

خودتمرکزدهی برای جبران خطای حرکت در رادار روزنه ترکیبی پهپاد با تفکیک‌پذیری زیاد برد

محمدصادق فاضل^۱، استادیار؛ مجتبی بهشتی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - fazel@cc.iut.ac.ir

۲- پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - behesht@cc.iut.ac.ir

چکیده: حساسیت پهپاد (UAV) به اغتشاشات جوی باعث انحراف آن از مسیر مستقیم و ایجاد خطای حرکت در تصاویر رادار روزنه ترکیبی پهپاد (UAV SAR) می‌شود. در این مقاله جبران خطای حرکت یک UAV SAR که در مود تصویربرداری نواری در ارتفاع پایین کار می‌کند و از سیگنال LFM پله‌ای برای افزایش تفکیک‌پذیری برد بهره می‌برد، بررسی می‌گردد و دو رویکرد جبران حرکت همراه با تشکیل تصویر پیشنهاد می‌شود. برای جبران حرکت، روش‌های قبلی خودتمرکزدهی گرادیان فاز به‌حالت سیگنال LFM پله‌ای تعمیم داده می‌شود. خطای حرکت بر اساس بازتاب زیرپالس میانی سیگنال LFM پله‌ای تخمین زده شده و برای جبران خطای بازتاب همه زیرپالس‌ها به‌کار می‌رود. این ایده، پیچیدگی محاسباتی خودتمرکزدهی در UAV SAR دارای تفکیک‌پذیری زیاد را به‌طور قابل توجه کاهش می‌دهد. همچنین شبیه‌سازی رویکردهای پیشنهادی برای خطاهای چندجمله‌ای و سینوسی نشان می‌دهد که خطای حرکت به‌خوبی جبران شده و مقادیر ISLR و PSLR می‌تواند به حدود -20 dB در تصاویر اهداف نقطه‌ای کاهش یابد. بنابراین این رویکردها برای جبران خطای حرکت و تشکیل تصویر در سامانه‌های UAV SAR با تفکیک‌پذیری زیاد مناسب هستند.

واژه‌های کلیدی: رادار روزنه ترکیبی، LFM پله‌ای، خطای حرکت، خودتمرکزدهی.

Autofocus for Motion Error Compensation in High Range Resolution UAV Synthetic Aperture Radar

M. S. Fazel¹, Assistant Professor; M. Beheshti², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: fazel@cc.iut.ac.ir

2- Research Institute for Information and Communication Technology, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: behesht@cc.iut.ac.ir

Abstract: Unmanned air vehicle (UAV) sensitivity to atmospheric turbulence leads to deviation from the straight trajectory and results in motion error in the UAV synthetic aperture radar (SAR) images. In this paper, motion error compensation of a UAV SAR, which works in the stripmap mode at low altitude and uses stepped linear frequency modulation (LFM) signaling for high range resolution is investigated and two joint motion compensation and image formation approaches are proposed. For motion compensation, the existing phase gradient autofocus methods are extended to the case of stepped-LFM signaling. The motion error is estimated based on the echoed data of the middle stepped-LFM sub-pulse and is applied for error compensation of all sub-pulses. This idea significantly reduces the autofocus computational complexity in high resolution UAV SAR. Simulation results of the proposed approaches for polynomial and sinusoidal errors show their good motion compensation performance with ISLR and PSLR values close to -20 dB for point targets. Therefore, the proposed approaches are appropriate for motion error compensation and image formation in high resolution UAV SAR systems.

Keywords: Synthetic aperture radar (SAR), stepped-LFM, motion error, autofocus.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸

نام نویسنده مسئول: مجتبی بهشتی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات.

۱- مقدمه

رادار روزنه ترکیبی^۱ (SAR)، یک سامانه تصویربرداری با توانایی کار در شرایط مختلف آب و هوایی و در شب یا روز است. این سامانه در حالی که روی یک سکوی هواپایه یا فضاپایه نصب شده است، با سرعتی ثابت در مسیری نامی حرکت داده می‌شود تا با ارسال امواج الکترومغناطیسی، ناحیه‌ای از سطح زمین را جارو کند. سپس با دریافت بازتاب‌های امواج و پردازش همدوس آن‌ها، تصویری با تفکیک‌پذیری مناسب در راستای برد و سمت تشکیل می‌شود. تفکیک‌پذیری برد با پهنای باند پالس ارسالی رابطه مستقیم دارد و افزایش آن، نیازمند پهنای باند لحظه‌ای وسیع و نرخ نمونه‌برداری بالا است که سخت‌افزار سامانه را پیچیده یا غیرعملی می‌سازد. سه روش کلی برای افزایش تفکیک‌پذیری برد همراه با پهنای باند لحظه‌ای قابل‌قبول و نرخ نمونه‌برداری متوسط عبارت‌اند از: استفاده از زیرباندهای هم‌زمان^۲ [۱]، شیب‌زدایی در دریافت^۳ [۲] و ایجاد پهنای باند ترکیبی^۴ [۳]. برای کاهش پیچیدگی سخت‌افزار و محدود نبودن به عرض نواری^۵ باریک، ایجاد پهنای باند ترکیبی نسبت به روش‌های دیگر، برتری دارد. LFM پله‌ای^۶ یکی از سیگنال‌های کارآمد برای پیاده‌سازی پهنای باند ترکیبی است [۴]. دستیابی به نسبت‌های فشرده‌سازی خیلی بزرگ و سادگی پیاده‌سازی در تولید سیگنال و فشرده‌سازی بازتاب‌ها، از مزیت‌های دیگر LFM پله‌ای است.

برخلاف تفکیک‌پذیری برد، تفکیک‌پذیری در راستای سمت با حرکت سکو نسبت به صحنه به‌دست می‌آید. حرکت سکو برای سامانه‌های SAR هم مورد نیاز و مفید است و هم مشکل ایجاد می‌کند. حرکت سکو نسبت به صحنه، یک مدولاسیون فرکانس خطی (LFM) در راستای سمت در سیگنال بازتاب، به‌وجود می‌آورد. فشرده‌سازی این سیگنال در سمت، تفکیک‌پذیری سمت را ممکن می‌سازد. این تفکیک‌پذیری به‌شرط حرکت سکو در مسیری مستقیم، با پردازش همدوس پالس‌های دریافتی به‌دست می‌آید. در عمل به‌دلیل انحراف سکو از مسیر مستقیم و ناپایداری سرعت آن، همدوسی کامل به‌دست نمی‌آید و در نتیجه، تارشدهگی و اعوجاج هندسی در تصویر ایجاد می‌شود که به آن، خطای حرکت گفته می‌شود.

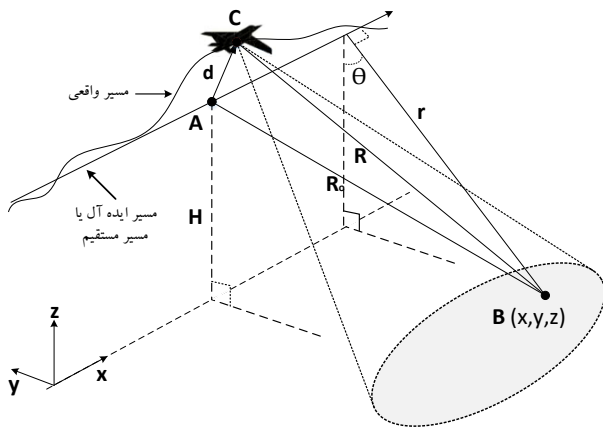
با استفاده از حسگرهای حرکتی نصب‌شده روی سکوی حامل رادار مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی و سامانه ناوبری اینرسی می‌توان موقعیت لحظه‌ای سکو را اندازه‌گیری کرد و این خطا را تا حدودی با روش‌های جبران خطای حرکت^۷ (MOCO)، رفع نمود. برای جبران دقیق خطا باید اندازه‌گیری موقعیت در مقیاسی کم‌تر از طول موج انجام شود که از دقت سامانه‌های موقعیت‌یاب مرسوم، فراتر است. بنابراین معمولاً پس از MOCO برای جبران باقی‌مانده خطا از روش‌های خود تمرکزدهی^۸ (AF) استفاده می‌شود. در این روش‌ها، پارامترهای لازم برای جبران خطا و متمرکز کردن تصویر از داده خام استخراج می‌گردد. خود تمرکزدهی شامل دو مرحله اصلی تخمین خطا و جبران آن می‌شود.

خود تمرکزدهی گرادیان فاز^۹ (PGA) [۵]، یک روش پرکاربرد است که برای جبران باقی‌مانده خطای حرکت در مود نقطه‌ای^{۱۰} معرفی شده است. PGA طی پنج گام آماده‌سازی داده در حوزه تصویر، انتقال به مرکز، پنجره‌گذاری، تخمین گرادیان فاز و جبران خطا اجرا می‌شود [۵]. روش PGA را می‌توان با تغییر روند اجرا یا تغییر ساختار داده SAR، برای مود نواری^{۱۱} هم به‌کار برد.

در [۶] با تغییر روند اجرای PGA، روش انحنای فاز^{۱۲} (PCA) برای مود نواری پیشنهاد شده است. PCA به‌دلیل دو بار انتگرال‌گیری از PGA ضعیف‌تر است. روش خود تمرکزدهی تطبیق فاز^{۱۳} (PMA)، ترکیبی از PGA و PCA است که مشکل انتگرال‌گیری PCA را کم‌تر می‌کند [۷]. برای تبدیل داده مود نواری به داده مود نقطه‌ای و سپس استفاده از PGA نیز، ایده‌هایی مطرح شده است [۸-۹]. هنگامی که پرتوی آنتن SAR پهن باشد، عرض نوار تصویر، وسیع شده و خطای حرکت به برد وابسته می‌شود. مرجع [۸] روش PWE-PGA^{۱۴} را با تبدیل داده مود نواری به داده مود نقطه‌ای برای جبران خطاهای وابسته به برد پیشنهاد کرده است. این روش، بار محاسباتی زیاد و همگرایی آرام دارد. همچنین در PWE-PGA مدل خطای وابسته به برد، تنها انحراف در مسیرهای عمود بر راستای حرکت را در نظر می‌گیرد. روش LML-WPGA^{۱۵} [۱۰] علاوه بر خطا در مسیرهای عمود بر راستای حرکت، خطا در راستای حرکت سکو را نیز در نظر گرفته و بار محاسباتی آن کم‌تر از PWE-PGA است. این روش، مهاجرت سلول برد (RCM)^{۱۶} غیرسیستماتیک (NsRCM)^{۱۷} را هم جبران می‌کند. در [۱۱] روشی برای افزایش دقت تخمین خطای روش LML-WPGA بر اساس جبران گام برد (RWC)^{۱۸} ارائه شده است.

جبران دقیق خطای حرکت در رادار روزنه ترکیبی پهباد^{۱۹} (UAV SAR)^{۲۰} اهمیت دوچندان دارد. زیرا پهباد به‌دلیل وزن کم و اندازه کوچک می‌تواند به‌راحتی با اغتشاشات هوا دچار لرزش و جابه‌جایی شود و نیز ممکن است به یک سامانه ناوبری با دقت بالا مجهز نباشد. همچنین پهباد معمولاً در ارتفاع پایین حرکت کرده و نواری با عرض وسیع را مشاهده می‌کند. بنابراین در جبران‌سازی حرکت، وابستگی خطا به برد باید با دقت در نظر گرفته شود. محدودیت مهم دیگر در جبران‌سازی حرکت UAV SAR، امکان نیاز به تشکیل تصویر بی‌درنگ و در نتیجه نیاز به افزایش سرعت و کاهش بار محاسباتی روش‌های جبران حرکت است.

بر اساس جستجو و مطالعات نویسندگان این مقاله، هیچ‌یک از مراجع قبلی، جبران حرکت را برای سیگنال LFM پله‌ای مطرح نکرده‌اند و روشی که شرایط حالت کلی مورد نظر این مقاله را بررسی کرده باشد، مشاهده نشد. مراجع مرور شده [۶-۱۱] نیز همگی سیگنال LFM را در نظر گرفته‌اند. برخلاف این پژوهش‌ها، در این مقاله جبران خطای حرکت در یک سامانه UAV SAR که از سیگنال LFM پله‌ای برای تفکیک‌پذیری زیاد در راستای برد استفاده می‌کند و در مود تصویر برداری نواری در ارتفاع پایین کار می‌کند، بررسی می‌شود.



شکل ۱: هندسه خطای حرکت سکوی حامل رادار

که $\sin \theta = \sqrt{1 - ((H-z)/r)^2}$ و θ زاویه برخورد^{۲۴} مسیر مستقیم برای کوتاه‌ترین برد را نشان می‌دهد. جمله اول رابطه (۲)، خطای برد به علت خطا در راستای حرکت سکو و جملات دوم و سوم ناشی از خطا در راستاهای عمود بر راستای حرکت سکو هستند. اگر رادار سیگنال $s_T(t) = \text{rect}(t/\tau) \exp\{j2\pi(f_c t + K_r t^2/2)\}$ را ارسال کند که τ پهناي پالس، f_c فرکانس حامل و K_r نرخ تغییر فرکانس است، معادل باند پایه سیگنال دریافتی مود نواری چنین است [۱۳]:

$$s_r(t, \eta) = \iint \sigma(r, x) w_a(\eta - \frac{x}{v}) \times s_T(t - \frac{2R}{c}) \exp\left\{-j4\pi f_c \frac{R}{c}\right\} dr dx \quad (3)$$

که $\sigma(r, x)$ ضریب بازتاب راداری، $w_a(\eta)$ الگوی سمت آنتن و c سرعت نور است. با گرفتن تبدیل فوریه از رابطه (۳) در راستای برد و جایگزینی $R_0 \approx r + \frac{(v\eta - x)^2}{2r}$ و $R = R_0 + \Delta R$ می‌توان نوشت:

$$S_r(f_r, \eta) = \iint \sigma(r, x) w_a(\eta - \frac{x}{v}) S(f_r) \exp\left\{-j4\pi f_r \frac{r}{c}\right\} \times \exp\left\{-j4\pi f_r \frac{(v\eta - x)^2}{2rc}\right\} \exp\left\{-j4\pi f_r \frac{\Delta R}{c}\right\} \times \exp\left\{-j4\pi f_c \frac{R_0}{c}\right\} \exp\left\{-j4\pi f_c \frac{\Delta R}{c}\right\} dr dx \quad (4)$$

در رابطه (۴)، جمله $S(f_r) \exp\{-j4\pi f_r(r/c)\}$ محل هدف در راستای برد را نشان می‌دهد و جمله $\exp\{-j4\pi f_r(v\eta - x)^2/(2rc)\}$ انحنای برد یا RCM را پدید می‌آورد که در هنگام تشکیل تصویر، جبران می‌گردد. جمله $\exp\{-j4\pi f_r \Delta R/c\}$ در حوزه زمان برد نشان‌دهنده یک تأخیر است که در اثر خطای حرکت به وجود آمده و NsRCM نامیده می‌شود [۱۰]. قسمت عمده NsRCM در MOCO رفع می‌گردد و باقی‌مانده آن با خود تمرکزدهی جبران می‌شود. جمله $\exp\{-j4\pi f_c \Delta R/c\}$ خطای فاز ناشی از جابه‌جایی سکو از مسیر ایده‌آل است. اثر این خطا در تصویر نهایی، اعوجاج در راستای سمت است. هدف خود تمرکزدهی، تخمین

نوآوری‌های مقاله در مقایسه با پژوهش‌های پیشین عبارت‌اند از: الف) شبیه‌سازی یک سامانه UAV SAR مبتنی بر سیگنال LFM پله‌ای با در نظرگیری خطا در مسیرهای عمود بر راستای حرکت^{۲۱} و خطا در راستای حرکت سکو، ب) پیشنهاد یک رویکرد جبران خطای حرکت و تشکیل تصویر با تعمیم روش PWE-PGA برای LFM پله‌ای، ج) پیشنهاد یک رویکرد جبران خطای حرکت و تشکیل تصویر با تعمیم روش LML-WPGA برای LFM پله‌ای.

روند ادامه مقاله به این شرح است: در بخش ۲، خطای حرکت مدل‌سازی می‌شود. در بخش ۳، سیگنال LFM پله‌ای معرفی می‌گردد. در بخش ۴، ساختارهای پیشنهادی برای خودتمرکزدهی و تشکیل تصویر در SAR با تفکیک‌پذیری زیاد معرفی می‌شود. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد و سرانجام، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ انجام می‌شود.

نشان‌ها: بردارهای ستونی با حروف کوچک پرننگ و ماتریس‌ها با حروف بزرگ پرننگ نمایش داده می‌شود. همچنین عملگرهای $(\cdot)^T$ و $(\cdot)^{-1}$ به ترتیب، مزدوج مختلط، ترانپوز و وارون را نشان می‌دهد و $E\{\cdot\}$ امید ریاضی است. $\text{rect}(\cdot)$ بیانگر تابع پالس مستطیلی متقارن با عرض پالس واحد است و تابع $\arg\{a\}$ زاویه عدد مختلط a را نشان می‌دهد. $\text{diag}\{a\}$ یک ماتریس قطری است که بردار a روی قطر آن قرار دارد.

۲- مدل‌سازی خطای حرکت

هندسه SAR در حضور خطای حرکت در شکل ۱ رسم شده است. محور x ، مسیر ایده‌آل و مسیر منحنی، مسیر واقعی سکو را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل، مرکز فاز آنتن رادار^{۲۲} (APC) با سرعت ثابت v در مسیر مستقیم جابه‌جا می‌شود. به دلیل انحراف مسیر واقعی، خطای برد رادار تا هدف پدید می‌آید. اگر ارتفاع سکو H باشد، مختصات واقعی مرکز فاز (نقطه C) و مختصات ایده‌آل آن (نقطه A) در زمان سمت η ، به ترتیب $[v\eta + \Delta x(\eta), \Delta y(\eta), H + \Delta z(\eta)]$ و $[v\eta, 0, H]$ است. خطای حرکت لحظه‌ای برابر با $[\Delta x(\eta), \Delta y(\eta), \Delta z(\eta)]$ است که $\Delta y(\eta)$ و $\Delta z(\eta)$ به ترتیب نشان‌دهنده جابه‌جایی APC در راستای عمود بر حرکت در جهت محورهای y و z است. یک هدف نقطه‌ای در موقعیت (x, y, z) در نظر بگیرید. فرض کنید زاویه بین خط دید آنتن و صفحه داپلر صفر (زاویه لوچی^{۲۳}) برابر صفر باشد. اگر برد لحظه‌ای از موقعیت واقعی و ایده‌آل APC به ترتیب برابر با $R_0(\eta; r, x)$ و $R(\eta; r, x)$ باشد،

$$R(\eta; r, x) = R_0(\eta; r, x) + \Delta R(\eta; x, y, z), \quad (1)$$

$$R_0(\eta; r, x) = \sqrt{(v\eta - x)^2 + r^2}$$

که $r = \sqrt{y^2 + (H-z)^2}$ نزدیک‌ترین برد تا مسیر مستقیم و $\Delta R(\eta; x, y, z)$ خطای برد است. با تقریب می‌توان نوشت [۱۲]:

$$\Delta R(\eta; x, y, z) \approx \left(\frac{v\eta - x}{r}\right) \Delta x(\eta) + \sin \theta \Delta y(\eta) + \cos \theta \Delta z(\eta) \quad (2)$$

آفت فرکانسی مناسب شیفت داده شده و به همدیگر متصل می‌شوند. سرانجام، تبدیل فوریه معکوس (IFFT)^{۲۸} برای ایجاد پاسخ فشرده شده برد به طیف ترکیبی اعمال می‌شود. پهنای باند طیف ترکیبی برابر است با $\beta_{total} = \beta + (P-1)\Delta f$ که تفکیک پذیری برد زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\rho_r = \frac{c}{2(\beta + (P-1)\Delta f)} \quad (۸)$$

۴- رویکردهای پیشنهادی خودتمرکزدهی برای SAR با تفکیک پذیری زیاد

در این بخش، یک UAV SAR که از سیگنال LFM پله‌ای برای رسیدن به تفکیک پذیری زیاد برد بهره می‌برد، در نظر گرفته می‌شود و دو رویکرد برای جبران خطای حرکت و تشکیل تصویر SAR مبتنی بر LFM پله‌ای پیشنهاد می‌شود. در سامانه مبتنی بر LFM پله‌ای، چند زیرپالس LFM به سوی محیط ارسال می‌شود و بازتاب هر زیرپالس دریافت می‌گردد. در این سامانه برای تخمین خطای حرکت می‌توان از داده یکی از زیرپالس‌ها، مجموعه‌ای از زیرپالس‌ها یا همه زیرپالس‌ها استفاده کرد. در اینجا پیشنهاد می‌شود برای کاهش بار محاسباتی، تنها داده یک زیرپالس در تخمین خطا به کار رود. با فرض فرد بودن تعداد زیرپالس‌ها و برای افزایش دقت تخمین، انتخاب داده زیرپالس میانی پیشنهاد می‌شود. البته پس از تخمین خطا، جبران خطا با ضرب فازی روی داده همه زیرپالس‌ها و همراه با تشکیل تصویر انجام می‌گردد.

۴-۱- رویکرد پیشنهادی اول

شکل ۲، رویکرد پیشنهادی اول برای خودتمرکزدهی همراه با تشکیل تصویر در SAR مبتنی بر LFM پله‌ای را نشان می‌دهد. بازتاب زیرپالس میانی پس از انتقال به باند پایه با عملگر FFT به حوزه فرکانس برده می‌شود. داده حوزه فرکانس از فیلتر منطبق و IFFT عبور داده می‌شود تا پاسخ فشرده شده برد به دست آید. این داده برای تخمین خطای حرکت به کار می‌رود. در این رویکرد، تخمین خطای نظیر زیرپالس میانی به کمک روش PWE-PGA انجام می‌گیرد. برای این کار، روزه ترکیبی در راستای سمت به چند زیرروزنه تقسیم می‌شود و خطای فاز نظیر زیرپالس میانی در زیرروزنه k ام چنین مدل می‌شود [۸]:

$$\begin{aligned} \varphi_e^{(k,p)}(\eta; r, x) &\approx \varphi_e^{(k,p)}(\eta; r) \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} (\sin \theta \Delta y^{(p)}(\eta) + \cos \theta \Delta z^{(p)}(\eta)) \\ &= \varphi_y^{(k,p)}(\eta) \sin \theta + \varphi_z^{(k,p)}(\eta) \cos \theta \end{aligned} \quad (۹)$$

که $p = (P+1)/2$. ماتریس تخمین گرادیان‌های خطای فاز زیرروزنه k ام برابر است با

$$\hat{\Phi}_{yz}^{(k,p)} = \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_y^{(k,p)} & \hat{\varphi}_z^{(k,p)} \end{bmatrix}^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^{(p)} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^{(p)} \hat{\Phi}^{(p)} \quad (۱۰)$$

این خطا و اصلاح اعوجاج ناشی از آن است. با جبران RCM و قسمت عمده NsRCM در MOCO و اعمال فیلتر منطبق و بازگشت به حوزه زمان، سیگنال فشرده شده برد به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} s_{rc}(t, \eta) &= \\ &\iint \sigma(r, x) w_a(\eta - \frac{x}{v}) \text{sinc}(K_r \tau (t - \frac{2r}{c})) \\ &\times \exp\left\{-j4\pi f_c \frac{R_0}{c}\right\} \exp\left\{-j4\pi f_c \frac{\Delta R}{c}\right\} dr dx \end{aligned} \quad (۵)$$

با قراردادن $R_0 \approx r + (v\eta - x)^2 / (2r)$ در (۵) و صرف نظر از جمله دارای فاز ثابت $\exp\{-j4\pi f_c r/c\}$ و حذف $\exp\{-j4\pi f_c x^2 / (2rc)\}$ و شیب‌زدایی^{۲۵} یعنی ضرب در $\exp\{j4\pi f_c (v\eta)^2 / (2rc)\}$ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} s(t, \eta) &= \iint \sigma(r, x) w_a(\eta - \frac{x}{v}) \\ &\times \text{sinc}(K_r \tau (t - \frac{2r}{c})) \exp\{j\omega_0 \eta\} \\ &\times \exp\{j\varphi_e(\eta; r, x)\} dr dx \end{aligned} \quad (۶)$$

که $\omega_0 = 4\pi v x / (r\lambda)$ ، $\lambda = c/f_c$ و $\Delta R(\eta; r, x) / c$ و $\varphi_e(\eta; r, x)$ به خطای فاز $\varphi_e(\eta; r, x)$ که وابسته به $\Delta R(\eta; r, x)$ است، خطای حرکت می‌گویند. رابطه (۶)، سیگنال فشرده شده برد در حوزه تاریخچه فاز^{۲۶} نامیده می‌شود. در بخش ۴، نمونه‌های این سیگنال برای تخمین خطای حرکت φ_e در روش‌های پیشنهادی خود تمرکزدهی به کار می‌رود.

۳- سیگنال LFM پله‌ای

سیگنال LFM پله‌ای شامل چند زیرپالس LFM است که هر زیرپالس، پهنای باند β و عرض τ دارد. فرکانس مرکزی زیرپالس‌های پی‌درپی به اندازه Δf اختلاف دارند به طوری که $\Delta f \leq \beta$ است. زیرپالس ارسالی i ام چنین مدل می‌شود [۱۴]:

$$\begin{aligned} s_r^{(i)}(t) &= \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \\ &\times \cos\left(2\pi f_c^{(i)} t + K_r \pi \left(t - \frac{\tau}{2}\right)^2\right), 0 \leq t \leq \tau \end{aligned} \quad (۷)$$

که

$$f_c^{(i)} = f_c + \left(-\frac{P-1}{2} + i - 1\right) \Delta f, 1 \leq i \leq P, K_r = \frac{\beta}{\tau}$$

و فرکانس حامل زیرپالس i ام و P تعداد زیرپالس‌ها است. با ترکیب مناسب بازتاب‌های نظیر P زیرپالس، یک شکل موج ترکیبی ایجاد می‌شود به گونه‌ای که تفکیک پذیری برد متناسب با پهنای باند شکل موج ترکیبی به دست آید. ترکیب و پردازش همدوس بازتاب‌ها می‌تواند در حوزه زمان یا فرکانس انجام شود. برای مثال در پردازش حوزه فرکانس، ابتدا بازتاب‌ها به باند پایه منتقل شده، با عملگر FFT^{۲۷} به حوزه فرکانس برده می‌شوند. سپس نمونه‌های حوزه فرکانس هر بازتاب از فیلتر منطبق عبور داده می‌شود. طیف‌های خروجی فیلتر منطبق با

که

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin \theta_N & \cos \theta_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}^{(p)} = \text{diag}\{w_1^{(p)}, \dots, w_N^{(p)}\},$$

$$w_n^{(p)} = \sum_{m=1}^M |s^{(p)*}(n, m)s^{(p)}(n, m+1)|,$$

$$\hat{\Phi}^{(p)} = [\hat{\phi}_1^{(p)}, \dots, \hat{\phi}_N^{(p)}]^T, \quad \hat{\phi}_n^{(p)} = [\hat{\phi}_{n,1}^{(p)}, \dots, \hat{\phi}_{n,M}^{(p)}]^T,$$

$$\hat{\phi}_{n,m}^{(p)} = \arg\{s^{(p)*}(n, m)s^{(p)}(n, m+1)\}$$

$$n=1, \dots, N, \quad m=1, \dots, M$$

روزنه ترکیبی نظیر زیرپالس میانی به چند زیرروزنه در راستای سمت تقسیم می‌شود. سپس خطای مستقل از برد هر زیرروزنه با روش WPGA [۱۵] تخمین زده شده و روی داده زیرپالس میانی جبران می‌گردد. پس از آن، خطای باقی‌مانده وابسته به برد زیرروزنه‌ها تخمین زده می‌شود. در زیرروزنه k ام و برای زیرپالس میانی، این خطا با سری تیلور مدل می‌شود [۱۰]:

$$\phi_{e, res}^{(k, p)}(\eta; r, x) \approx \theta_0^{(p)}(\eta) + \theta_1^{(p)}(\eta)\Delta r + \theta_2^{(p)}(\eta)\Delta r^2 \quad (11)$$

که r_c نزدیک‌ترین فاصله مرکز صحنه تا مسیر مستقیم است. برای کاهش بار محاسباتی، خطای حرکت در یک بلوک کوچک برد، تقریباً ثابت فرض می‌شود. با این فرض، می‌توان هر زیرروزنه را به B بلوک تقسیم کرد و بردار گرادیان فاز مستقل از برد هر بلوک را با ترکیب همدوس تخمین‌های حاصل از G سلول برد موجود در آن بلوک به‌دست آورد:

$$\hat{\Phi}^{(b, p)} = [\hat{\phi}_1^{(b, p)}, \dots, \hat{\phi}_M^{(b, p)}]^T, \quad b=1, \dots, B,$$

$$\hat{\phi}_m^{(b, p)} = \arg\left\{ \sum_{n=1}^G w_{b,n}^{(p)} s_b^{(p)*}(n, m) s_b^{(p)}(n, m+1) / w_b^{(p)} \right\} \quad (12)$$

که

$$w_b^{(p)} = \sum_{n=1}^G w_{b,n}^{(p)}, \quad m=1, \dots, M, \quad s_b^{(p)}(n, M+1) = 0$$

و $s_b^{(p)}(n, m)$ نمونه سیگنال $s^{(p)}(t, \eta)$ (رابطه ۶) در بلوک b ام، برد n ام و سمت m ام و $w_{b,n}^{(p)}$ نشان دهنده وزن n امین سلول برد در بلوک b ام است. چگونگی انتخاب وزن‌ها در [۱۲] آمده است. برد مصنوعی^{۳۱} بلوک برد b ام برای زیرپالس میانی چنین تعریف می‌شود:

$$\Delta \bar{r}_b^{(p)} = \frac{1}{w_b^{(p)}} \left(\sum_{n=1}^G \Delta r_b(n) w_{b,n}^{(p)} \right), \quad (13)$$

$$\Delta r_b(n) = r_b(n) - r_{c,b}$$

که $r_b(n)$ نزدیک‌ترین فاصله سلول برد n ام در بلوک b ام تا مسیر مستقیم و $r_{c,b}$ نزدیک‌ترین فاصله مرکز بلوک b ام تا خط مستقیم است. با تعریف‌های بالا، ماتریس تخمین گرادیان‌های ضرایب مدل خطای فاز برابر است با:

$$\hat{\Theta}^{(p)} = (\mathbf{A}_{block}^T \mathbf{W}^{(p)} \mathbf{A}_{block})^{-1} \mathbf{A}_{block}^T \mathbf{W}^{(p)} \hat{\Omega}^{(p)} \quad (14)$$

که

$$\hat{\Theta}^{(p)} = \left[\hat{\theta}_0^{(p)}, \hat{\theta}_1^{(p)}, \hat{\theta}_2^{(p)} \right]^T,$$

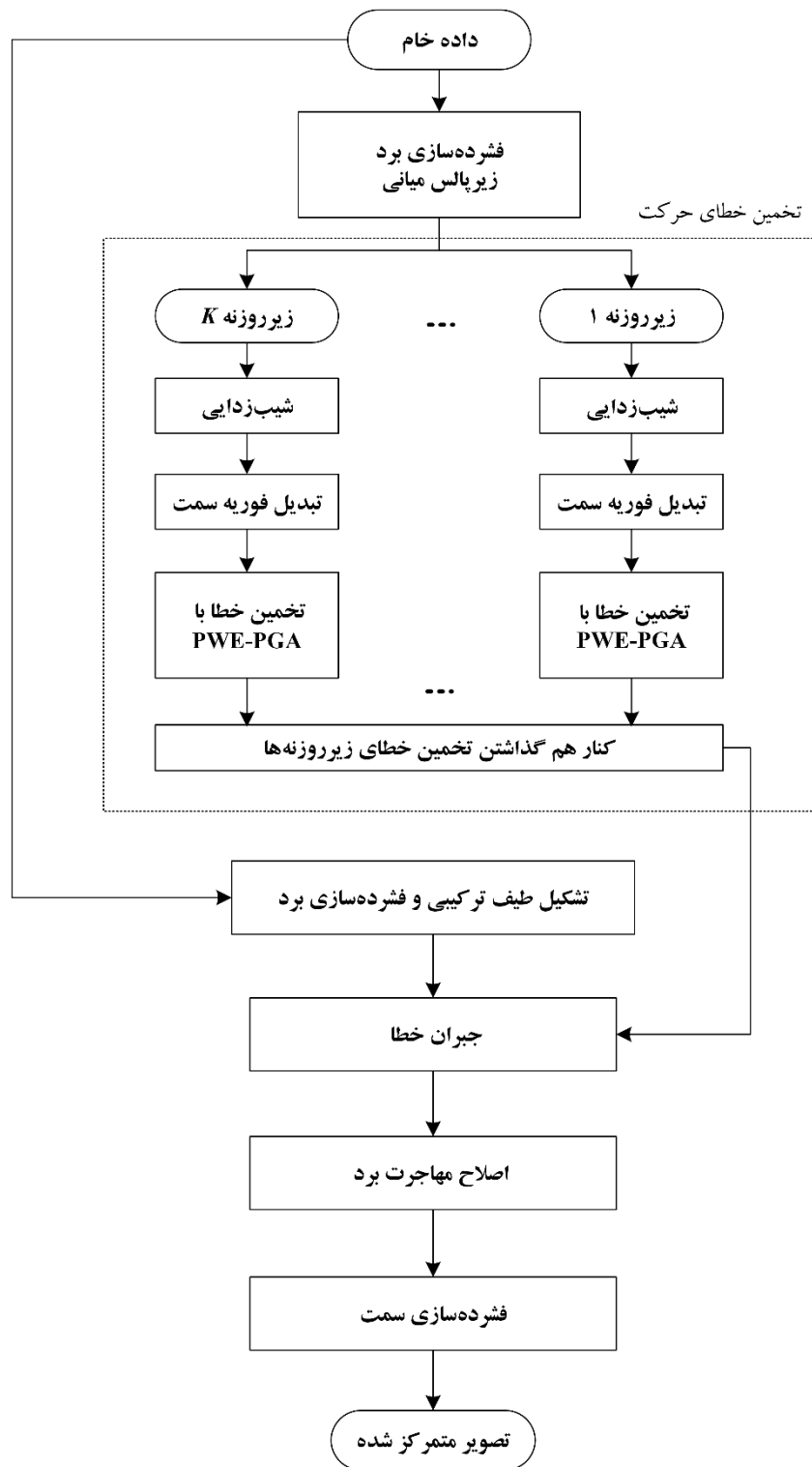
$$\hat{\theta}_q^{(p)} = [\hat{\theta}_{q,1}^{(p)}, \dots, \hat{\theta}_{q,M}^{(p)}]^T, \quad q=0, 1, 2$$

m و n به ترتیب نشان‌دهنده اندیس برد و سمت، N تعداد خطوط برد، M تعداد نمونه‌های سمت و $s^{(p)}(n, m)$ نمونه m ام سیگنال $s^{(p)}(t, \eta)$ در n امین خط برد است. سیگنال فشرده‌شده برد در حوزه تاریخچه فاز (رابطه ۶) برای زیرپالس میانی است. $\theta_n^{(p)}$ و $w_n^{(p)}$ به ترتیب زاویه برخورد و وزن سلول برد n ام است. با انتگرال‌گیری از گرادیان‌های فاز، فازهای تخمینی $\hat{\phi}_y^{(k, p)}$ و $\hat{\phi}_z^{(k, p)}$ به‌دست می‌آید و از (۹) خطای حرکت زیرروزنه k ام محاسبه می‌شود. خطاهای فاز تخمین زده‌شده از زیرروزنه‌ها پس از حذف میانگین، کنار هم گذاشته می‌شوند تا خطای حرکت روزنه (برای زیرپالس میانی) به‌دست آید.

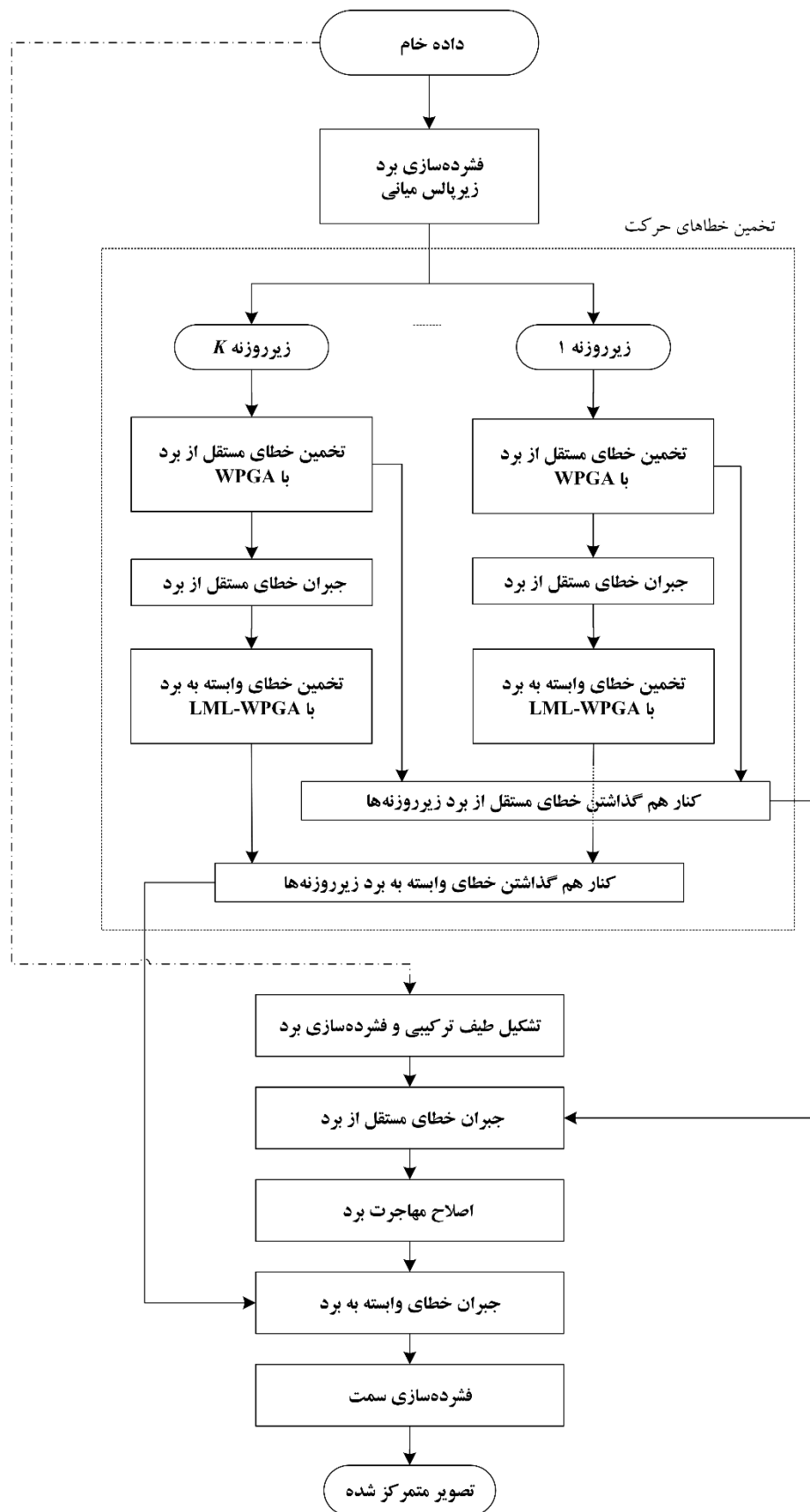
اکنون بازتاب همه زیرپالس‌ها از فیلتر منطبق عبور داده می‌شود و طیف آن‌ها کنار هم نهاده می‌شود تا طیف ترکیبی با پهنای باند وسیع تشکیل شود. با وزن‌دهی طیف توسط پنجره کایزر^{۳۹} می‌توان سطح گلبرگ‌های کناری را کاهش داد. این پنجره دو ویژگی مناسب دارد: الف) از نظر ایجاد پاسخی فشرده با بیش‌ترین انرژی در گلبرگ اصلی به ازای یک ISLR^{۴۰} مشخص، تقریباً بهینه است. ب) یک پارامتر قابل تنظیم، β_{Kaiser} دارد که امکان مصالحه بین تفکیک‌پذیری و سطوح گلبرگ‌های کناری را فراهم می‌کند [۱۳]. پس از وزن‌دهی، تبدیل فوریه معکوس طیف ترکیبی محاسبه می‌شود تا داده فشرده‌شده برد ترکیبی به‌دست آید. با ضرب فازی بردار خطای تخمینی در داده فشرده‌شده برد ترکیبی، خطای حرکت نظیر همه زیرپالس‌ها جبران می‌شود. سپس داده حاصل به حوزه فرکانس منتقل می‌شود و با استفاده از ضرب فازی، اثر مهاجرت سلول برد اصلاح می‌شود [۱۳] و با ضرب سیگنال LFM مرجع سمت در داده و اعمال IFFT، داده در راستای سمت فشرده می‌شود تا تصویر متمرکز شده به‌دست آید.

۴-۲- رویکرد پیشنهادی دوم

شکل ۳، رویکرد پیشنهادی دوم برای خودتمرکزدهی و تشکیل تصویر را نشان می‌دهد. بازتاب زیرپالس میانی پس از انتقال به باند پایه به حوزه فرکانس برده می‌شود. داده حوزه فرکانس از فیلتر منطبق و IFFT عبور داده می‌شود تا پاسخ فشرده‌شده برد زیرپالس میانی به‌دست آید و داده لازم برای تخمین خطای حرکت فراهم شود. اکنون



شکل ۲: رویکرد پیشنهادی اول برای خودتمرکزدهی به همراه تشکیل تصویر در SAR مبتنی بر LFM پله‌ای



شکل ۳: رویکرد پیشنهادی دوم برای خودتمرکزدهی به همراه تشکیل تصویر در SAR مبتنی بر LFM پله‌ای

$$PSLR = 20 \log_{10} (\max(h_{side})/h_{main}) \quad (15)$$

هر چه PSLR کم تر باشد، آشکارسازی اهداف نقطه‌ای آسان تر است. PSLR قابل قبول برای تصاویر SAR حدود ۲۰ dB است که این مقدار می‌تواند با وزن دهی (پنجره گذاری) مناسب به دست آید [۸].
 ❖ نسبت توان کل گلبرگ‌های کناری به توان گلبرگ اصلی (ISLR)، بر حسب دسی بل برای هدف نقطه‌ای

$$ISLR = 10 \log_{10} ((P_{total} - P_{main})/P_{main}) \quad (16)$$

هر چه ISLR کم تر باشد، توان در گلبرگ اصلی متمرکزتر است و تصویر هدف نقطه‌ای وضوح بیشتری دارد. یک مقدار نوعی ISLR با در نظر گرفتن انرژی نول^۳ تا نول گلبرگ اصلی، ۱۷ dB است [۸].

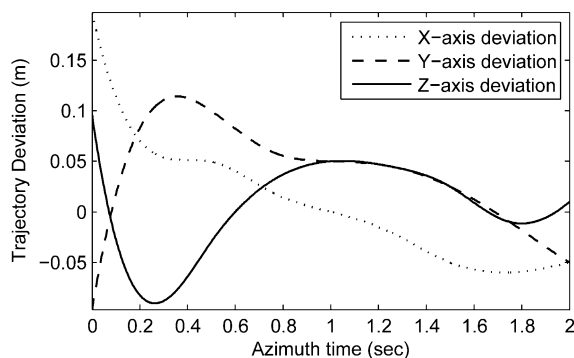
❖ میانگین مربع خطای تخمین فاز

$$MSE_n = \frac{1}{KM} \sum_{m=1}^{KM} |\varphi_{n,m} - \hat{\varphi}_{n,m}|^2 \quad (17)$$

K تعداد زیرروزنه، M تعداد نمونه‌های سمت زیرروزنه و $\varphi_{n,m}$ و $\hat{\varphi}_{n,m}$ به ترتیب، خطای حرکت و تخمین خطا در خط برد n ام برای نمونه سمت m ام است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	نشان	مقدار
فرکانس حامل	f_c	۹/۶ GHz
پهنای باند زیرپالس	β	۱۰ MHz
تعداد زیرپالس‌ها	P	۵
گام فرکانس	Δf	۹ MHz
عرض پالس	τ	۲۰ usec
فرکانس تکرار پالس	PRF	۴۰۰ Hz
سرعت سکو	v	۶۰ m/sec
ارتفاع سکو	H	۲/۵ km
طول آنتن در سمت	L_a	۱ m
تفکیک پذیری برد	ρ_r	۳/۲ cm
تفکیک پذیری سمت	ρ_a	۵۰ cm
عرض نوار تصویر	L_{sw}	۲ km
بازه برد زمینی	R_g	۱۱/۲-۱۳/۲ km
تعداد خطوط برد	N	۲۵۰۰
تعداد نمونه سمت زیرروزنه	M	۴۰۰



شکل ۴: خطای حرکت چندجمله‌ای مرتبه ده [۱۰]

$$\mathbf{A}_{block} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta \bar{r}_1 & (\Delta \bar{r}_1)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta \bar{r}_B & (\Delta \bar{r}_B)^2 \end{bmatrix}_{B \times 3}$$

$$\mathbf{W}^{(p)} = \text{diag} \left\{ \left[w_1^{(p)}, \dots, w_B^{(p)} \right] \right\}$$

$$\hat{\mathbf{Q}}^{(p)} = \left[\hat{\varphi}^{(1,p)}, \dots, \hat{\varphi}^{(B,p)} \right]^T$$

پس از محاسبه ماتریس $\hat{\mathbf{Q}}^{(p)}$ ، با انتگرال گیری از بردارهای $\hat{\mathbf{Q}}^{(p)}$ ضرایب مدل خطی (۱۱) به ازای سمت‌های مختلف به دست می‌آید و خطای وابسته به برد با ضرب فازی روی داده زیرپالس میانی جبران می‌شود. تخمین و جبران خطا چند بار مشابه روش PGA [۵] تکرار می‌شود تا چندجمله‌ای خطای باقی‌مانده به دقت تخمین زده شود. خطاهای مستقل از برد و وابسته به برد زیرروزنه‌ها به طور جداگانه به هم متصل می‌شوند تا خطاهای مستقل از برد و وابسته به برد روزنه (نظیر زیرپالس میانی)، به دست آید.

هنگامی که خطا تخمین زده شد، بازتاب زیرپالس‌های LFM پله‌ای از فیلتر منطبق عبور داده می‌شود و طیف آن‌ها کنار هم نهاده می‌شود تا طیف ترکیبی تشکیل شود. این طیف با پنجره کایزر وزن دهی شده و تبدیل فوریه معکوس طیف ترکیبی محاسبه می‌شود تا داده فشرده شده برد ترکیبی به دست آید. خطای مستقل از برد روی داده فشرده شده برد جبران می‌شود و خطای وابسته به برد پس از انتقال داده به حوزه فرکانس و اصلاح مهاجرت برد، جبران می‌گردد. پس از آن با ضرب سیگنال LFM مرجع سمت در داده و تبدیل فوریه معکوس (IFFT)، فشرده سازی سمت انجام شده و تصویر نهایی تشکیل می‌شود.

۵- شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی رویکردهای پیشنهادی خودتمرکزدهی و تشکیل تصویر برای سامانه UAV SAR با LFM پله‌ای ارائه می‌شود.

۵-۱- فرض‌ها و معیارها

جدول ۱ پارامترهای شبیه‌سازی را فهرست کرده است. در تولید داده خام و شبیه‌سازی تصاویر، روش معرفی شده در [۱۴] برای LFM پله‌ای تعمیم داده شده است. هم‌زمان با تولید داده، خطای حرکت به آن اضافه می‌شود. در شبیه‌سازی دو نوع خطای حرکت فرض شده است: خطای چندجمله‌ای مرتبه ۱۰ در سه راستا (شکل ۴) مطابق با [۱۰] و خطای سینوسی در راستای ارتفاع با دامنه ۰/۳ متر. برای تخمین خطا، روزنه در راستای سمت به دو زیرروزنه تقسیم می‌شود. در روش LML-WPGA، برای محاسبه خطای باقی‌مانده وابسته به برد، عرض نوار تصویر به ۱۰ بلوک تقسیم شده است. ارزیابی بر اساس معیارهای PSLR، ISLR و MSE انجام می‌شود:

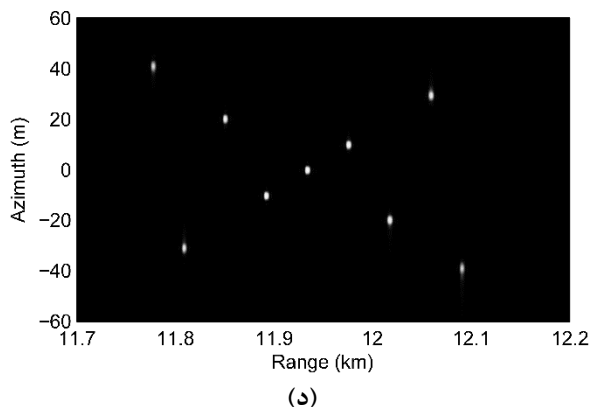
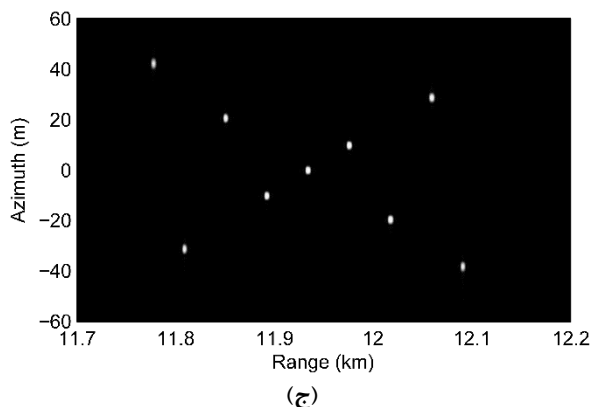
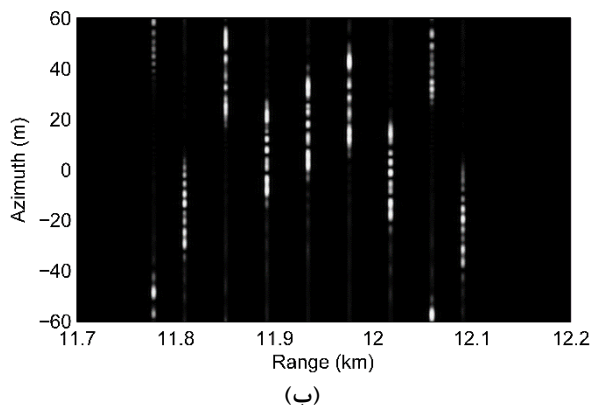
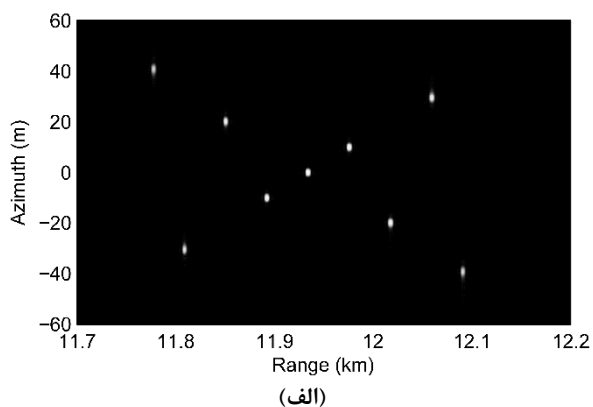
❖ نسبت دامنه بزرگ‌ترین گلبرگ کناری به دامنه گلبرگ اصلی (PSLR)، بر حسب دسی بل برای هدف نقطه‌ای

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی ۱: در این شبیه‌سازی، جبران خطای چندجمله‌ای در سه راستا (شکل ۴) برای تصویر ۹ هدف نقطه‌ای بررسی می‌شود. شکل‌های ۵-الف تا ۵-د به ترتیب تصویر بدون خطای حرکت، تصویر خروجی الگوریتم تشکیل تصویر بدون در نظر گرفتن خطا و تصاویر اهداف پس از جبران خطای حرکت با رویکردهای پیشنهادی (شکل‌های ۲ و ۳) را نمایش می‌دهد. شکل‌های ۵-ج و ۵-د کارایی این رویکردها را برای LFM پله‌ای تأیید می‌نماید. همچنین خطاهای اصلی و تخمین زده‌شده با رویکردهای پیشنهادی برای هدف میانی (خط برد ۱۲۵۱) در شکل ۶ مقایسه شده است. هر دو رویکرد، خطای حرکت را به خوبی تخمین زده‌اند و دقت تخمین آن‌ها برای هدف میانی، بسیار نزدیک هم است.

MSE تخمین خطای همه اهداف در شکل ۷ مقایسه شده است. رویکرد مبتنی بر PWE-PGA بهترین تخمین را برای اهداف وسط عرض نوار به دست آورده است اما با دور شدن از مرکز، MSE آن افزایش می‌یابد. رویکرد مبتنی بر LML-WPGA در همه خطوط برد، مقادیر قابل قبولی برای MSE نشان می‌دهد و مقدار MSE تخمین خطا با این روش، به برد چندان وابسته نیست. پاسخ‌های سمت و برد هدف میانی پس از جبران حرکت با رویکرد پیشنهادی اول در شکل ۸ رسم شده است. در اینجا پنجره کایزر با $\beta_{Kaiser} = 2/5$ برای کاهش سطح گلبرگ‌های کناری به کار رفته است. PSLR و ISLR در پاسخ برد به ترتیب برابر با $-19/1$ dB و $-24/2$ dB و در پاسخ سمت به ترتیب برابر با $-23/2$ dB و $-25/2$ dB است. رویکرد پیشنهادی دوم نیز پاسخ‌های برد و سمت مشابه شکل (۸) به دست می‌دهد. در این حالت، PSLR و ISLR در پاسخ برد به ترتیب برابر با $-19/0$ dB و -24 dB و در پاسخ سمت به ترتیب برابر با $-22/5$ dB و -25 dB است. این مقادیر برای تصاویر نوعی SAR قابل قبول هستند و تمرکز مناسب پاسخ‌های برد و سمت را در خروجی هر دو رویکرد نشان می‌دهند [۸].

شبیه‌سازی ۲: در این شبیه‌سازی جبران خطای حرکت سینوسی روی اهداف نقطه‌ای "شکل SAR" بررسی می‌شود. شکل ۹-الف تصویر بدون خطای حرکت را نشان می‌دهد و در شکل ۹-ب اثر خطای حرکت دیده می‌شود. این شکل، خروجی الگوریتم تشکیل تصویر بدون جبران خطای حرکت است. شکل‌های ۹-ج و ۹-د به ترتیب تصاویر تشکیل شده توأم با جبران خطا توسط رویکردهای پیشنهادی شکل ۲ و شکل ۳ را نشان می‌دهد. در شکل ۹-ج دیده می‌شود که رویکرد مبتنی بر PWE-PGA خطای حرکت را به خوبی جبران کرده است.



شکل ۵: تصویر ۹ هدف نقطه‌ای، الف- بدون خطا، ب- با خطای چندجمله‌ای، ج- جبران خطا با رویکرد پیشنهادی اول، د- جبران خطا با رویکرد پیشنهادی دوم

شکل ۹-د نشان می‌دهد که تصویر خروجی رویکرد مبتنی بر LML-WPGA تا حد زیادی به تصویر بدون خطا نزدیک است. البته دقت آن برای برخی نقاط تصویر، کم‌تر از دقت رویکرد مبتنی بر PWE-PGA بوده و سایه‌هایی در شکل ایجاد کرده است.

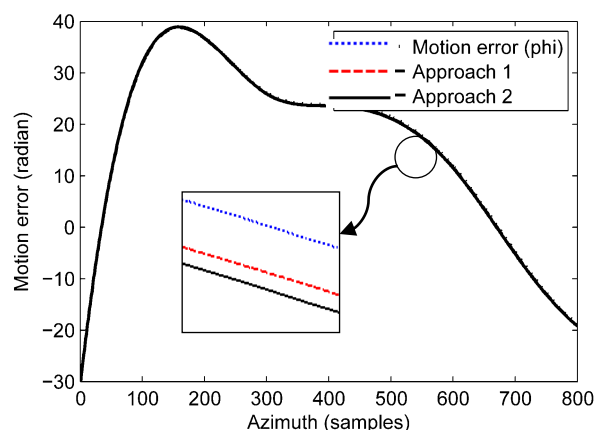
در شکل ۱۰ خطاهای اصلی و تخمین زده شده با رویکردهای پیشنهادی برای هدف میانی (خط برد ۱۲۵۱) رسم شده است. هر دو رویکرد، خطای حرکت سینوسی را به خوبی دنبال می‌کنند. شکل ۱۱، MSE تخمین خطای همه اهداف را مقایسه کرده است. این شکل به طور کلی مشابه شکل ۷ است. یعنی MSE تخمین خطا با رویکرد اول به برد وابسته بوده و با دور شدن از برد میانی، افزایش می‌یابد اما MSE تخمین رویکرد دوم تقریباً در همه بردها یکسان است. البته در این شبیه‌سازی، MSE رویکرد دوم برای اهداف نزدیک برد میانی، بیش‌تر از MSE رویکرد اول است.

۶- نتیجه‌گیری

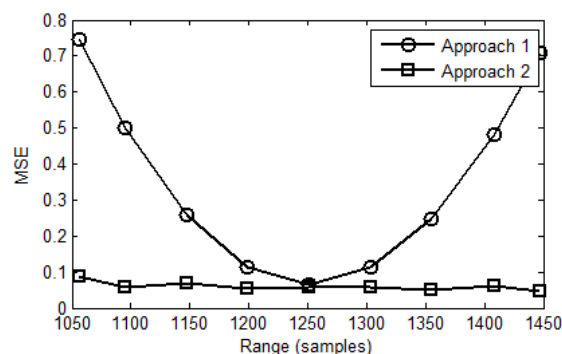
دو رویکرد جبران خطای حرکت به همراه تشکیل تصویر برای SAR مبتنی بر LFM پله‌ای پیشنهاد گردید. LFM پله‌ای برای افزایش تفکیک‌پذیری برد به کاررفته است. در رویکردهای پیشنهادی، خودتمرکزدهی با تعمیم روش‌های PWE-PGA و LML-WPGA برای سیگنال LFM پله‌ای و با استفاده از داده دریافتی مربوط به زیرپالس میانی انجام می‌شود. استفاده از داده یک زیرپالس به جای همه زیرپالس‌ها در تخمین خطا، پیچیدگی محاسباتی خودتمرکزدهی در سامانه مبتنی بر LFM پله‌ای را به طور قابل توجه کاهش می‌دهد. هر دو رویکرد پیشنهادی، وابستگی خطا به برد را در نظر می‌گیرند و بنابراین برای تصویربرداری پهپاد در ارتفاع پایین یا هنگام پهن بودن نوار صحنه، به کار می‌آیند. در رویکرد اول، خطاهای عمود بر راستای حرکت در نظر گرفته شده است و برای هر خط برد، خطای حرکت به کمک هسته‌ای وزن‌دار تخمین زده می‌شود. برای UAV SAR، انحراف در راستای حرکت نیز می‌تواند خطاهای جدی به وجود آورد. رویکرد دوم که مبتنی بر LML-WPGA است، علاوه بر خطاهای عمود بر مسیر حرکت، خطای راستای حرکت را نیز در نظر می‌گیرد و برای هر بلوک برد، خطا را تخمین می‌زند. نتایج شبیه‌سازی، کارایی قابل قبول رویکردهای پیشنهادی را بر اساس معیارهای کمی MSE، ISLR و PSLR و تصاویر اهداف نقطه‌ای نشان می‌دهد.

مراجع

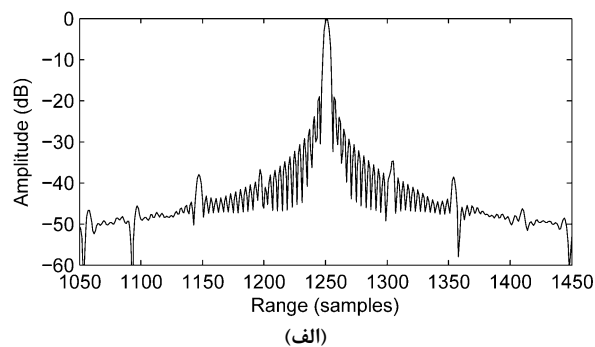
- [1] J. H. G. Ender and A. R. Brenner, "PAMIR – a wideband phased array SAR/MTI system," *IEE Proc. Radar Sonar Navigat.*, vol. 150, no.3, pp.165-172, 2003.
- [2] W. G. Carrara, R. S. Goodman and R. M. Majewski, *Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithms*, Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [3] P. Berens, "SAR with ultra-high resolution using synthetic bandwidth," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Sympo. (IGARSS)*, Germany, 28 June–2 July 1999, pp. 1752-1754.



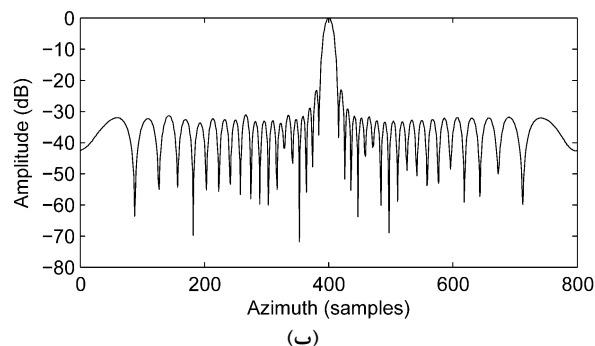
شکل ۶: مقایسه خطای اصلی و تخمینی برای هدف میانی، خط برد ۱۲۵۱، (شبیه‌سازی ۱)



شکل ۷: مقایسه MSE تخمین خطا با رویکردهای پیشنهادی برای ۹ هدف نقطه‌ای (شبیه‌سازی ۱)

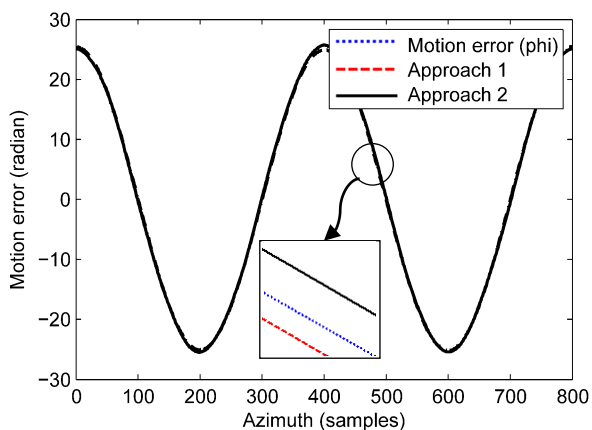


(الف)



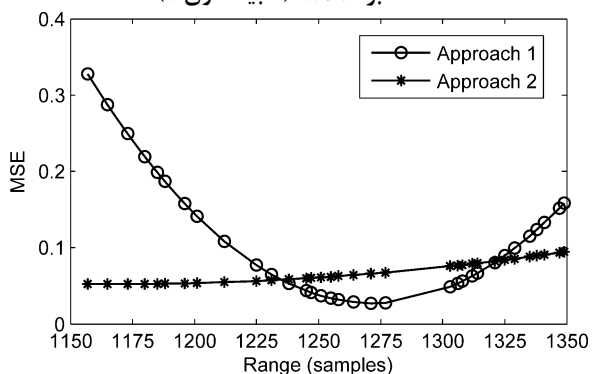
(ب)

شکل ۸: خروجی با رویکرد پیشنهادی اول برای هدف میانی (شبیه‌سازی ۱): الف - پاسخ برد (PSLR=-۱۹/۱ dB , ISLR=-۲۴/۲ dB) ، ب - پاسخ سمت (PSLR=-۲۳/۲ dB , ISLR=-۲۵/۲ dB)



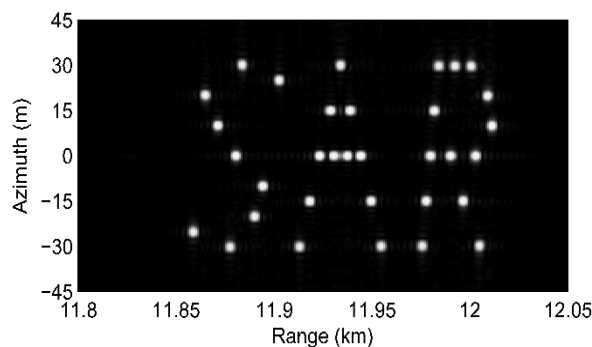
شکل ۱۰: مقایسه خطای اصلی و تخمینی برای هدف میانی،

خط برد ۱۲۵۱، (شبیه‌سازی ۲)

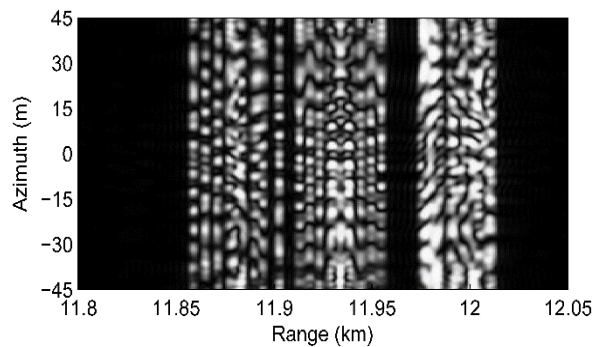


شکل ۱۱: مقایسه MSE تخمین خطا با رویکردهای پیشنهادی

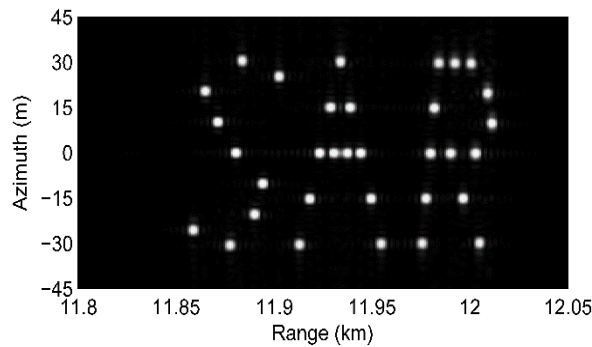
برای تصویر "SAR" شکل (شبیه‌سازی ۲)



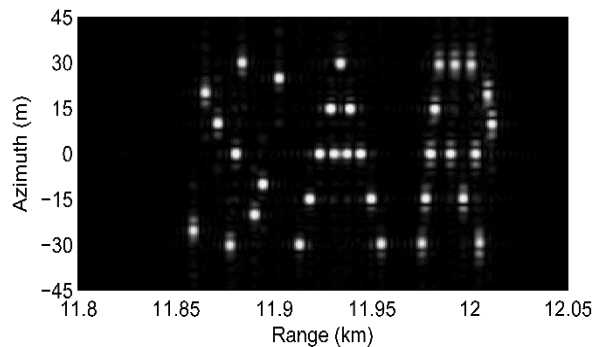
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹: تصویر "SAR" شکل (شبیه‌سازی ۲)، الف - بدون خطا، ب - با خطای حرکت سینوسی، ج - پس از جبران خطا با رویکرد پیشنهادی اول، د - پس از جبران خطا با رویکرد پیشنهادی دوم

[4] H. Schimpf, A. Wahlen and H. Essen, "High range resolution by means of synthetic bandwidth generated by frequency-stepped chirps," *Electron. Letters*, vol. 39, no. 18, pp. 1346-1348, Sep. 2003.

[5] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus - A robust tool for high resolution phase correction," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, July 1994.

[6] D. E. Wahl, C. V. Jakowatz, P. A. Thompson and D. C. Ghiglia, "New approach to strip-map SAR autofocus," in *Proc. 6th IEEE Digit. Signal Process. Workshop*, Yosemite National Park, CA, Oct. 1994, pp. 53-56.

[7] P. T. Gough, M. P. