

الگوریتم خودکار بدون تکرار برای جبران‌سازی خطای فاز رادار دهانه ترکیبی بر پایه الگوریتم وضوح خودکار گرادیان فاز

محسن میرزایی فرد^۱، سید علیرضا سیدین^۲

۱- کارشناس ارشد گرایش مخابرات سیستم دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیئت علمی گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

خلاصه

با وجود پیشرفت‌های زیاد در سیستم‌های ناوبری رادارهای دهانه ترکیبی، نمی‌توان با این سیستم‌ها، تمامی خطاهای فاز بوجود آمده در اثر حرکت ناخواسته سکو را از بین برد. به همین جهت الگوریتم‌های تصحیح فاز خودکار ابداع گشتند که پرکاربردترین آن‌ها روش تمرکز خودکار گرادیان فاز با نام PGA می‌باشد. این الگوریتم با وجود کارایی خوب دارای نقص‌هایی می‌باشد. مهمترین آن‌ها تکراری بودن این الگوریتم است که نیازمند زمان محاسبات بالایی است. بعلاوه عدم قطعیت در بهینه بودن جواب خروجی در تعداد ثابت تکرار بالا می‌باشد. کارهای صورت گرفته تا کنون نتوانسته‌اند الگوریتمی قاطعانه تک تکراره را ارائه دهند و اکثراً در حالت‌های خاصی از داده به وضوح در یک تکرار دست یافته‌اند. در این مقاله الگوریتم خودکاری ارائه می‌شود که بدون تکرار خطای فاز را بر پایه ی PGA، بهتر از روش‌های پیشین جبران می‌نماید.

کلمات کلیدی: رادار دهانه ترکیبی، جبران‌سازی خطای فاز، الگوریتم وضوح خودکار گرادیان فاز

۱. مقدمه

سیستم‌های تصویربرداری اپتیکی به دلیل استفاده از امواج مرئی دارای محدودیت‌های بسیاری بودند. بعد از اختراع رادار در سال ۱۹۰۰، رادار دهانه ترکیبی^۲ (SAR) با در نظر گرفتن قضیه ی داپلر در سال ۱۹۵۱ اختراع شد. سیستم‌های تصویربرداری SAR با توجه به اینکه از امواج فرکانس بالا استفاده می‌کنند، می‌توانند در انواع شرایط جوی و فقدان نور از سطوح مورد نظر تصویر واضحی بسازند. این نوع رادارها در عملیات‌های نقشه‌برداری هوایی، هواشناسی و نظامی استفاده گسترده‌ای دارند. SAR برای تشکیل تصویر از ناحیه‌ای مشخص نیاز به جمع‌آوری مقدار قابل توجهی داده دارد. با توجه به این موضوع هرگونه خطایی از جمله خطای محاسبه موقعیت می‌تواند داده‌های بدست آمده را تحت تاثیر قرار دهد و باعث کاهش کیفیت تصویر نهایی شود.

برای مقابله با خطاهای حرکتی روش‌های بسیار زیادی به منظور پیش‌بینی موقعیت و امان‌های حرکتی سکوی SAR ارائه گردیده است. در عین پیشرفت تجهیزات و الگوریتم‌های تشکیل تصویر خطاهای غیر مرتبط با خطای محاسبه ی موقعیت، تاثیر خود را در تصویر ساخته شده نشان می‌دهند که اکثر این خطاها الگوی خاصی ندارند و به صورت تصادفی

^۱ Corresponding author: محسن میرزایی فرد

Email: Mohsen_mirzaefard@yahoo.com

^۲ Synthetic Aperture Radar

ظاهر می‌گردند. در نتیجه الگوریتم‌های تصحیح خطای فاز جدید که به صورت کلی خطاها را مورد بررسی قرار می‌دهند مطرح شده‌اند. الگوریتم گرادیان فاز^۱ (PGA) معروفترین الگوریتم جهت تصحیح خطای فاز به صورت غیر پارامتری^۲ است. این الگوریتم با وجود قدرت بالا دارای مشکل نیازمندی به تکرار، برای حصول به وضوح مناسب می‌باشد. به طور معمول در این الگوریتم تعداد ۵ الی ۶ تکرار برای دستیابی به نتیجه ی مطلوب لازم است. تا کنون تلاش‌هایی برای کاهش تعداد تکرارهای مورد نیاز این الگوریتم صورت پذیرفته است. این تلاش‌ها غالباً توانسته‌اند در نمونه داده‌های خاص به وضوح تک تکرار برسند و جامعیتی برای انواع داده‌ها ندارند. هدف این مقاله پیشنهاد الگوریتم خودکار بر پایه ی PGA است که با محاسبات کم و ضریب اطمینان بالا در دست‌یابی به نتیجه، بتواند بدون تکرار بهتر از یک PGA متداول با ۶ بار تکرار، خطای فاز را جبران نماید.

در این مقاله در بخش ۲ رادار SAR و نحوه ی جمع‌آوری داده آن مختصراً توضیح داده شده است. سپس در بخش ۳ خطاهای فاز به همراه روش تصحیح آن بیان گردیده است. PGA پرکاربردترین الگوریتم تصحیح خطای فاز می‌باشد که پایه ی اصلی الگوریتم پیشنهادی است. در بخش ۴ این الگوریتم معرفی گردیده است. در بخش ۵ کارهایی که تا کنون جهت کاهش تکرارهای PGA انجام شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل ۶ روش پیشنهادی به همراه نتایج حاصله ارائه می‌گردند. در فصل ۷ نیز با توجه به خروجی‌ها نتیجه‌گیری صورت می‌پذیرد.

۲. رادار SAR

SAR راداری است که عمدتاً جهت تهیه تصاویر از سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویر تهیه شده به وسیله این رادار تصاویری سیاه و سفید هستند، بدین صورت که بخش‌های با قدرت بازتابش^۳ بالاتر در تصویر روشن‌تر خواهند بود. این رادار قابلیت تفکیک اهداف در دو یا سه بعد را دارد. در بعد فاصله (برد^۴) مانند رادارهای معمولی با ارسال یک سیگنال فرکانس بالا و پردازش سیگنال دریافتی، می‌توان اهداف را از هم تفکیک نمود. قدرت تفکیک در بعد عمود بر برد^۵ (سمت^۶)، در رادارهای معمولی به طول آنتن وابسته است و رسیدن به دقت لازم گاهی از نظر عملی ممکن نیست؛ اما در رادار دهانه مصنوعی با حرکت رادار نسبت به صحنه مورد تصویربرداری، یک آنتن با طول زیاد شبیه‌سازی می‌شود؛ بنابراین می‌توان به قدرت تفکیک لازم دست یافت. از دید پردازش، با حرکت رادار سرعت نسبی بین رادار و اهداف در موقعیت‌های مختلف متفاوت بوده و بنابراین سیگنال بازگشتی از هر هدف فرکانس^۷ متفاوتی خواهد داشت که این پدیده باعث تفکیک اهداف از یکدیگر می‌گردد [1].

۳. خطاهای فاز و تصحیح خودکار آن

نمایش ایده‌آل هر هدف خاص در داده‌ی SAR بصورت سیگنالی است که فاز آن در طول زمان دهانه، خطی تغییر می‌کند. اما در عمل اختلالاتی در این فاز خطی بوجود می‌آید که عامل عمده‌ی این اختلالات، شامل حرکات جبران‌نشده‌ی

^۱ Phase Gradient Autofocus

^۲ Non-Parametric

^۳ Reflectivity

^۴ Range

^۵ Cross-range

^۶ Azimuth

^۷ Doppler frequency

هدف و سنسور، همچنین تقریب‌زنی‌های موجود در الگوریتم تشکیل تصویر می‌باشد. این فازهای ناخواسته را، خطاهای فاز می‌نامیم. این خطاها به روش‌های گوناگون باعث کم شدن کیفیت تصویر می‌گردند. این تأثیرات شامل اعوجاج هندسی تصویر، از دست رفتن حد تفکیک^۱، کاهش تمایز^۲، پدیدار شدن اهداف جعلی^۳ و کاهش نسبت سیگنال به نویز^۴ می‌باشند [2].

انحراف هواپیما از مسیر و سرعت از پیش تعیین شده باعث تار شدن تصویر نهایی خواهد شد. برای بازگرداندن وضوح لازم به تصویر، لازم است موقعیت دقیق هواپیما هنگام ارسال پالس‌ها معلوم باشد، بنابراین به سیستم ناوبری بسیار دقیقی نیاز است. خطای قابل تحمل در تعیین انحراف هواپیما از مرتبه چند صدم طول موج است و بنابراین در سیستم‌های فرکانس بالای معمول دسترسی به این دقت به ویژه در هواپیماهای سبک بدون سرنشین^۵ (UAV) بسیار مشکل است. به این دلیل که UAV در برابر اغتشاشات جوی حساس تر هستند و قابلیت حمل تجهیزات ناوبری سبک تری را دارند [3]. از این رو لازم است علاوه بر استفاده از داده دستگاه‌های ناوبری برای جبران خطای فاز ناشی از انحراف هواپیما، از روش‌هایی جهت تخمین و جبران خطای فاز باقیمانده و در نتیجه واضح کردن تصویر با استفاده از داده دریافتی بهره برد. این روش‌ها که در نهایت به وضوح تصاویر نهایی منجر می‌شوند، به روش‌های وضوح خودکار^۶ موسوم‌اند.

برخی از الگوریتم‌های وضوح خودکار خطای فاز را به صورت پارامتری (مثلاً چند جمله‌ای با ضرایب نامعلوم) فرض کرده و به تخمین ضرایب نامعلوم می‌پردازند و برخی الگوریتم‌های غیر پارامتری هستند. معمولاً بار محاسباتی الگوریتم‌های پارامتری کمتر و خطای تخمین آن‌ها در مقایسه با روش‌های غیر پارامتری بیشتر است. الگوریتم‌های وضوح خودکار اکثراً مبتنی بر تکرار می‌باشند و طبعاً تکرارهای بیشتر الگوریتم، با وجود صرف زمان محاسباتی بیشتر، به دقت بالاتر منجر خواهد شد. معروفترین الگوریتم تصحیح خطای فاز خودکار PGA می‌باشد، که الگوریتمی غیر پارامتری و تکراری است.

۴. روش وضوح خودکار گرادیان فاز (PGA)

روش PGA یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین روش‌های تصحیح خطای فاز می‌باشد. این روش مبتنی بر مدل نیست و در ضمن خطای از هر مرتبه‌ای را تصحیح می‌نماید [4]. ایده اصلی در این روش محاسبه گرادیان فاز سیگنال دریافتی می‌باشد که به این طریق تابع خطا از فاز به دامنه سیگنال منتقل شده و سپس استخراج می‌گردد. فرض اولیه این است که با گرفتن تبدیل فوریه از داده فشرده شده در برد می‌توان به تصویر رسید و در ضمن خطای فاز روی همه سبدهای برد یکسان فرض شده است. با متوسط گیری روی همه سبدهای برد و تکرار الگوریتم می‌توان خطای فاز از درجات مختلف را با دقت بالایی تخمین زد و تصحیح نمود [5]. شکل ۱ مراحل روش PGA را نشان می‌دهد.

^۱ Resolution

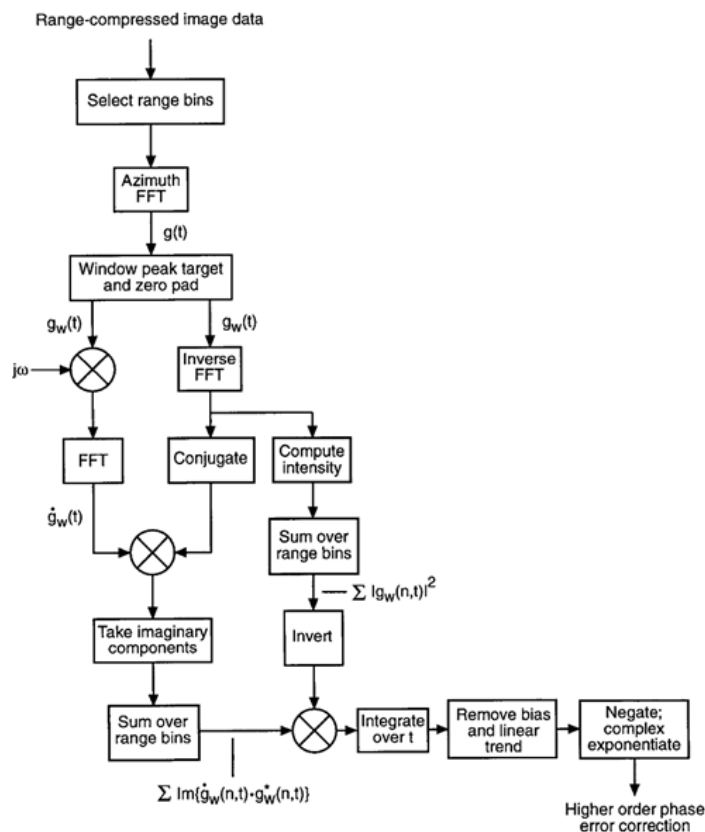
^۲ Contrast

^۳ Spurious

^۴ Signal to Noise Ratio (SNR)

^۵ Unmanned Aerial Vehicle

^۶ Autofocus Algorithm



شکل ۱: الگوریتم PGA [5]

مراحل این الگوریتم با تصویر فشرده شده در برد آغاز شده و زیرمجموعه‌ای از سبدهای برد با بیشترین انرژی انتخاب می‌شود (اهداف نقطه‌ای قوی در کلاتر ضعیف). سپس تبدیل فوریه سمت برای فشرده سازی سبد برد انتخاب شده انجام می‌شود. در مرحله بعد موقعیت دامنه حداکثر، مشخص شده و با شیفت چرخشی به مرکز تصویر منتقل می‌شود. سپس جهت جداسازی سیگنال از کلاتر و نویز، پنجره‌ای حول مرکز (موقعیت حداکثر) انتخاب می‌شود. طول این پنجره در دقت عملکرد این روش تأثیر بسزایی دارد. معمولاً در تکرار اولیه الگوریتم طول این پنجره بیشتر انتخاب می‌شود تا کل سیگنال خطا وارد شود ولی در تکرارهای بعد طول پنجره کوتاه‌تر می‌شود تا نویز بیشتری حذف شود. پس از پنجره‌بندی، با استفاده از پیکسل‌های انتخابی در پنجره، مشتق اول سیگنال محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است برای محاسبه مشتق از ویژگی مشتق در تبدیل فوریه استفاده شده است و در نهایت با استفاده از این مشتق فاز، تخمینی از مشتق خطای فاز حاصل خواهد شد. با انتگرال‌گیری از مشتق خطای فاز در طول دهانه تابع خطای فاز به دست می‌آید و بالاخره تصویر نهایی با استفاده از تابع خطای فاز تخمینی تصحیح می‌شود. برای دقت بیشتر، این الگوریتم چندین بار تکرار می‌شود.

برای درک روابط ریاضی این الگوریتم، سبد برد واحدی شامل یک هدف نقطه‌ای را پس از فشرده سازی در برد در نظر می‌گیریم. حوزه زمان این هدف در فرکانس پایه به صورت زیر خواهد بود:

$$g(t) = a_t e^{j\phi_0} e^{j\phi_e(t)}, \quad -\frac{T_a}{2} \leq t \leq \frac{T_a}{2} \quad (1)$$

که a_t دامنه سیگنال، ϕ_0 فاز و $\phi_e(t)$ خطای فاز سیگنال می‌باشند.

در مرحله بعد، پنجره متقارنی باعث انتخاب پیکسل با حداکثر دامنه می‌شود. از تابع وزن دهنده $W(\omega)$ برای پنجره استفاده شده است. استفاده از پنجره باعث محدودیت بیشترین فرکانس خطای فازی می‌شود که PGA می‌تواند آن

را تخمین بزند و حذف کند. فرکانس بالای مذکور با کاهش طول پنجره کاهش می‌یابد. از اعمال عکس تبدیل فوریه بر سیگنال پنجره شده داریم:

$$g_W(t) = a_t e^{j\phi_0} e^{j\phi_e(t)} \otimes w(t) \quad (2)$$

\otimes عملگر کانولوشن^۱ می‌باشد، $w(t)$ عکس تبدیل فوریه از تابع پنجره $W(\omega)$ می‌باشد. در این روش همچنین عکس تبدیل فوریه $j\omega G_W(\omega)$ جهت دستیابی به مشتق اول $g_W(t)$ محاسبه می‌شود که در این راستا از ویژگی مشتق در تبدیل فوریه استفاده می‌شود. داریم:

$$\dot{g}_W(t) = j\dot{\phi}_e(t)g_W(t) \quad (3)$$

که $\dot{\phi}_e(t)$ مشتق زمانی خطای فاز می‌باشد. با توجه به رابطه فوق می‌توان $\dot{\phi}_e(t)$ را با استفاده از $\dot{g}_W(t)$ محاسبه شده به دست آورد. با فرض ناچیز بودن اثر $w(t)$ ، تخمین مشتق اول خطای فاز (گرادیان فاز) به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{\phi}_e(t) = \frac{Im\{\dot{g}_W(t)g_W^*(t)\}}{|g_W(t)|^2} \quad (4)$$

در روش PGA جهت تخمین گرادیان بر روی تمام سبدهای برد متوسط گیری انجام می‌شود:

$$\hat{\phi}_e(t) = \frac{\sum_n Im\{\dot{g}_W(n,t)g_W^*(n,t)\}}{\sum_n |g_W(n,t)|^2} \quad (5)$$

که $g_W(n,t)$ سیگنال مربوط به هدف پنجره شده در n امین سبدهای برد می‌باشد. سپس از روی سیگنال حاصله در جهت سمت انتگرال می‌گیریم تا خطای فاز بدست آید. معکوس خطای فاز تخمین زده شده، در داده ضرب می‌شود و الگوریتم PGA برای رسیدن به وضوح بهتر مجدد تکرار می‌شود.

