

الگوریتم جابجایی صحنه با تکرار بهینه بر مبنای تمایز

مهین غفاری، سید روح الله ثمره هاشمی، سید علیرضا سیدین

گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

حرکت دقیقی حداقل در SARهای هوایی ممکن نیست. انحراف هواپیما از مسیر و سرعت از پیش تعیین شده باعث تار شدن تصویر نهایی خواهد شد. در نتیجه برای بازگرداندن وضوح (تمرکز)^۴ لازم به تصویر و تعیین موقعیت هواپیما هنگام ارسال پالس‌ها، سیستم ناوبری بسیار دقیقی مورد نیاز است. خطای قابل تحمل در تعیین انحراف سکو از مرتبه چند صدم طول موج است [۲]، بنابراین در سیستم‌های ناوبری معمول، دسترسی به این دقت به ویژه در هواپیماهای سبک که در برابر اغتشاشات جوی حساس‌تر هستند و قابلیت حمل تجهیزات ناوبری سبک‌تری را دارند، بسیار مشکل است [۳]. در ضمن خطای فاز می‌تواند در اثر عوامل دیگری مانند غیر آرمانی بودن الگوریتم‌های تشکیل تصویر یا اثرات انتشار و غیره نیز ناشی شود [۲]؛ از این رو باید علاوه بر استفاده از داده دستگاه‌های ناوبری برای جبران خطای فاز ناشی از انحراف هواپیما، از روش‌هایی جهت تخمین و جبران خطای فاز با استفاده از داده دریافتی بهره برد. این روش‌ها را که به تمرکز تصاویر نهایی منجر می‌شوند، روش‌های خودمیزانی^۵ می‌نامند. تا کنون روش‌های خودمیزانی متنوعی برای تخمین و جبران خطای فاز با استفاده از داده دریافتی به کار گرفته شده است که با توجه به نوع SAR، صحنه، خطای فاز، الگوریتم پردازشی مورد نظر، پیچیدگی محاسباتی و دقت لازم به کار می‌روند.

جابجایی صحنه^۶ (MD) یکی از الگوریتم‌های پارامتری مبتنی بر تکرار برای تصحیح خطای فاز فرکانس پایین در تصاویر SAR است. در این

چکیده — در این مقاله روشی برای تعیین بهینه تکرارهای الگوریتم جابجایی صحنه در تصحیح خطای فاز ناشی از حرکت غیر آرمانی سکو در رادار روزنه مصنوعی ارائه شده است. در روش پیشنهادی تعداد تکرارهای الگوریتم حین اجرای الگوریتم بسته به روند اصلاح خطای فاز با استفاده از معیار تمایز در تصویر تعیین می‌گردد. نشان داده شده استفاده از این روش به افزایش دقت و سرعت الگوریتم جابجایی صحنه منجر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی — رادار روزنه مصنوعی، الگوریتم جابجایی صحنه،

خطای فاز، خودمیزانی، تمایز

۱. مقدمه

رادار روزنه مصنوعی^۱ (SAR) سیستمی است که با پردازش هم‌دوس^۲ پالس‌های دریافتی از یک هدف در طول حرکت، یک روزنه مصنوعی طولانی را شبیه‌سازی کرده و تصویری با حد تفکیک مناسب، مستقل از وجود نور و در شرایط آب و هوایی مختلف ارائه می‌کند [۱]. برای تشکیل تصویر با وضوح مناسب در این رادار، باید مکان دقیق سکو هنگام ارسال پالس‌ها جهت پردازش هم‌دوس مشخص باشد، بنابراین لازم است سکوی حامل رادار در مسیر مستقیم از پیش تعیین شده و با سرعت ثابت حرکت کند. با توجه به وجود اغتشاشات جوی و سیستم کنترل غیر ایده‌آل هواپیما، چنین

