوم با استفاده از یک فیلتر منطبق در حوزهٔ فرکانس سمت و زمان برد، فشرده‌سازی را در جهت سمت انجام می‌دهد [۱].

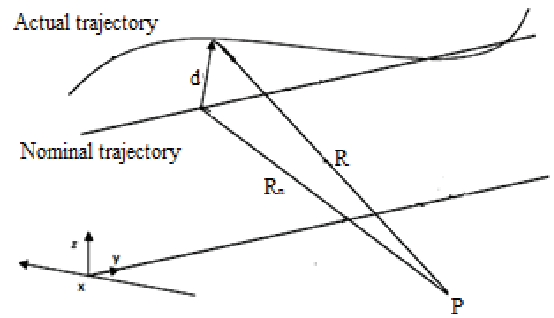
می‌دانیم که معادلهٔ سیگنال دریافتی برای یک هدف نقطه‌ای به‌صورت زیر است [۱]:

$$S(t,\eta)=p(t- \frac{2R(\eta)}{c})w\ \sqrt{b^2-4ac} \times(\eta-\eta_0)exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}R(\eta)) \qquad (۱)$$

در این رابطه، $p(t)$ سیگنال ارسالی است که در دریافت به اندازهٔ $\frac{2R}{c}$ 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 جملهٔ نمایی، فاصلهٔ رادار را از هدف نشان می‌دهد. بنابراین در صورتی‌که فاصلهٔ رادار از هدف تغییر کند، سیگنال دریافتی دچار خطا می‌شود.

[1] Differential Motion Compensation
[2] Phase Gradient Autofocus
[3] Map Drift
[4] Power Spectra Density

در شکل ۱ که هندسهٔ 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 اندازهٔ بردار d، از مسیر خود منحرف شده باشد که در نتیجهٔ آن فاصلهٔ 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.



شکل۱. هندسه SAR با وجود خطا برای هدف نقطه‌ای [۲۱]

از آنجایی‌که می‌خواهیم از یک سطح تصویربرداری کنیم، پس در صورت داشتن خطای حرکت، فاصلهٔ 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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید [۷]:

$$\Delta R(t,\eta)= R(t,\eta)- R_n(t) \qquad (۲)$$

در صورتی‌که پهنای بیم کم باشد، R و R_n در هر لحظه سمت (η ثابت)، به‌صورت زیر می‌باشند [۲۱]:

$$R(t,\eta)=\sqrt{(z+d(\eta))^2+(x(t))^2} \qquad (۳)$$

$$R_n(t)=\sqrt{(z)^2+(x(t))^2} \qquad (۴)$$

در این روابط z بیانگر ارتفاع رادار و $x(t)$ مکان هدف در ناحیه پوشش[1] را مشخص می‌کند. برای جبران‌سازی از روش دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این روش مقدار ΔR را به دو جمله تجزیه می‌کنیم، به‌گونه‌ای که جملهٔ اول مربوط به مقدار خطا در برد میانی و جملهٔ دوم متناظر با خطای سایر نقاط باشد[۷]:

$$\Delta R(t,\eta) = \Delta R_c(\eta)+\Delta R_v(t,\eta) \qquad (۵)$$

جملهٔ اول که بخش عمدهٔ 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، جبران‌سازی عمده گفته می‌شود. برای محاسبهٔ مقدار این خطا خواهیم داشت [۲۱]:

$$\Delta R_c(\eta)= \sqrt{(z+d(\eta))^2+x^2(t_0)}-\sqrt{z^2+x^2(t_0)} = \sqrt{z^2+x^2(t_0)}\left(\sqrt{1+\frac{2zd(\eta)+d(\eta)}{z^2+x^2(t_0)}}-1\right) \qquad (۶)$$

که در آن، t_0 زمان متناظر با برد میانی می‌باشد. در رابطهٔ بالا $\sqrt{z^2+x^2(t_0)}$ برابر با برد میانی R_0 می‌باشد. بنابراین رابطهٔ بالا به‌صورت زیر قابل بیان است [۲۱]:

$$\Delta R_c(\eta) = R_0\left(\sqrt{1+\frac{2zd(\eta)+d(\eta)}{R_0^2}}-1\right) \qquad (۷)$$

مرحلهٔ جبران‌سازی عمده، با ضرب رابطهٔ زیر در سیگنال دریافتی انجام می‌شود [۷]:

$$\exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_c(\eta)\right) \qquad (۸)$$

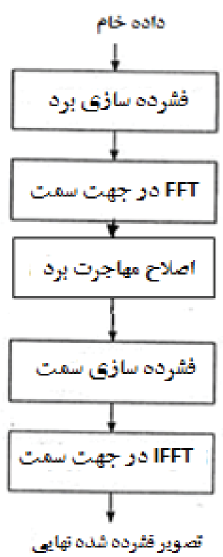
جملهٔ دوم که وابسته به زمان‌های برد و سمت می‌باشد و در مقایسه با جملهٔ اول مقدار کمی دارد، خطای تفاضلی نامیده می‌شود و بعد از اصلاح مهاجرت برد حذف می‌گردد. به این مرحله، جبران‌سازی خطای باقیمانده گفته می‌شود. این خطا از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید [۷]:

$$\Delta R_v(t,\eta)=\Delta R(t,\eta)-\Delta R_c(\eta) \qquad (۹)$$

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

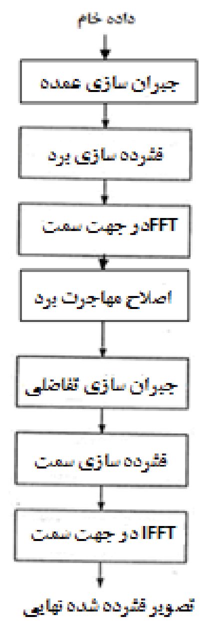
$$\exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_v(t,\eta)\right) \qquad (۱۰)$$

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



شکل ۲. الگوریتم RDA بدون جبران‌سازی خطا [۲۱]

[1] Swath



شکل ۳. الگوریتم RDA همراه با جبران‌سازی خطا [۲۱]

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

روشن است که درصورتی‌که پهنای بیم کم باشد، به ازای یک زمان سمت خاص (η ثابت)، برد هدف، تابعی از زمان برد می‌باشد، بنابراین براساس رابطهٔ (۴) برد هدف به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$R_n(t)=\frac{ct}{2}=\sqrt{z^2+x(t)^2} \qquad (۱۱)$$

حال با روشی مشابهِ روش به‌کارگرفته شده در رابطهٔ (۶) و استفاده از رابطهٔ (۱۱) داریم [۲۱]:

$$\Delta R(t,\eta)=\sqrt{z^2+x(t)^2}\left(\sqrt{1+\frac{2zd(\eta)+d(\eta)}{z^2+x(t)^2}}-1\right)=(ct/2)\times\left(\sqrt{1+\frac{2zd(\eta)+(d(\eta))^2}{(ct/2)^2}}-1\right) \qquad (۱۲)$$

چنانکه مشاهده می‌شود $\Delta R(t,\eta)$ و به تبع آن $\Delta R_v(t,\eta)$ تابعی از t نیز می‌باشند. حال اگر پس از جبران‌سازی عمده و حذف ΔR_c، فشرده‌سازی برد را به‌طور عادی (مانند روش جبران‌سازی دو مرحله‌ای استاندارد) انجام دهیم، در خروجی فشرده‌ساز برد، خطای باقیمانده تغییر کرده است؛ چرا که این خطا تابعی از زمان برد بوده و فشرده‌ساز برد نیز روی زمان برد عمل می‌کند.

این نکته در روش جبران‌سازی دو مرحله‌ای استاندارد در نظر گرفته نشده است. ایدهٔ جدید این مقاله (روش پیشنهادی اول)، لحاظ نمودن این تغییر خطای باقیمانده در خروجی فشرده‌ساز برد می‌باشد.

برای مدل‌سازی خطای باقیمانده در خروجی فشرده‌ساز برد، می‌توان از رابطهٔ (۱۲) استفاده نموده و تأثیر فشرده‌ساز برد بر آن را بررسی نمود که البته این کار بسیار دشواری خواهد بود. لذا برای ساده‌سازی دنبال نمودن اثر بلوک فشرده‌ساز برد، از تقریب‌های زیر استفاده می‌کنیم. در مرحلهٔ اول با استفاده از بسط مک‌لورن تابع رادیکالی به‌کار رفته در ΔR نسبت به متغیر t داریم [۲۱]:

$$\begin{aligned}\Delta R(t,\eta)&\approx(ct/2)\times\Big\{1+\Big[\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}-1)(\frac{1}{2}-2)\ldots(\frac{1}{2}-n+1)}{n!}\times\Big(\frac{2zd(\eta)+d^2(\eta)}{(ct/2)^2}\Big)^n\Big]-1\Big\}\\&=\Big[\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\frac{1}{2}(\frac{1}{2}-1)(\frac{1}{2}-2)\ldots(\frac{1}{2}-n+1)}{n!}\times\frac{[2zd(\eta)+d^2(\eta)]^n}{(ct/2)^{2n-1}}\Big]\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

با صرف‌نظر کردن از جملات سوم به بعد خواهیم داشت:

$$\Delta R(t,\eta)\approx 0.5\times\frac{2zd(\eta)+(d(\eta))^2}{(ct/2)}-0.125\frac{[2zd(\eta)+(d(\eta))^2]^2}{(ct/2)^3} \qquad (۱۴)$$

با بسط تیلور این تابع نسبت به t حول نقطهٔ t_0 و صرف‌نظر از جملات سوم به بعد، داریم:

$$\Delta R(t,\eta)\approx\{0.5\times[2zd(\eta)+d^2(\eta)]\times\frac{2}{c}\times\frac{1}{t_0}\}-\{0.5\times[2zd(\eta)+d^2(\eta)]\times\frac{2}{c}\times[\frac{1}{t_0^2}]\}(t-t_0) \qquad (۱۵)$$