۵. مروری بر کارهای انجام شده جهت رسیدن به وضوح در یک تکرار PGA

پس از اختراع SAR روش های تصحیح خطاهای فاز آن نیز شروع به ظهور کردند. از معروف ترین و پرکاربردترین روش ها، روش PGA می‌باشد که توسط Eichel, Ghiglia, Jakowatz در طول مقالات [6] [7] [8] [4] ارائه گردید. اولین بار ایده ی کاهش تکرار های این الگوریتم بر کاربرد و مقاوم توسط Jakowatz پیشنهاد گردید. در [9] این ایده را معرفی کرد که روش پیدا کردن خطاهای فاز توسط فرمول متداول، آورده شده در معادله (۵) بهینه نمی‌باشد. وی برای محاسبه ی فاز این الگوریتم روش بیشترین شباهت^۲ (ML) را پیشنهاد نمود. طبق اظهار وی این الگوریتم توانست در تکرارهای اول و دوم با کمک ML به وضوح خوبی دست یابد. طبق بیان خود نویسنده این الگوریتم هنگامی که میزان انرژی سیگنال به کلاتر کم باشد پاسخ خوبی را ارائه نمی‌دهد. البته حالت متداول تخمین فاز PGA نیز، این مشکل را دارا است.

در تلاش بعدی Chan و Yeo در مقاله [10] به این سؤال که آیا الگوریتم PGA نیازمند تکرار زیادی برای رسیدن به کیفیت بالاست روبرو شدند و روشی جدید برای PGA که بتواند با یک تکرار به تصویر قابل قبولی دست یابد، ابداع کردند. طرح آن ها به این صورت بود که ابتدا با به دست آوردن کنتراست اهداف، با کمک روش ارائه شده در [11] اهداف برتر را

^۱ Convolution

^۲ Maximum Likelihood

انتخاب می‌کردند و برعکس روش PGA که در هر برد تنها یک هدف برتر را در نظر می‌گیرد، برای هر برد برابر تعداد ۳ الی ۴ عدد هدف برتر را انتخاب و با هم جمع می‌کردند. تئوری آن‌ها بر این اصل تأکید داشت که، هدفی که دارای انرژی بیشتری است لزوماً هدف مناسبی در یک برد خاص نمی‌باشد، بلکه هدف مناسب علاوه بر انرژی کافی باید دارای تمایز بالایی باشد. در این روش با کنار هم قرار دادن اهداف در یک برد خاص، مقدار انرژی سیگنال نسبت به نویز افزایش می‌یابد و پهنای باند نویز کاهش پیدا می‌کند. این دو محقق بار دیگر در [12] تئوری خود را با اسم الگوریتم وضوح خودکار گرادیان فاز با کیفیت^۱ (QPGA) ارائه کردند که در این مقاله، توضیح کاملتری از روش پیاده‌سازی این الگوریتم را ارائه می‌کنند. در این روش به دلیل عدم تکرار و مقایسه، انتخاب اندازه‌ی پنجره‌ی مورد نیاز برای جداسازی هدف بسیار سخت می‌باشد. پیشنهاد نویسندگان برای مقابله با این مشکل، انجام پروازهای آزمایشی متعدد از روی اهداف دست ساز با بازتاب بالا، می‌باشد.

این روش توسط ۲ مقاله دیگر که در ادامه معرفی می‌گردند، استفاده شده است. مقاله [13] این روش را بر روی داده‌های واقعی SAR پیاده‌سازی کرده و به کاربردی بودن آن را نشان داده است. مقاله [14] روش مذکور را برای داده‌های SAR پیاده‌سازی نموده است و توانسته با ۴ تکرار، به نتایج مشابه با ۶ تکرار در PGA متداول، دست پیدا کند. در مقاله [15] روش ارائه شده برای کاهش تکرارهای PGA شامل دو بخش می‌باشد. قسمت اول آن انتخاب هدف برتر می‌باشد و قسمت دوم مربوط به انتخاب اندازه‌ی پنجره می‌باشد. نویسنده در قسمت اول نوآوری خاصی نداشته است و با کمک مقالات [10] و [12] این بحث را مطرح می‌کند که بازتابش زیاد هدف، دلیلی برای انتخاب آن هدف نمی‌باشد، بلکه هدفی خوب است که بهتر ایزوله شده باشد و این انتخاب می‌تواند با توجه به کنتراست هدف‌های موجود امکانپذیر شود. فرمول محاسبه کنتراست تصویر استفاده شده در این مقاله معادله‌ی (۶) می‌باشد.

$$C = \frac{\sqrt{E\{[I^2(m, n)] - E[I^2(m, n)]\}}}{E[I^2(m, n)]} \quad (6)$$

که E علامت امید و I میزان تابش هر نقطه می‌باشد. در قسمت دوم این مقاله نویسنده روشی خودکار را با کمک مقاله [16] ارائه کرده است. در این روش ابتدا ناحیه‌ی دور از مرکز سمت انتخاب می‌شود و مقدار میانگین انرژی آن محاسبه می‌گردد. سپس با توجه به این میانگین انرژی اندازه‌ی پنجره W_b انتخاب می‌گردد. در داخل W_b پنجره‌ی ای که در آن سرعت تغییرات نزولی فاز سریع است با نام W_a انتخاب می‌شود و در انتها میانگین W_a و W_b به عنوان پنجره‌ی نهایی W_s در نظر گرفته می‌شود. این مقاله با وجود افزایش کیفیت کارایی و کاهش تکرارهای PGA، ادعایی مبنی بر انجام PGA بدون تکرار نداشته است.

مقاله‌ی [17] نیز با بحث در مورد استفاده از کنتراست اهداف، به جای استفاده از تمامی بردها تنها از بردهایی استفاده می‌کند که دارای اهداف متمایز باشند. و در انتها برای بررسی نیازمندی به تکرار، ۳ پارامتر کنتراست آنژیوپی و انحراف از معیار را مورد بررسی قرار می‌دهد. این مقاله نیز تنها به کاهش تکرارهای PGA رسیده است و نتوانسته PGA بدون تکرار را پیاده‌سازی کند.

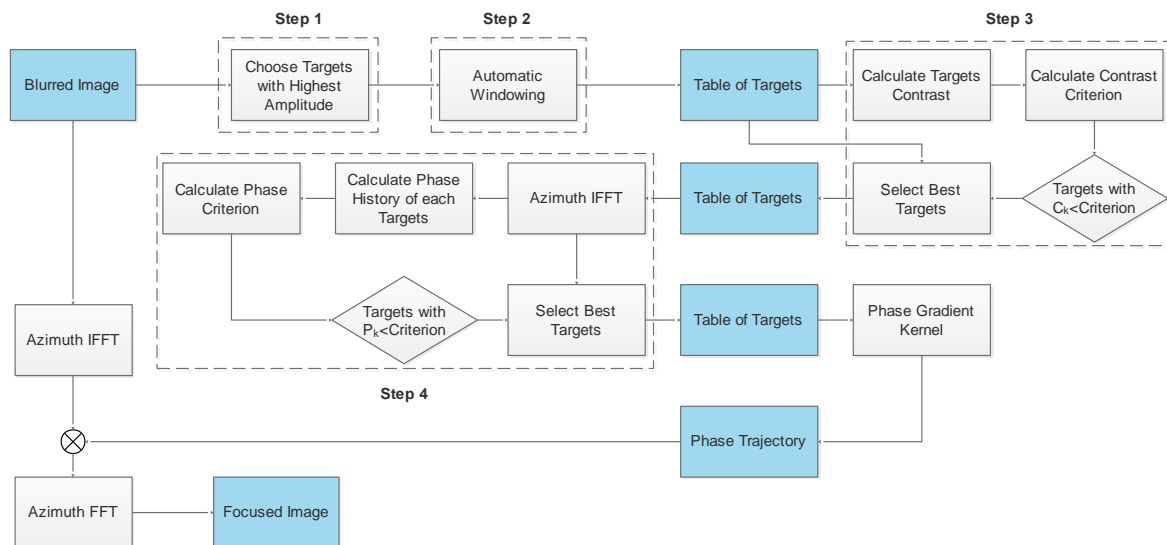
روش PGA به دلیل وابستگی به وجود هدف برتر ناحیه‌ی تحت تابش، در برخورد با ناحیه‌های هموار و یک دست کارایی خوبی را از خود ارائه نمی‌دهد. در مقاله‌ی [18] نویسنده روشی بر پایه‌ی PGA برای مقابله با کمبود هدف برتر را پیشنهاد می‌کند، که دارای مراحل پردازشی زیادی می‌باشد که چندین برابر PGA عادی زمان می‌برند. همانطور که از مطالعات قابل استناد است، تا کنون در کارهای انجام شده جهت دست‌یابی به PGA تک تکرار، الگوریتم‌های ارائه شده یا دارای بار محاسباتی بالا هستند و یا تنها توانسته‌اند تکرارها را کاهش دهند و فقط در داده‌های خاص به

^۱ Quality Phase Gradient Autofocus

تک تکرار برسند. هدف این مقاله پیشنهاد الگوریتمی است که با محاسبات کم و ضریب اطمینان بالا در دست یابی به نتیجه، بتواند بدون تکرار به وضوح کامل دست یابد.

۶. الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم ارائه شده در این مقاله دارای ۴ قسمت اساسی است. نمودار بلوکی این روش مشابه شکل ۲ می باشد.



شکل ۲: نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی

۶-۱. انتخاب اهداف برجسته

مهمترین عامل در انتخاب اهداف میزان سیگنال به نویز آن‌ها می باشد. سیگنال قوی تر موجب تشخیص بهتر الگوی خطای فاز موجود می گردد. در نتیجه ابتدا الگوریتم با توجه به بازتابش، تعداد مشخصی از اهداف که سیگنال بازگشتی آن‌ها دارای دامنه ی بیشتری است را انتخاب می نماید. این تعداد با توجه به آزمایش‌های صورت پذیرفته تا ۱۰ هدف برتر نیز می تواند محدود شود.

۶-۲. انتخاب طول پنجره خودکار

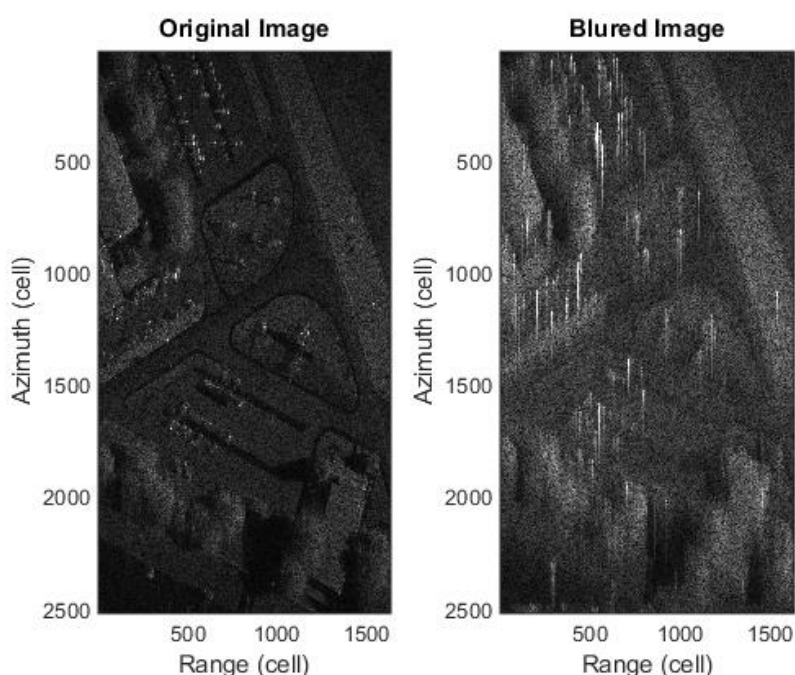
با توجه به عدم تکرار الگوریتم، انتخاب طول پنجره بسیار مهم می باشد. این انتخاب با کمک روش مطرح شده در مقاله [16] صورت می گیرد. با این تفاوت که در روش پیشنهادی طول پنجره برای هر هدف را جداگانه بدست می آوریم. این عمل باعث ورود نویز کمتر به الگوریتم می شود. در الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله طول پنجره با مقایسه دامنه ی هدف به صورت فیلتر شده، با میانگین انرژی کل داده ی دریافتی تعیین می شود. دلیل فیلتر کردن هدف در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، کم کردن احتمال انتخاب پنجره نا مناسب به دلیل وجود نویز فرکانس بالا می باشد.

۳-۶. انتخاب اهداف دارای کنتراست زیاد

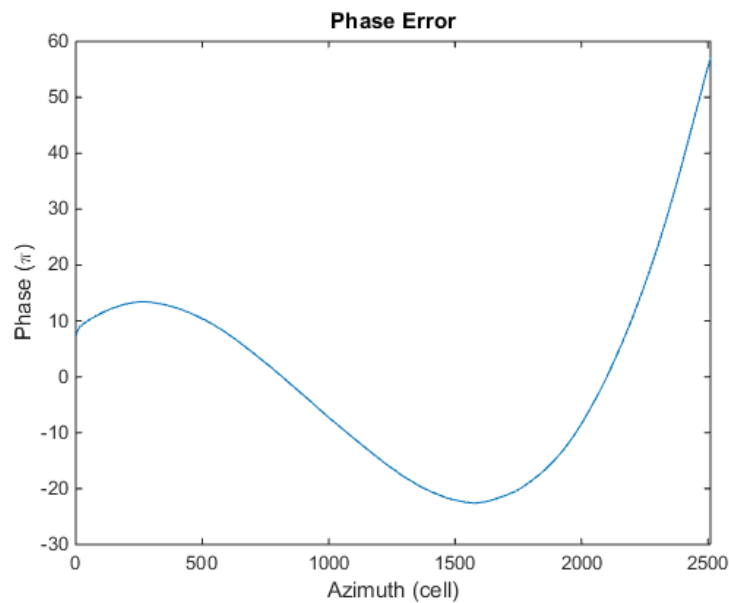
با توجه به مقالات [10] و [12] معیار دامنه برای انتخاب اهداف برتر کافی نمی باشد. در این مرحله با کمک فرمول (۶) کنتراست اهداف بدست آمده در مرحله پیشین حساب می شوند. فرق روش پیشنهادی در این مقاله این می باشد که تمامی برد ها جهت یافتن اهداف برجسته جست و جو نمی شوند که باعث افزایش قابل ملاحظه سرعت می گردد. حال میانگین کل کنتراست ها را محاسبه می نماییم. سپس اهدافی که کنتراست آن ها از میانگین کل کنتراست ها بیشتر است برای مرحله بعد انتخاب می گردند.

۴-۶. انتخاب اهداف با تغییرات فاز مشابه

با توجه به مطالب اشاره شده در بخش ۵ ، معیار دامنه و کنتراست به تنهایی برای انتخاب اهداف کافی نمی باشند. این امر با انجام شبیه سازی قابل مشاهده است. برای شبیه سازی، این مقاله از داده های واقعی SAR نشان داده شده در شکل ۳ (سمت چپ) که توسط خطای فاز درجه ۳ آلوده شده اند، استفاده می کند. داده ی محو شده در شکل ۳ (سمت راست) قابل مشاهده است. الگوی خطای فاز اعمال شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

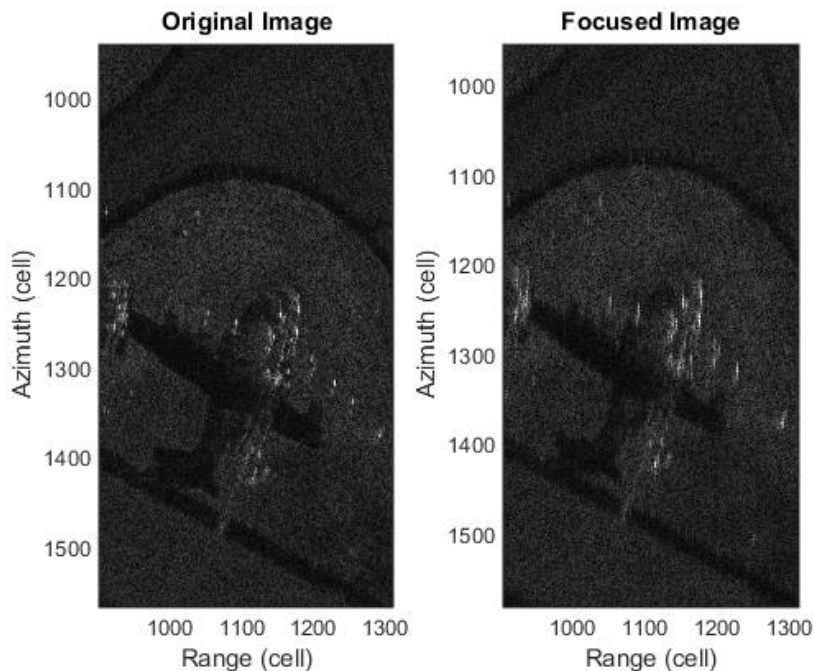


شکل ۳: تصویر محو شده همراه با خطای فاز (سمت راست) ، داده های واقعی SAR (سمت چپ)

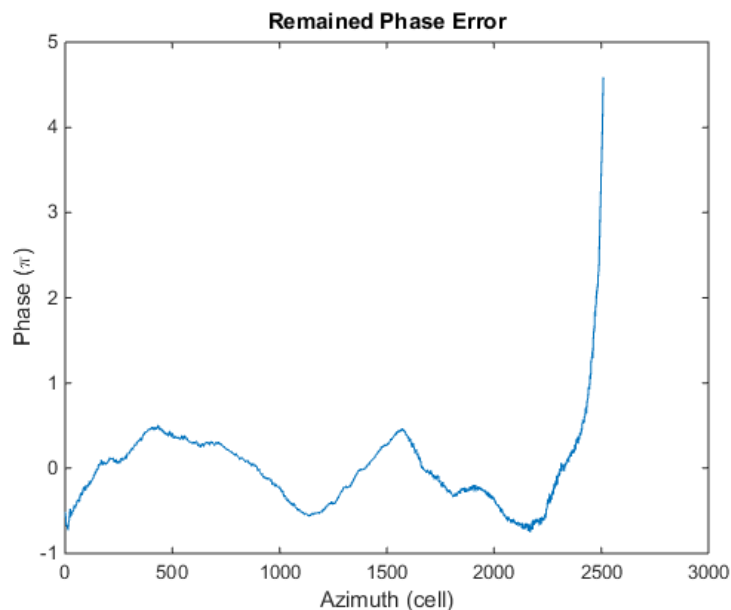


شکل ۴: خطای فاز اعمالی به داده واقعی

نتایج شبیه‌سازی ۳ مرحله قبل، که ارتفاع بافته‌ی کارهای پیشین می‌باشد در شکل ۵ (سمت راست) آورده شده است. برای مقایسه بهتر تصاویر نهایی بزرگ‌نمایی شده‌اند. شکل ۶ فاز باقی مانده را نشان می‌دهد.



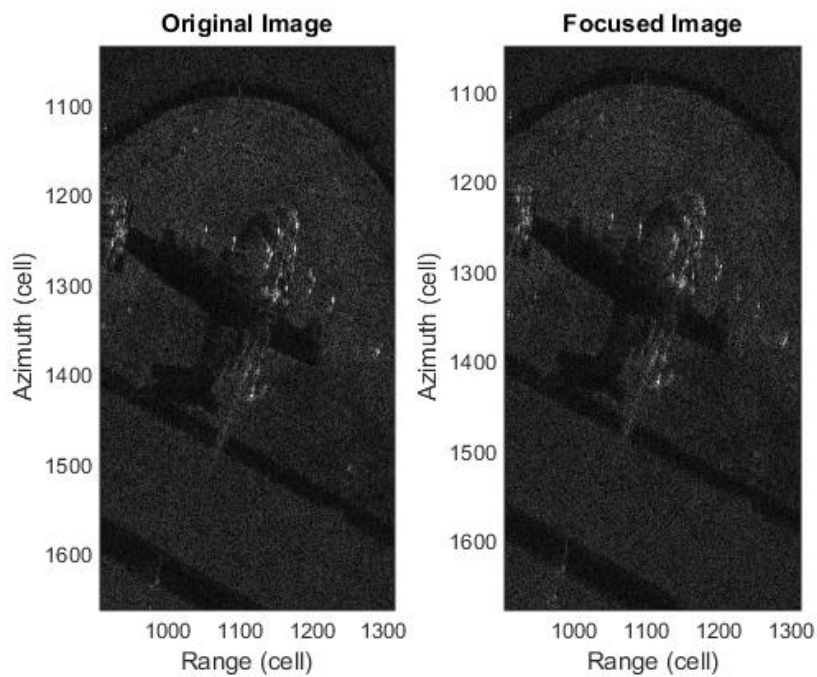
شکل ۵: تصویر SAR بعد از حذف خطای فاز با روش‌های پیشین (سمت راست)، تصویر واقعی SAR (سمت چپ)



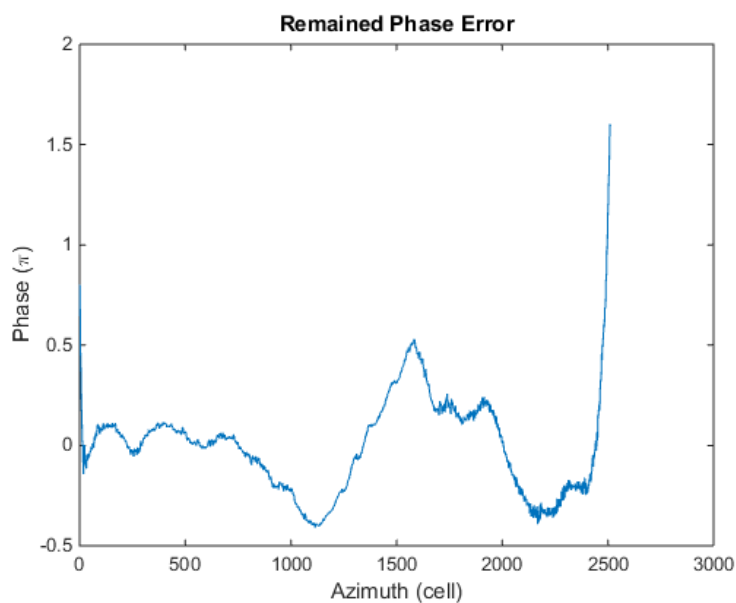
شکل ۶: خطای فاز جبران نشده با روش های پیشین

اهدافی که تا کنون انتخاب شده اند دارای کیفیت بالایی از نظر دامنه و کنتراست می باشند، که آن ها را برای انجام پردازش PGA با تکرار کم مناسب می دانیم. اما در میان این اهداف، اهدافی موجود می باشند که هنوز خطای فاز مطلوبی ندارند. با ارائه روشی که این اهداف اضافه را بتواند حذف نماید، می توان الگوریتم تک تکرار PGA را پیاده سازی کرد. روش پیشنهادی به این صورت می باشد که خطای فاز اهداف انتخاب شده تا این مرحله، توسط فرمول (۴) محاسبه می گردد. سپس از روی فاز های بدست آمده، میانگین گرفته می شود تا تخمینی از خطای فاز کل حاصل شود. حال به عنوان خطا، میزان واریانس هر هدف از مقدار میانگین محاسبه می شود. از روی این خطاها برای بدست آوردن معیار انتخاب، میانگین گیری انجام می شود. اهدافی که از مقدار معیار خطای کمتری دارند به عنوان اهداف برتر نهایی انتخاب می شوند. اهداف انتخاب شده جهت تصحیح خطای فاز کل تصویر استفاده می گردند. تصویر ۷ (سمت راست) نتیجه پیاده سازی الگوریتم پیشنهاد شده بر روی داده های محو شده SAR را نشان می دهد. در شکل ۸ میزان خطای فاز باقیمانده از این روش را نشان می دهد.

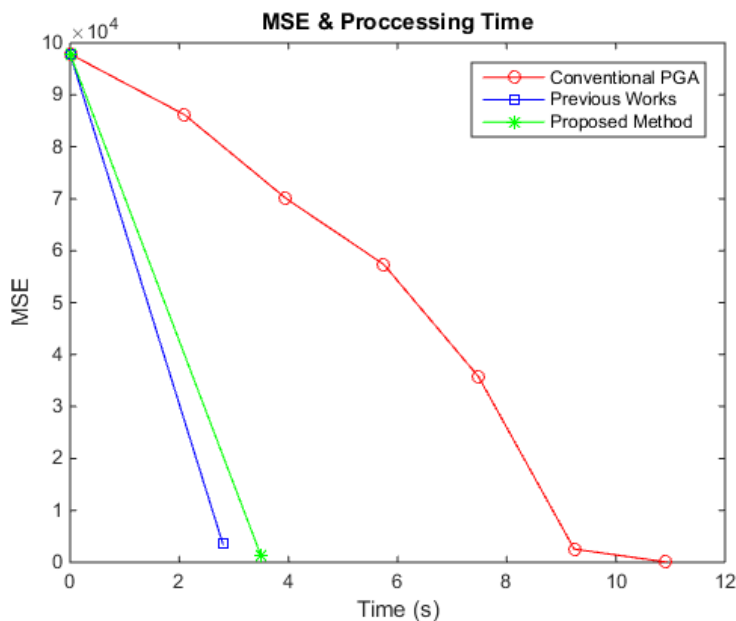
قابل ذکر است با توجه به اینکه سرعت عملیات FFT بسیار وابسته به اندازه ی داده می باشد. این الگوریتم با داشتن حجم داده ی کم دارای سرعت بسیار بالایی نسبت به الگوریتم هایی است که از کل داده ها جهت تصحیح خطای فاز استفاده می برند. یک مقایسه ی عددی از نظر سرعت و میزان خطای الگوریتم در شکل ۹ ارائه شده است. این نتایج جهت نمایش بهتر در جداول ۱ و ۲ تکرار شده اند. شبیه سازی ها توسط سیستمی دارای پردازنده 2.2GHz و حافظه 4GByte انجام شده است.



شکل ۷: تصویر SAR بعد از حذف خطای فاز با روش پیشنهادی (سمت راست)،
تصویر واقعی SAR (سمت چپ)



شکل ۸: خطای فاز جبران نشده با روش های پیشین



شکل ۹: مقایسه روش پیشنهادی با PGA متداول و کارهای مطالعه شده پیشین از نظر سرعت پردازشی و میزان خطا

جدول ۱: مقایسه سرعت پردازش هر مرحله

تکرار ششم	تکرار پنجم	تکرار چهارم	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول	زمان پایان هر مرحله (S)
10.92	9.24	7.48	5.75	3.95	2.09	PGA متداول
						کارهای پیشین
						روش ارائه شده

جدول ۲: مقایسه خطای MSE تصویر هر مرحله با تصویر بدون خطا

تکرار ششم	تکرار پنجم	تکرار چهارم	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول	خطای MSE
710	2549	35744	57326	70079	86177	PGA متداول
						کارهای پیشین
						روش ارائه شده

۷. نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتمی جدید ارائه شده است که می‌تواند خطای فاز داده SAR را بدون تکرار تخمین بزند و آن را جبران نماید. در کارهای پیشین جهت کاهش تعداد تکرارهای PGA، هدف برتر با کمک معیارهای دامنه و کنتراست انتخاب می‌گردید. الگوریتم پیشنهادی نیز از معیارهای دامنه و کنتراست استفاده می‌کند، اما به آن مرحله‌ی انتخابی جدیدی با

کمک بررسی الگوی خطای فاز اضافه می‌گردد. با توجه به نتایج، الگوریتم پیشنهادی توانست بدون تکرار تصویر SAR را واضح سازد. این الگوریتم توانست تصویر SAR را بهتر از ۵ تکرار یک PGA متداول تنها در طول زمان معادل ۲ تکرار آن واضح سازد. این الگوریتم نسبت به کارهای صورت گرفته جهت کاهش تکرار PGA، به نتایج بهتری رسیده است. این نتایج در جدول ۱ و ۲ قابل مشاهده است. شبیه سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که روش‌های پیشین تمامی حالت داده‌ی SAR را نمی‌توانند به خوبی واضح سازند. اما این الگوریتم با انجام اندکی محاسبات بیشتر توانست به نتایج بهتری دست پیدا کند.

۸. مراجع

1. A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek and P. K. Papathanassiou (2013), "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 12, pp. 6-43.
2. J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington and W. J. Albersheim (1960), "The Theory and Design of Chirp Radars," *The Bell System Technical Journal*, vol. 39, no. 4, pp. 745-808.
3. S. Buckreuss (1991), "Motion Errors in an Airborne Synthetic Aperture Radar System," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 2, no. 3, pp. 655-644.
4. D. Wahl, P. Eichel, D. Ghiglia and C. J. Jakowatz (1994), "Phase Gradient Autofocus-a Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835.
5. W. G. Carrara, R. S. Goodman and R. M. Majewski (1995), *Spotlight Synthetic Aperture Radar*, Boston - Landan: Artech House.
6. P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz (1988), "A new phase correction method for synthetic aperture radar," in *the Digital Signal Processing Workshop at Stanford Sierra Lodge*, New York.
7. P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz (1989), "Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 1-3.
8. P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, C. V. Jakowatz and D. E. Wahl (1992), "Phase-gradient autofocus for SAR phase correction: explanation and demonstration of algorithmic steps," in *Digital Signal Processing Workshop at Starved Rock State Park*, New York.
9. C. V. Jakowatz and D. E. Wahl (1993), "Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic-aperture-radar imagery," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 10, no. 12, pp. 2539-2546.
10. H. L. Chan and T. S. Yeo (1997), "Non-Iterative Spotlight SAR Autofocusing Using A Modified Phase-Gradient Approach," *IEEE*, vol. 90, no. 7, pp. 484-486.
11. E. Yadin (1994), "SAR Autofocusing Viewed as Adaptive Beamforming on Prominent Scatterer," *IEEE Radar Conf.*, vol. 10, no. 3, pp. 138-143.

12. H. L. Chan and T. S. Yeo (1998), "Noniterative Quality Phase-Gradient Autofocus (QPGA) Algorithm for Spotlight SAR Imagery," *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 36, no. 5, pp. 1531-1539.
13. M. Kuźniak and M. Malanowski (2007), "Implementation of the Phase Gradient Autofocus algorithm for Spotlight SAR," in *SPIE*, England.
14. T. Fu, M. Gao and Y. He (2003), "An Improved Scatter Selection Method for Phase Gradient Autofocus Algorithm in Saisu SAR Autofocus," in *IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing*, China.
15. T. Haoyang, S. Haoshan and Q. Changyuan (2009), "Study on Improvement of Phase Gradient Autofocus Algorithm," in *First International Workshop on Education Technology and Computer Science*, China.
16. M. Martorella, M. Preiss, B. Haywood and B. Bates (2007), "Polarimetric phase gradient autofocus," *IGARSS*, vol. 12, no. 9, pp. 133-136.
17. Y. Deng and Y. Zhang (2010), "Improved PGA Algorithm Based on Adaptive Range Bins Selection," *Image Analysis and Signal Processing (IASP)*, vol. 3, no. 10, pp. 232-235.
18. Y. Li, C. Liu, Y. Wang and Q. Wang (2012), "A Robust Motion Error Estimation Method Based on Raw Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 7, pp. 2780-2790.