³ Blured

⁴ Focus

⁵ Autofocus

⁶ Map Drift

¹ Synthetic Aperture Radar

² Coherent

نورافکنی^{۱۳} ارائه شده است؛ بدین صورت که بر اساس میزان خطای فاز و نویز تصویر و نیز نوع صحنه مورد نظر تعداد تکرار الگوریتم MD به صورت خودکار تعیین می‌گردد و پس از رسیدن تصویر به کیفیت لازم الگوریتم متوقف می‌شود. با توجه به اینکه با کاهش خطای فاز، تمایز تصویر بهبود می‌یابد، بنابراین الگوریتم تا زمانی که تمایز تصویر در آخرین تکرار به اندازه یک آستانه مشخص بالاتر از تمایز تصویر در تکرار قبل باشد، ادامه می‌یابد. در نتیجه تعداد تکرار در این الگوریتم از پیش تعیین نمی‌شود و برای هر تصویر تعداد تکرار بهینه به صورت خودکار در طی مراحل انجام الگوریتم تعیین خواهد شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده کارایی این روش در کاهش زمان اجرای الگوریتم در مقایسه با الگوریتم مشهور گرادیان فاز^{۱۴} (PGA) را نشان می‌دهد.

۲. الگوریتم جابجایی صحنه

این روش در اواسط سال ۱۹۷۰ جهت جبران خطای فاز مربعی^{۱۵} (QPE) در رادار SAR نورافکنی ارائه شده است [۲]. همانطور که گفته شد، روش MD بر پردازش زیردهانه استوار است و جهت تصحیح خطای فاز مرتبه ۲، کل سیگنال دریافتی را به دو سیگنال در دو زیردهانه تقسیم می‌کند. با مقایسه تصویر حاصل از دو زیردهانه می‌توان پارامتر خطای مرتبه ۲ را استخراج نمود. در این الگوریتم فرض بر این است که تشکیل تصویر با الگوریتم شکل قطبی^{۱۶} (PFA) صورت می‌گیرد، لذا داده فشرده شده در برد جهت تخمین پارامتر خطای فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲.۱. مبانی ریاضی تصحیح خطای فاز مرتبه ۲ و ۳

در ادامه به بیان برخی روابط ریاضی تشریح کننده این روش خودمیزانی پرداخته می‌شود. سیگنال سمت $f(t)$ ناشی از یک سبد برد را می‌توان با ضرب سیگنال بدون خطای $h(t)$ در نمایی مختلط با فاز درجه ۲ مدل کرد:

$$f(t) = h(t)e^{j\phi t^2}, -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

پارامتر ρ ضریب خطای فاز مرتبه ۲ است که باید جهت تصحیح خطا تخمین زده شود و τ طول زمانی روزنه مصنوعی می‌باشد. سیگنال ناشی از دو زیردهانه به صورت زیر خواهد بود:

الگوریتم برای تخمین ضرایب خطای فاز مرتبه n لازم است تصویر به n زیردهانه^۷ تقسیم شود و با محاسبه‌ی جابجایی متقابل تصاویر زیردهانه‌ها، ضرایب خطای فاز محاسبه گردد. عملاً این الگوریتم توانایی تخمین ضرایب خطای فاز تا مرتبه‌ی ۵ را دارد [۳]. از نقاط قوت این الگوریتم سرعت بالا، محدوده گسترده خطای فاز قابل اصلاح^۸ و عدم نیاز به اهداف برجسته در تصویر می‌باشد. یکی از چالش‌های این روش خودمیزانی، تعداد تکرارهای این الگوریتم می‌باشد. در مورد تصاویر SAR با میزان خطای فاز و نویز بالا، برای اصلاح خطای فاز به تکرار بیشتر الگوریتم نیاز است. اگر در این الگوریتم تعداد تکرار عدد کوچکی انتخاب شود ممکن است خطای فاز به طور کامل حذف نشود و اگر عدد بزرگی انتخاب شود در مورد تصاویر با خطای فاز کم زمان پردازش بیش از حد لازم خواهد بود، بنابراین کاهش تعداد تکرار یا تعیین تعداد آن قبل از شروع پردازش از موضوعات مورد توجه در این الگوریتم می‌باشد که پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. در [۴] از روش جابجایی صحنه بدون تکرار برای افزایش سرعت عملیات خودمیزانی استفاده شده است. این روش برای پردازش‌های زمان-حقیقی^۹ مناسب است اما نسبت به روش‌های دارای تکرار دقت کمتری دارد. در [۵] روش جابجایی صحنه همدوس معرفی شده که در آن در مرحله مقایسه شیفیت بین تصاویر زیردهانه‌ها از تصاویر مختلط استفاده شده که این مسأله به کاهش تعداد تکرار الگوریتم منجر شده است اما محاسبه شیفیت بین تصاویر مختلط به ویژه در حالت نویز بالا با خطای بیشتری همراه خواهد بود. در [۶] روش دیگری به منظور خودمیزانی تصاویر سونار روزنه مصنوعی^{۱۰} (SAS) پیشنهاد شده که از معیار تمایز^{۱۱} جهت انتخاب بهترین سبدهای برد^{۱۲} در فرایند تخمین خطای فاز مرتبه ۲ استفاده می‌کند. نحوه عملکرد این الگوریتم بدین صورت است که قوی‌ترین هدف در هر سبد برد با یک پنجره جدا شده و سپس تمایز هر کدام از سبدهای برد در حوزه‌ی داپلر محاسبه می‌گردد. در مرحله بعد از سبدهای بردی که کمترین تمایز را دارند برای تخمین پارامتر خطا استفاده می‌شود. این روش تنها برای تصحیح خطای فرکانس پایین مرتبه دو در تصاویر SAS و با رویکرد انتخاب بهترین سبدهای برد با معیار تمایز به کار گرفته شده است.

در این مقاله روشی برای تعیین تعداد تکرار الگوریتم جابجایی صحنه در تصحیح خطای فاز فرکانس پایین مرتبه ۲ و ۳ تصویر SAR در حالت

⁷ Sub-Aperture

⁸ Pull-in Range

⁹ Real-Time

¹⁰ Synthetic Aperture Sonar

¹¹ Contrast

¹² Range Bin

¹³ Spotlight

¹⁴ Phase Gradient Autofocus

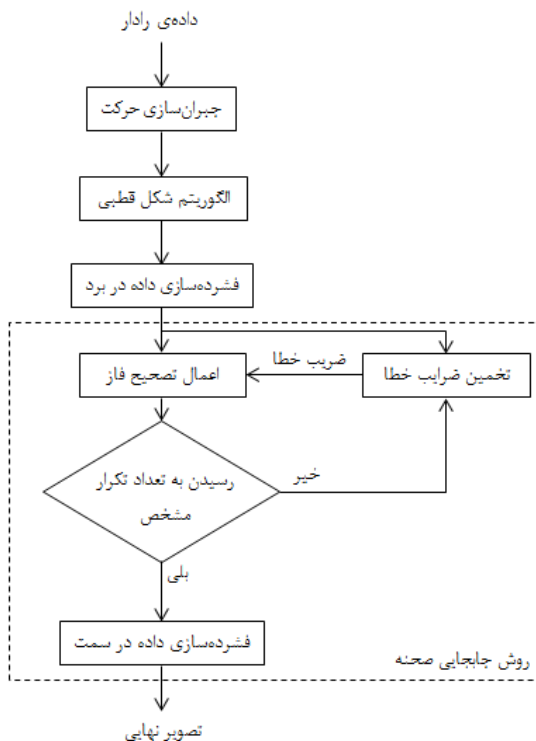
¹⁵ Quadratic Phase Error

¹⁶ Polar Format Algorithm

بلوک جبران سازی حرکت، حذف خطای فاز با استفاده از داده‌های سامانه ناوبری می‌باشد.

۳. تکرار بهینه الگوریتم MD بر مبنای تمایز

در الگوریتم پیشنهادی با تقسیم تصویر به ۳ زیردهانه، خطای فاز مرتبه ۲ و ۳ تخمین زده می‌شود و تعداد تکرار به میزان خطای فاز بستگی دارد. خطای فاز زیاد مستلزم تعداد تکرار زیاد است و خطای فاز کم به تکرارهای کمتری نیاز دارد. در نتیجه در الگوریتم پیشنهادی تعداد تکرار با توجه به شرایط تصویر تعیین می‌شود. این موضوع سبب می‌گردد که برای هر تصویر تعداد تکرار بهینه با توجه به یک معیار کیفیت در تصویر اعمال گردد. در اصلاح خطای فاز، تمایز، یکی از معیارهای وضوح تصویر است و هرچه خطای فاز بالاتر باشد تمایز تصویر کمتر خواهد بود. بنابراین می‌توان از این معیار برای توقف تکرار در الگوریتم جابجایی صحنه استفاده کرد. تمایز به صورت نسبت انحراف استاندارد اندازه پیکسل‌های تصویر به میانگین اندازه آن‌ها تعریف می‌شود. خطای فاز باعث پخش انرژی پیکسل‌ها و در نتیجه کاهش تمایز می‌گردد و با معیار افزایش تمایز می‌توان خطای فاز را تا حد زیادی اصلاح نمود.



شکل ۱: الگوریتم جابجایی صحنه (MD)

$$f_1(t) = f\left(t - \frac{\tau}{4}\right) = h\left(t - \frac{\tau}{4}\right)e^{j\left(\rho t^2 - \frac{\rho\tau}{2} + \frac{\rho\tau^2}{16}\right)} \quad (2)$$

$$-\frac{\tau}{4} \leq t \leq \frac{\tau}{4}$$

$$f_2(t) = f\left(t + \frac{\tau}{4}\right) = h\left(t + \frac{\tau}{4}\right)e^{j\left(\rho t^2 + \frac{\rho\tau}{2} + \frac{\rho\tau^2}{16}\right)} \quad (3)$$

$$-\frac{\tau}{4} \leq t \leq \frac{\tau}{4}$$

میزان نسبی جابجایی تصاویر دو زیردهانه ($\Delta\omega$) که از اندازه تبدیل فوریه دو سیگنال فوق حاصل می‌شود، به ضریب خطای مربعی وابسته است:

$$\Delta\omega = \rho\tau \quad (4)$$

بنابراین پارامتر خطای مرتبه ۲ پس از اندازه‌گیری میزان جابجایی دو تصویر با محاسبه همبستگی متقابل آن دو، به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۲]:

$$\hat{\rho} = \frac{\Delta\omega}{\tau} \quad (5)$$

این ضریب با توجه به علامت $\Delta\omega$ می‌تواند مثبت یا منفی باشد. به صورت مشابه، عملیات فوق را می‌توان برای خطای فاز مرتبه ۳ نیز انجام داد که منجر به پارامتر خطای فاز مرتبه ۲ و ۳ می‌گردد. در این حالت پس از تشکیل تصاویر مربوط به سه زیردهانه، میزان شیفیت نسبی دو به دو آنها در ماتریس Π قرار داده می‌شود:

$$\Pi = [\Pi_{1,2}, \Pi_{1,3}, \Pi_{2,3}]^T \quad (6)$$

پارامترهای خطای مرتبه ۳ به صورت زیر حاصل خواهند شد [۲]:

$$\hat{\rho} = \varepsilon^{-1}\Pi \quad (7)$$

که ماتریس ε به صورت زیر است:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} -\frac{\tau}{3\pi} & -\frac{3\tau^2}{18\pi} \\ \frac{2\tau}{3\pi} & 0 \\ \frac{\tau}{3\pi} & \frac{3\tau^2}{18\pi} \end{bmatrix} \quad (8)$$

و $\hat{\rho}$ یک بردار شامل ضرایب تخمینی خطای فاز مرتبه ۲ و ۳ می‌باشد. شکل ۱ مراحل اجرای الگوریتم MD را نشان می‌دهد. در این شکل منظور از

فرض بر این است که خطای فاز اعمال شده به همه سبدهای برد یکسان است. این خطای فاز که ترکیبی از خطای فاز مرتبه ۲ و ۳ است، در شکل ۳ (ب) رسم شده است. همانطور که مشخص است، دامنه تغییرات خطای فاز بین 20π - و 50π قرار دارد. پس از شبیه‌سازی تصویر مات شده در اثر اعمال خطای فاز، این تصویر به الگوریتم MD با تکرار بهینه و نیز الگوریتم PGA [۷] وارد می‌شود. الگوریتم MD در ۴ تکرار متوقف می‌شود. تصویر مات ورودی و تصویر خروجی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم PGA به ترتیب در شکل ۳ (ج)، شکل ۳ (د) و شکل ۳ (ه) نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو الگوریتم به خوبی توانسته‌اند خطای فاز را حذف نمایند. در شکل ۳ (و) خطای فاز باقی‌مانده در تصویر پس از اعمال دو الگوریتم رسم شده است که میزان دقت دو الگوریتم را در حذف خطای فاز نشان می‌دهد. در شکل ۴ نتایج اجرای الگوریتم به ازای یک خطای فاز دیگر نشان داده شده است. جهت نمایش بهتر، بزرگنمایی بخشی از تصاویر نشان داده شده است. از آنجا که مات شدن تصویر در این شبیه‌سازی نسبت به شبیه‌سازی قبل بسیار شدیدتر است، لذا الگوریتم MD با ۵ تکرار متوقف شده است. در جدول ۲ زمان اجرای دو الگوریتم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی توانسته است با سرعتی بالاتر از الگوریتم PGA خطای فاز را با دقتی قابل مقایسه با آن حذف نماید.

تابع تمایز در یک تصویر SAR با M سبد برد و N پیکسل در هر سبد برد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (9)$$

که T اندازه تمایز تصویر، μ_i و σ_i به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد اندازه پیکسل‌های سبد برد i ام و مقدار پیکسل n ام در سبد برد i ام می‌باشد و داریم:

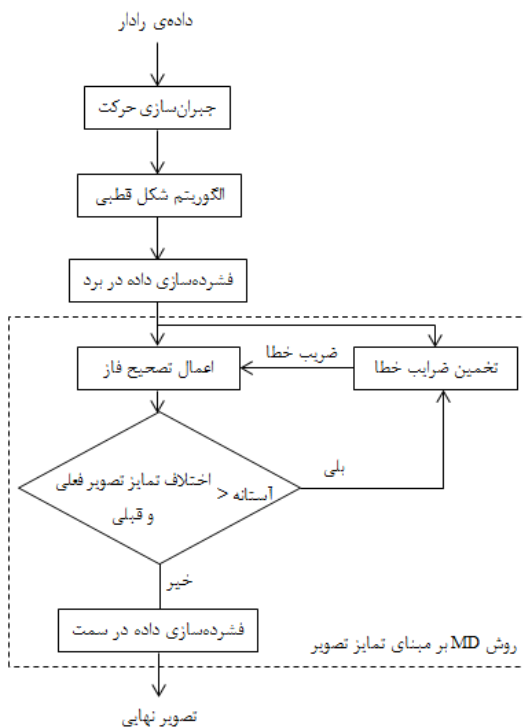
$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |p_i(n)| \quad (10)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (|p_i(n)| - \mu_i)^2} \quad (11)$$

در هر مرحله از اجرای الگوریتم، مقدار تمایز تصویر طبق رابطه (۹) محاسبه شده و در صورتی که تفاضل شاخص تمایز تصویر اصلاح شده در مرحله جاری و شاخص تمایز تصویر مرحله قبل، از یک مقدار آستانه بیشتر باشد، مراحل اجرای الگوریتم ادامه می‌یابد، به عبارت دیگر مراحل اجرای الگوریتم تا زمانی که تمایز بهتر شود ادامه می‌یابد. شکل ۲ نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. بدین صورت تعداد تکرارهای الگوریتم با توجه به معیار تمایز بهینه شده و نیازی به تعیین تعداد تکرار الگوریتم قبل از اجرای آن نمی‌باشد. از طرف دیگر در الگوریتم MD اعمال شده به تصاویر با خطای فاز یا نویز بالا گاه تکرارهای بیش از حد لازم، باعث افزایش خطای فاز می‌شود که با روش پیشنهادی می‌توان قبل از آنکه کیفیت تصویر بر اثر تکرارهای غیر لازم افت کند، الگوریتم را متوقف نمود.

۴. نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی الگوریتم خودمیزانی پیشنهادی، اصلاح خطای فاز در یک تصویر SAR به وسیله الگوریتم پیشنهادی و نیز الگوریتم PGA [۷] از نظر زمان و کیفیت مقایسه شده است. بدین منظو داده خام دریافتی از یک صحنه فرضی در یک سامانه SAR نورافکنی با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ شبیه‌سازی و یک خطای فاز شامل مرتبه ۲ و ۳ به آن اعمال شده است. بازتاب‌پذیری و محل اهداف صحنه با استفاده از یک تصویر مختلط SAR واقعی ارائه شده به وسیله گروه تحقیقاتی Sandia [۸] محاسبه شده است. این تصویر با ابعاد 1600×1600 در شکل ۳ (الف) نشان داده شده است.



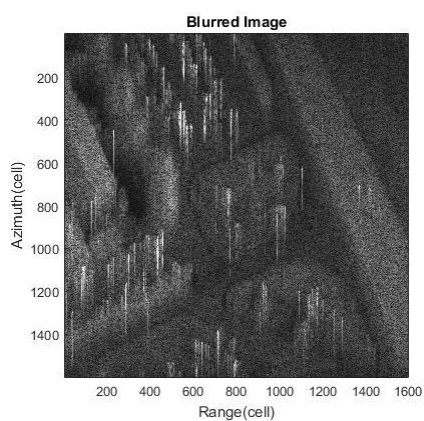
شکل ۲: مراحل اجرای الگوریتم MD با تعداد تکرار بهینه بر مبنای تمایز

جدول ۲: نتایج شبیه سازی

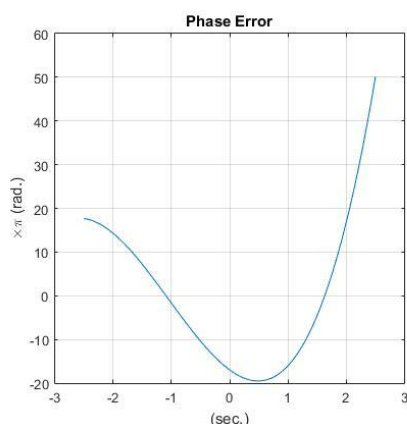
نتایج شبیه سازی			شبیه سازی
زمان اجرای الگوریتم <i>PGA</i>	زمان اجرای الگوریتم <i>MD</i>	تعداد تکرار در الگوریتم <i>MD</i>	
10.3sec.	4.8sec.	۴	شبیه سازی اول (شکل ۳)
10.3sec.	5.9 sec.	۵	شبیه سازی دوم (شکل ۴)

جدول ۱: مشخصات سامانه SAR

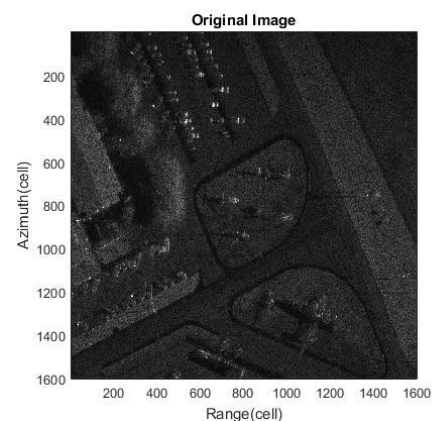
مقدار	پارامتر
3cm	طول موج
1m	حد تفکیک در برد
1m	حد تفکیک در سمت
7.5km	ارتفاع سکو
15km	برد
5sec.	مدت زمان پرواز
45m/s	سرعت سکو
25cm	طول آنتن
50cm	عرض (ارتفاع) آنتن
1600m×1600m	ابعاد ناحیه



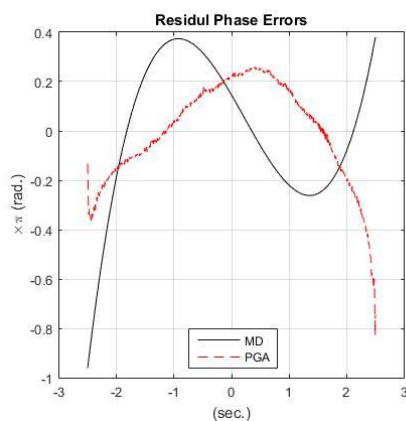
(ج)



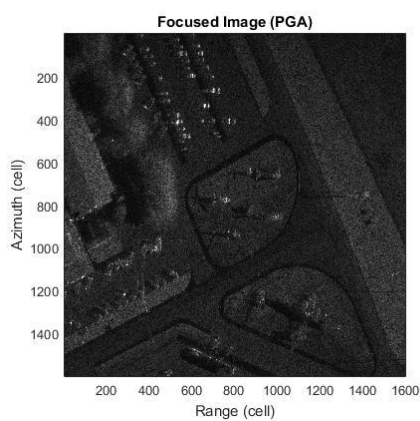
(ب)



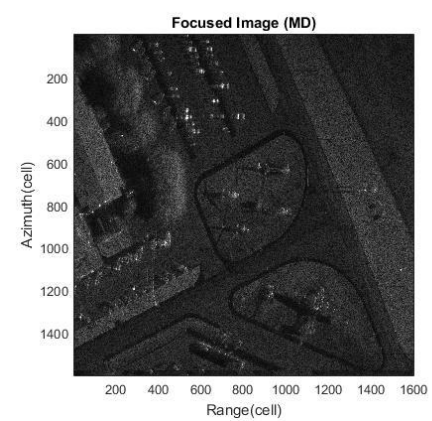
(الف)



(و)

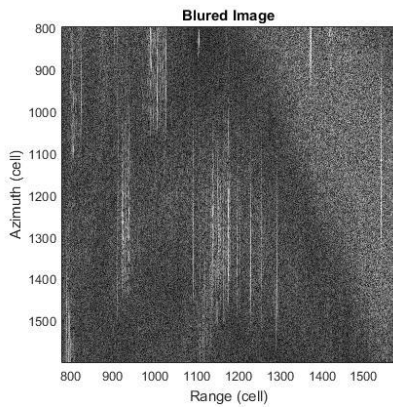


(ه)

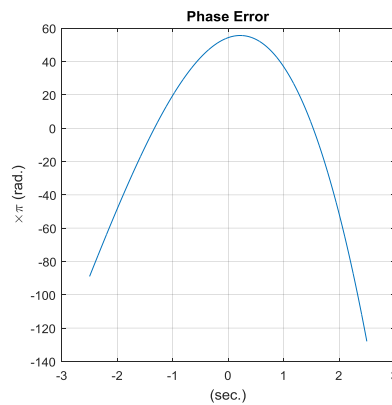


(د)

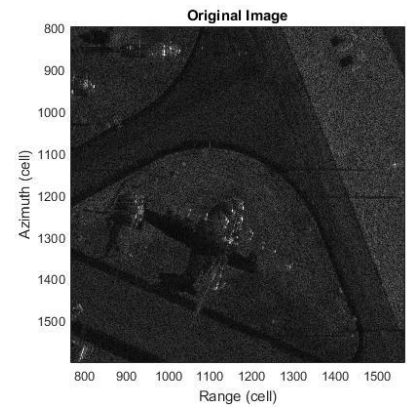
شکل ۳: نتایج شبیه سازی اول: (الف) تصویر اولیه، (ب) خطای فاز اعمال شده به تصویر، (ج) تصویر مات شده در اثر اعمال خطای فاز، (د) تصویر اصلاح شده با الگوریتم MD پیشنهادی، (ه) تصویر اصلاح شده با الگوریتم PGA، (و) خطای فاز باقی مانده پس از اعمال دو الگوریتم



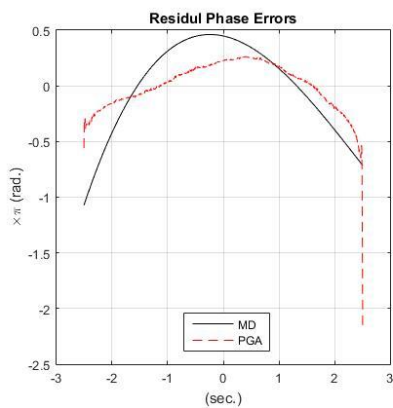
(ج)



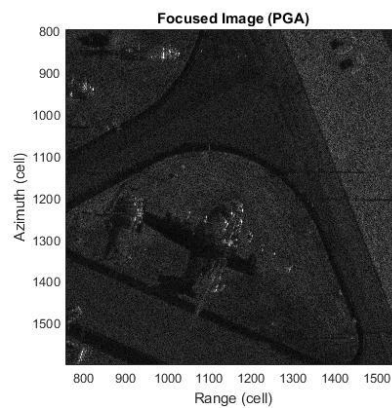
(ب)



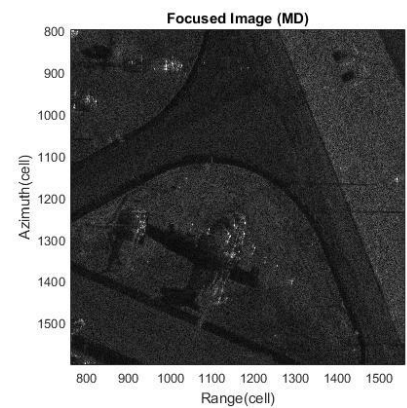
(الف)



(و)



(ه)



(د)

شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی دوم: (الف) بخشی از تصویر اولیه، (ب) خطای فاز اعمال شده به تصویر، (ج) بخشی از تصویر مات شده در اثر اعمال خطای فاز، (د) بخشی از تصویر اصلاح شده با الگوریتم MD پیشنهادی، (ه) بخشی از تصویر اصلاح شده با الگوریتم PGA، (و) خطای فاز باقی‌مانده پس از اعمال دو الگوریتم

and Remote Sensing Magazine, IEEE, vol.1, no.1, pp. 6-43, March 2013.

- [2] W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*. Artech House, 1995.
- [3] S. Buckreuss, "Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system", *European Transactions on Telecommunications*, vol.2, pp. 655-664, 1991.
- [4] P. Samczynski, K. Kulpa, "Non Iterative Map-Drift Technique" *IEEE Int. Conf. on Radar*. Adelaide, pp. 76-81, 2008.
- [5] P. Samczynski, K. Kulpa, "Coherent Map-Drift Technique" *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, Issue 3, 2010
- [6] S. Zhu, Ch. Ni, X. Wang, "Contrast Based Mapdrift Algorithm for SASAutofocus" *IEEE Int. Conf. on Signal Processing, Communication and Computing*, KunMing, pp. 1-4, 2013.
- [7] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, C. V. Jakowatz, "Phase Gradient Autofocus - Robust Tool for High Resolution Phase Correction" *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, vol. 30, pp. 1101-1109D, 1994.
- [8] M. R. Lopez, "Sandia National Laboratories", Sandia Corporation, Available: <http://www.sandia.gov/RADAR/sar-data.html>.

۵. جمع‌بندی

در این مقاله روشی برای تعیین بهینه تعداد تکرارهای الگوریتم جابجایی صحنه ارائه شد. در روش پیشنهادی تعداد تکرارهای الگوریتم از قبل تعیین نشده و الگوریتم به صورت خودکار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شاخص تمایز در تصویر نهایی بهبود پیدا کند. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته به کاهش قابل توجه زمان اجرای الگوریتم جابجایی صحنه با حفظ و حتی افزایش دقت آن (با حذف تکرارهای اضافی) منجر شود.

منابع

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, K.P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *Geoscience*