بنابراین در واقع می‌توان خطای مورد نظر را به‌صورت یک تابع خطی از t در نظرگرفت. در نهایت مدل خطا در ورودی الگوریتم به‌صورت زیر خواهد بود [۲۱]:

$$\Delta R(t,\eta)\approx\Delta R_c(\eta)+a(\eta)\times(t-t_0) \qquad (۱۶)$$

در این رابطه، جملهٔ دوم همان خطایی است که در مرحلهٔ جبران‌سازی تفاضلی حذف می‌شود. a و ΔR_c در رابطهٔ (۱۶) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$a(\eta)=-0.5\times[2\mathrm{zd}(\eta)+\mathrm{d}^2(\eta)]\times\frac{2}{c}\times[\frac{1}{t_0^2}] \qquad (۱۷)$$

$$\begin{aligned}&\Delta\mathrm{R_c}(\eta)=\\&0.5\times[2\mathrm{zd}(\eta)+\mathrm{d}^2(\eta)]\times\frac{2}{c}\times\frac{1}{t_0}\\&-0.125\times[2\mathrm{zd}(\eta)+\mathrm{d}^2(\eta)]^2\times(\frac{2}{c})^3\times(\frac{1}{t_0})^3\end{aligned} \qquad (۱۸)$$

در واقع در روش پیشنهادی می‌خواهیم خطا را به‌صورت رابطهٔ (۱۶) در نظر بگیریم تا بتوانیم روابط فشرده‌سازی برد را با در نظرگرفتن خطا دنبال کنیم. پس در صورتی‌که این رابطه را به‌عنوان خطا در معادلهٔ سیگنال دریافتی قرار دهیم، خواهیم داشت [۲۱]:

$$\begin{aligned}&\mathrm{S(t,\eta)=p[t-\frac{2}{c}(R(\eta)+\Delta R(t,\eta))]}\\&\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\mathrm{exp(-j(4\pi/\lambda)(R(\eta)+\Delta R(t,\eta))})\\&=\mathrm{p[t-\frac{2}{c}}(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)+a(\eta)\times(t-t_0))]\\&\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\\&\times\exp[-\mathrm{j}(4\pi/\lambda)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)\\&+a(\eta)\times(t-t_0))]\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

با اعمال مرحلهٔ جبران‌سازی عمده و حذف خطای $\Delta\mathrm{R}_c$ در فاز سیگنال دریافتی و سپس تبدیل فوریه گرفتن از سیگنال دریافتی، جهت فشرده‌سازی برد، خواهیم داشت [۲۱]:

$$\begin{aligned}&S(f,\eta)\approx\\&\frac{1}{\left|1-\frac{2a(\eta)}{c}\right|}P(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1-\frac{2a(\eta)}{c}})\,\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\\&\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[f_0(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)\\&+(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1-\frac{2a(\eta)}{c}})(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)\}\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

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

$$\begin{aligned}&F(f,\eta)\approx S(f,\eta)P^*(f)=\\&\frac{1}{\left|1-\frac{2a(\eta)}{c}\right|}P^*(f)P(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1-\frac{2a(\eta)}{c}})\,\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\\&\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[f_0(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)\\&+(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1-\frac{2a(\eta)}{c}})(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)\}\end{aligned} \qquad (۲۱)$$

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

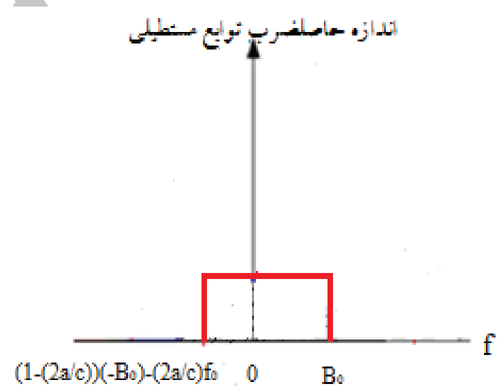
$$\begin{aligned}&F(f,\eta)\approx\frac{1}{\left|1-\frac{2a(\eta)}{c}\right|}rect(\frac{f}{K_r\tau})\\&\times rect(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{(1-\frac{2a(\eta)}{c})(K_r\tau)})\\&\times\exp(j\pi\frac{f^2}{K_r})\exp(-j\pi\frac{(f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0)^2}{(1-\frac{2a(\eta)}{c})^2K_r})\\&\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[f_0(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)\\&+(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{1-\frac{2a(\eta)}{c}})(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}\end{aligned} \qquad (۲۲)$$

از آنجایی‌که جملات نمایی موجود در سطر دوم رابطهٔ (۲۲) در مقایسه با خطای باقیمانده، مقدار کوچکی دارند، می‌توان از مقدار آنها صرف‌نظر کرد.

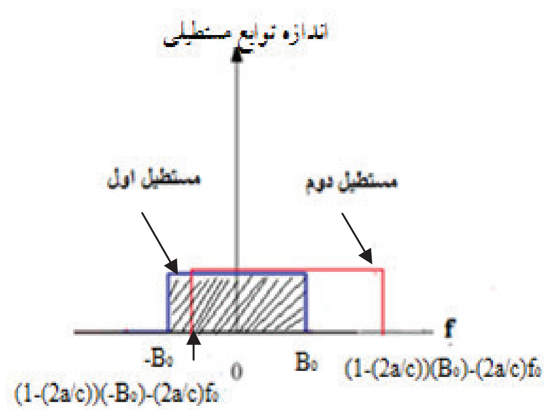
از مقدار $1-\frac{2a(\eta)}{c}$ نیز به‌دلیل کوچک بودن، در تمامی قسمت‌ها به‌جز در مخرج تابع مستطیلی دوم، صرف‌نظر می‌کنیم. بنابراین خواهیم داشت [۲۱]:

$$F(f,\eta)\approx rect(\frac{f}{K_r\tau})rect(\frac{f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0}{(1-\frac{2a(\eta)}{c})(K_r\tau)})$$
$$\times w(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[f_0(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)$$
$$+(f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}$$
(۲۳)

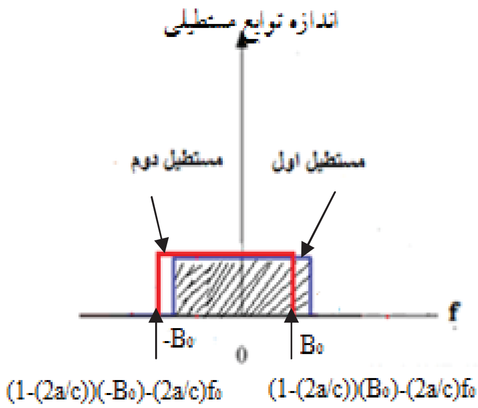
از آنجایی‌که تابع مستطیلی دوم، دارای پهنای متفاوت نسبت به تابع مستطیلی اول است و کمی هم نسبت به مبدأ جابه‌جا شده است، بنابراین حاصل‌ضرب این دو تابع، یک تابع مستطیلی با پهنای متفاوت خواهد بود که مقدار آن، وابسته به علامت a می‌باشد. این دو تابع مستطیلی همراه با حاصل‌ضرب آنها برای $a<0$ در شکل‌های ۴ و ۵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



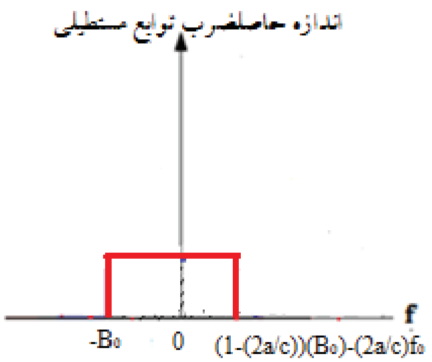
شکل۴. دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a<0$



شکل۵. حاصل‌ضرب دو تابع مستطیلی درحالت وجود خطا برای $a<0$



شکل۶. دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a>0$



شکل۷. حاصل‌ضرب دو تابع مستطیلی در حالت وجود خطا برای $a>0$

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

$$B_{01}=2\times[B_0+\frac{a}{c}(f_0-B_0)]$$
(۲۴)

$$D_1=\frac{a}{c}(f_0-B_0)$$
(۲۵)

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

$$B_{02}=2\times[B_0-\frac{a}{c}(f_0+B_0)]$$
(۲۶)

$$D_2=\frac{a}{c}(f_0-B_0)$$
(۲۷)

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

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

$$F(f,\eta)\approx rect\left(\frac{f+\frac{a(\eta)}{c}(f_0-B_0)}{A}\right)\times \mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o]\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[(f+\frac{2a(\eta)}{c}f_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\} \quad (۲۸)$$

سرانجام با اخذ IFFT از رابطهٔ (۲۸)، سیگنال فشرده شده در جهت برد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$F(t,\eta)\approx \frac{A}{K_r\tau}\mathrm{R}_x\{\frac{A}{K_r\tau}[t-\frac{2}{c}(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}(f_0-B_0)(\frac{a(\eta)t}{2})\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[\frac{a(\eta)}{c}(f_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[\frac{a(\eta)}{c}(B_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\} \quad (۲۹)$$

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

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

$$\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[\frac{a(\eta)}{c}(f_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}=\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[a(\eta)(\frac{t}{2}+\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\} \quad (۳۰)$$

$$\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[\frac{a(\eta)}{c}(B_0)(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}=\exp\{-j\frac{4\pi}{c}[a(\eta)(B_0)(\frac{t}{2}+\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\} \quad (۳۱)$$

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

$$F(t,\eta)\approx \frac{A}{K_r\tau}\mathrm{R}_x\{\frac{A}{K_r\tau}[t-\frac{2}{c}(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}(\mathrm{R}(\eta)-a(\eta)t_o)\} \quad (۳۲)$$

$$\times\exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}a(\eta)t)\times\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[a(\eta)(\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}B_0[a(\eta)\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\}$$

با ضرب جملات نمایی اول و دوم رابطهٔ (۳۲)، رابطهٔ (۳۳) به‌دست می‌آید. در رابطهٔ (۳۳) مشاهده می‌کنیم که جملهٔ نمایی دوم، همان جمله‌ای است که در روش جبران‌سازی مرسوم با در نظرگرفتن خطا به‌صورت خطی، در مرحلهٔ دوم حذف می‌شود و جملات نمایی سوم و چهارم، جملاتی هستند که به‌دلیل فشرده‌سازی برد همراه با در نظرگرفتن خطا به‌وجود آمده‌اند و باید همراه با جملهٔ نمایی دوم حذف شوند [۲۱].

$$F(t,\eta)\approx \frac{A}{K_r\tau}\mathrm{R}_x\{\frac{A}{K_r\tau}[t-\frac{2}{c}(\mathrm{R}(\eta)+\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o)]\}\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}\mathrm{R}(\eta)\}\times\exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}a(\eta)(t-t_o)]\times\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[a(\eta)(\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\}\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}B_0[a(\eta)\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\} \quad (۳۳)$$

از آنجایی‌که معمولاً B_0 از f_0 بسیار کوچک‌تر می‌باشد، می‌توان از جملهٔ نمایی آخر در رابطهٔ (۳۳) صرف‌نظر کرده و از رابطهٔ زیر در مرحلهٔ جبران‌سازی تفاضلی استفاده نمود [۲۱]:

$$\exp[j\frac{4\pi}{\lambda}a(\eta)(t-t_o+t_1)] \tag{۳۴}$$

$$t_1=\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c} \tag{۳۵}$$

این درحالی است که در روش‌های معمول، تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای باقیمانده، در نظرگرفته نمی‌شود. در نتیجه در این روش‌ها خطای باقیمانده در خروجی بلوک فشرده‌ساز و اصلاح مهاجرت برد، همان خطای باقیمانده در ورودی این بلوک‌ها در نظرگرفته می‌شود که امری نادرست است. بنابراین همان‌طور که مشاهده کردیم، بلوک دیاگرام روش پیشنهادی اول، مانند روش جبران‌سازی مرسوم است و تنها در مقدار فاز اضافه شونده در مرحلهٔ دوم جبران‌سازی، با روش جبران‌سازی مرسوم تفاوت دارد. با استفاده از اصل ایستانی فاز (PSP[1]) می‌توان با انتقال داده‌ها به حوزهٔ فرکانس داپلر، به اصلاح مهاجرت برد پرداخت. هنگامی‌که خطای حرکت وجود نداشته باشد، پس از اعمال قاعدهٔ PSP، پوش فرکانس سمت مستقل از η_0 و بنابراین نحوهٔ اصلاح مهاجرت برد برای تمامی فرکانس‌های داپلر یکسان خواهد شد، اما در صورت وجود خطای حرکت، حتی با اعمال جبران‌سازی، به‌دلیل وجود آرگومان اضافه $\frac{2}{c}[\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o]$ در رابطهٔ (۳۳) در R_x، پس از اعمال قاعدهٔ 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 مرحلهٔ میانی جبران‌سازی در رابطهٔ (۲۸) استفاده می‌شود:

$$\exp\{j\frac{4\pi}{c}f\,[\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o]\} \tag{۳۶}$$

با انجام این مرحلهٔ جبران‌سازی، رابطهٔ (۳۳) به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{aligned}F(t,\eta)\approx{}&\frac{A}{K_r\tau}\mathrm{R}_x\{\frac{A}{K_r\tau}[t-\frac{2}{c}\mathrm{R}(\eta)]\}\\&\times\mathrm{w}(\eta-\eta_0)\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}\mathrm{R}(\eta)\}\\&\times\exp[-j\frac{4\pi}{\lambda}a(\eta)(t-t_o)]\\&\times\exp\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[a(\eta)(\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\}\\&\times\exp\{-j\frac{4\pi}{c}B_0[a(\eta)\frac{\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o}{c})]\}\end{aligned} \tag{۳۷}$$

اکنون می‌توان با استفاده از PSP، داده‌ها را به حوزهٔ داپلر برده و RCMC را مانند حالت ایده‌آل انجام داد. در واقع روش پیشنهادی دوم، مکمل روش پیشنهادی اول می‌باشد. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی دوم در شکل ۸ آمده است. لازم به‌ذکر است که برای حذف آرگومان $\frac{2}{c}[\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o]$ می‌توان مرحلهٔ جبران‌سازی عمده را بلافاصله پس از تبدیل فوریه گرفتن از سیگنال ورودی با رابطهٔ زیر انجام داد [۲۲]:

$$\begin{aligned}&\exp\{j\frac{4\pi}{c}[f_0(1+\frac{2a(\eta)}{c})+f\,]\\&\times[\Delta\mathrm{R}_c(\eta)-a(\eta)t_o]\}\end{aligned} \tag{۳۸}$$

اما عیب این روش آن است که باید فاز بالا در کلیهٔ داده‌ها ضرب شود؛ در حالی‌که 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 ۰/۰۰۱ هرتز باشد[۲۱]. از آنجایی‌که هدف اصلی در این مقاله بررسی کارایی روش‌های پیشنهادی بر حسب مقادیر مختلف خطا می‌باشد، لذا در تمامی شبیه‌سازی‌ها فرکانس خطا ۰/۰۰۱ هرتز در نظرگرفته شده و فقط دامنهٔ خطا تغییر می‌کند. جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی را در حالت ایده‌آل (ستون اول)، در حالتی‌که خطایی سینوسی با دامنهٔ 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 آنجایی‌که دو سینک در دو بعد برد و سمت، مختصات هدف را نشان می‌دهند، برای بررسی کیفیت تصویر، اندازهٔ 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

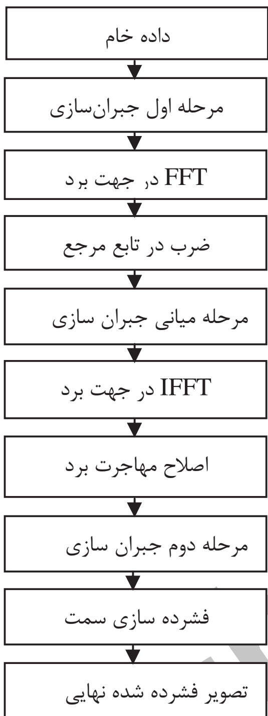
[1] Principle of Stationary Phase

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

اصلی پاسخ ضربه می‌باشد. همان‌طورکه می‌بینیم با وجود خطا، مقادیر PSLR و ISLR برای سمت خیلی بیشتر از برد تغییر می‌کنند و این نشان می‌دهد که تأثیر خطا روی سمت بیشتر از برد است.
با اعمال جبران‌سازی دو مرحله‌ای، نتایج بهتر شده است، اما با استفاده از روش‌های پیشنهادی نتایج به حالت ایده‌آل نزدیک می‌شوند.
از طرفی با مشاهدهٔ نتایج مربوط به IRW می‌بینیم که با وجود اینکه با روش‌های جبران‌سازی پیشنهادی، مقادیر IRW به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شوند، اما همواره مقادیر IRW از حالت ایده‌آل بیشتر هستند. به‌عبارت دیگر جبران‌سازی باعث افزایش IRW (افزایش پهنای تصویر فشرده شده در جهت‌های برد و سمت) می‌شود.
تصویر فشرده شدهٔ نهایی برای خطای ۱۰ متر و ۲۰۰ متر، در حالی‌که جبران‌سازی اعمال نشده باشد، در شکل ۹ آمده است [۲۱]. همان‌طورکه مشاهده می‌کنیم بدون جبران‌سازی نمی‌توان هدف نهایی را تشخیص داد. همچنین تصویر فشرده شدهٔ نهایی در حالت ایده‌آل در شکل ۱۰، در حالت استفاده از روش جبران‌سازی مرسوم در شکل ۱۱، در حالت استفاده از روش جبران‌سازی پیشنهادی اول در شکل ۱۲، و در حالت استفاده از روش جبران‌سازی پیشنهادی دوم، در شکل ۱۳ آمده است.
نمودارهای سینک مربوط به جهت سمت در هر پنج حالت در شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ آمده است. سرانجام نیز کارایی روش‌های جبران‌سازی (PSLR و ISLR) در مقابل مقدار خطا (از ۸۰ تا ۱۰۰۰متر) در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مقایسه شده‌اند که حاکی از برتری قابل توجه روش‌های پیشنهادی و به‌ویژه روش دوم است.
در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، منحنی آبی عملکرد روش مرسوم جبران‌سازی، منحنی سبز، عملکرد روش پیشنهادی اول و منحنی قرمز، عملکرد روش پیشنهادی دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی

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



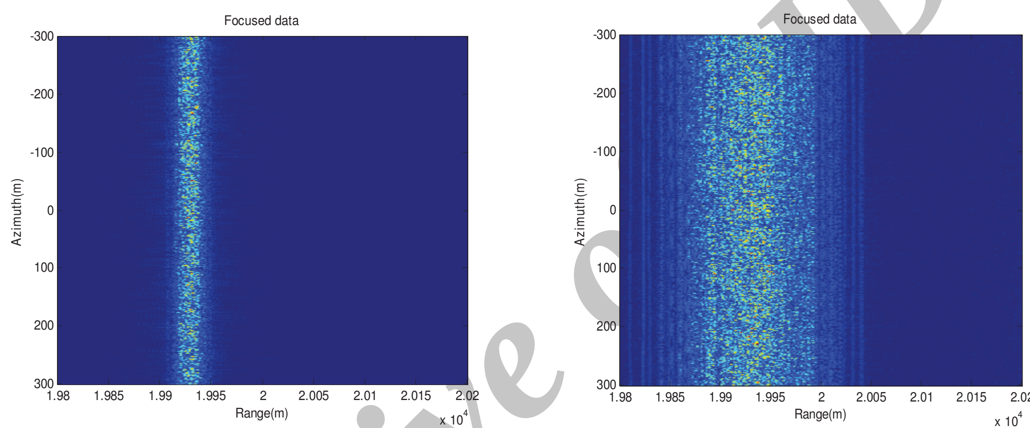
شکل ۸. الگوریتم RDA همراه با روش جبران سازی پیشنهادی دوم

جدول ۲. نتایج جبران‌سازی 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

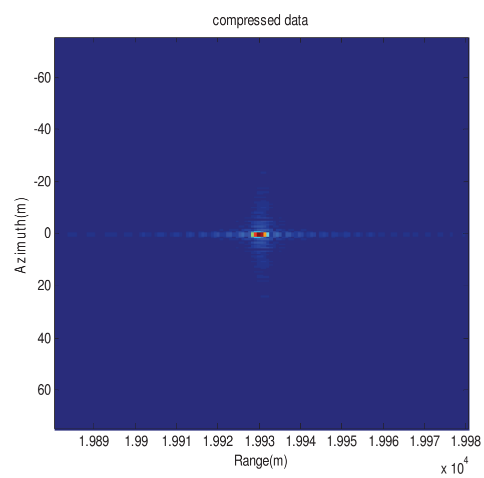
جدول ۳. نتایج جبران‌سازی در حالت وجود خطای ۲۰۰ متر

	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

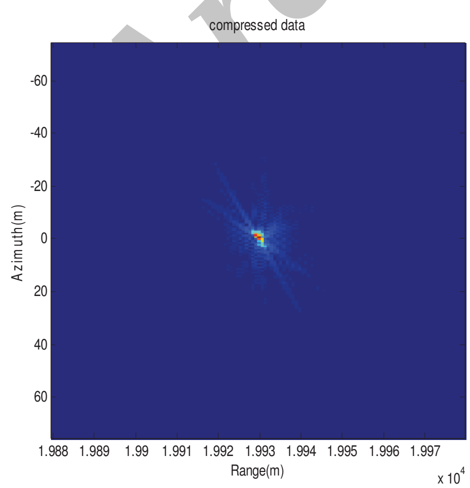


(ب) (الف)

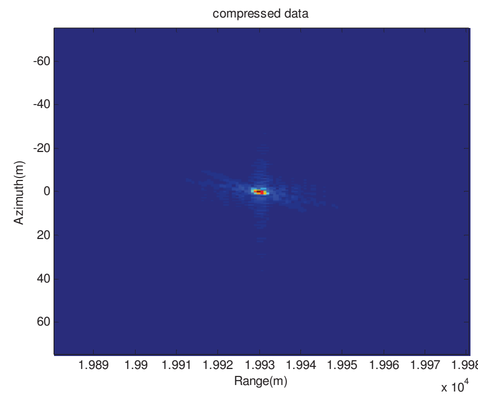
شکل۹. تصویر نهایی بدون جبران‌سازی برای خطای با دامنهٔ (الف) ۱۰ متر (ب) دامنهٔ ۲۰۰ متر



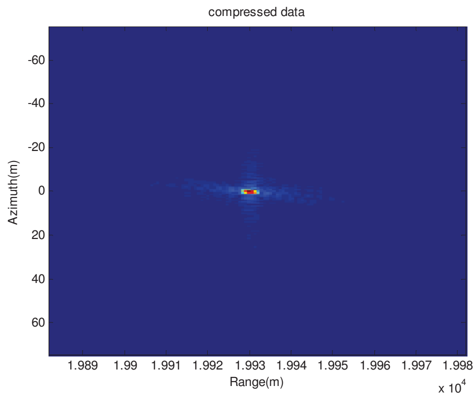
شکل۱۰. تصویر فشرده شده در حالت ایده‌آل



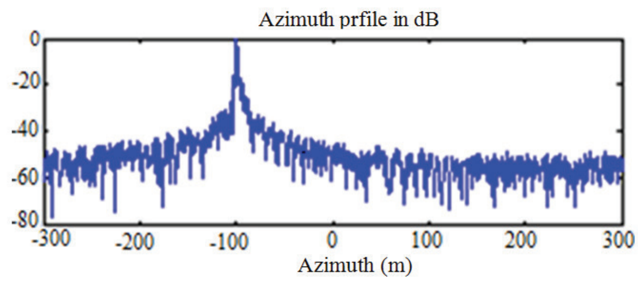
شکل۱۱. تصویر فشرده شده با جبران‌سازی مرسوم



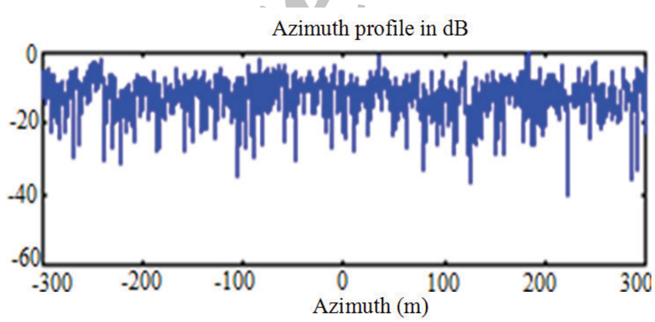
شکل۱۲. تصویر فشرده شده با جبران‌سازی به روش اول پیشنهادی



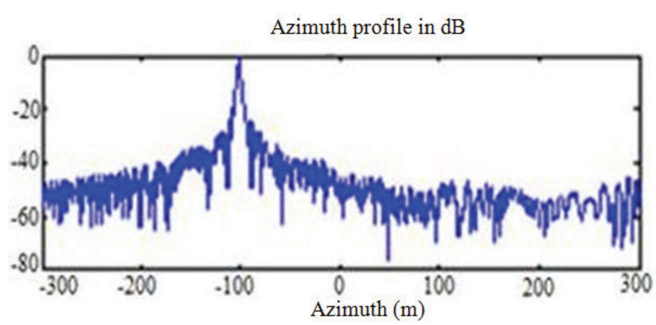
شکل۱۳. تصویر فشرده شده با جبران‌سازی به روش دوم پیشنهادی



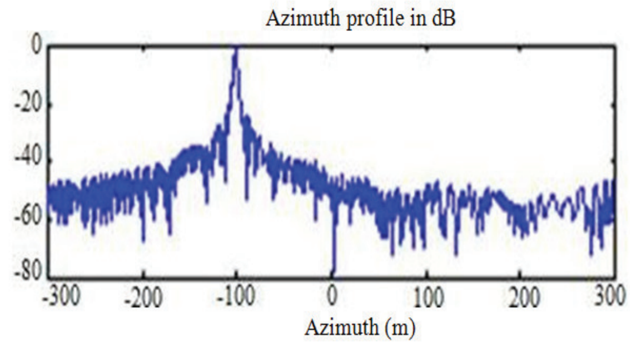
شکل ۱۴. نمودار سمت در حالت ایده‌آل



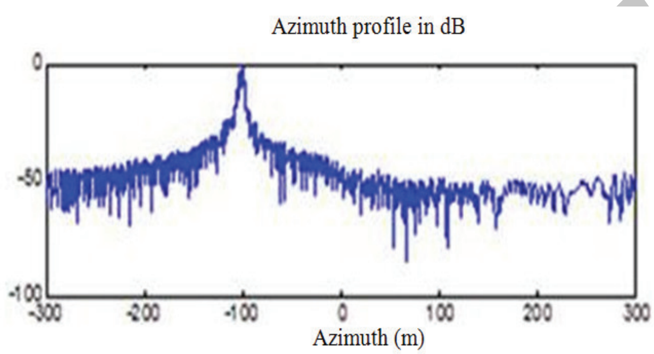
شکل ۱۵. نمودار سمت در حالت وجود خطا و بدون جبران‌سازی



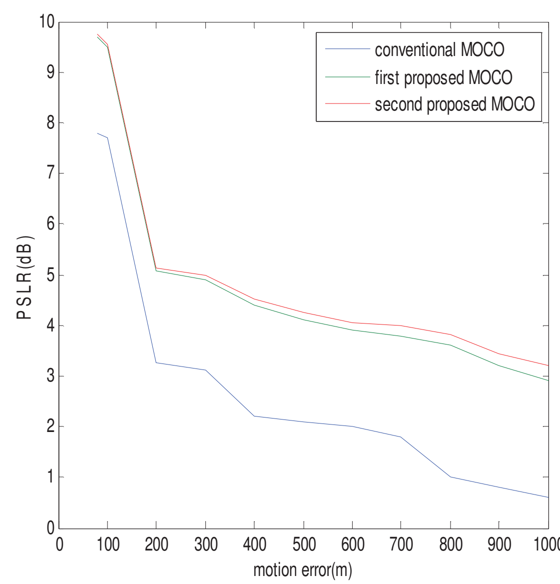
شکل ۱۶. نمودار سمت در حالت وجود خطا و جبران‌سازی مرسوم



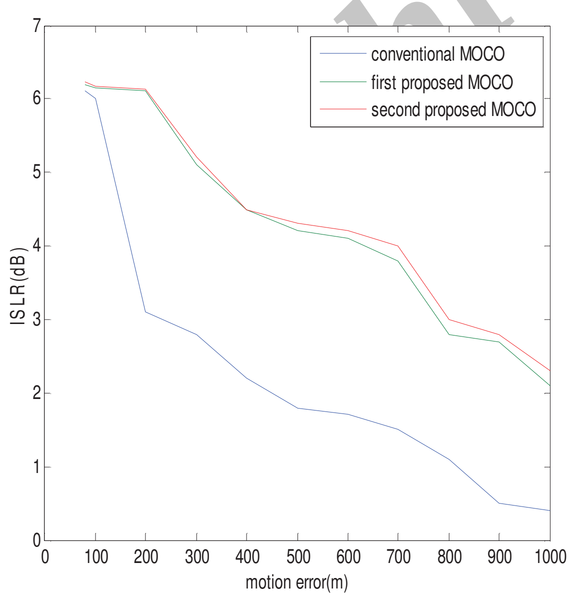
شکل ۱۷. نمودار سمت در حالت وجود خطا و روش اول پیشنهادی



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



شکل ۱۹. مقایسه عملکرد PSLR در روش‌های جبران‌ساز



شکل ۲۰. مقایسه عملکرد ISLR در روش‌های جبران‌سازی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم که در روند جبران‌سازی حرکت، هرگاه تأثیر فشرده‌سازی برد روی خطای تفاضلی در نظرگرفته شود، مقدار فازی که باید در مرحلهٔ 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 مرحلهٔ 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 PSLR و ISLR در حدود دو دسیبل، بهتر می‌شوند.

۶. مراجع

[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.

[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] حاجی پور، م.، مدرس هاشمی، م. (۱۳۹۲) روشی جدید برای بهبود جبران‌سازی حرکت در رادارهای روزنهٔ مصنوعی، مجموعه مقالات بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق، دانشگاه فردوسی، مشهد.

[۲۱] حاجی پور، م. (۱۳۹۱) بررسی جبران‌سازی حرکت در تصاویر رادارهای روزنهٔ مصنوعی، پایان‌نامهٔ 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.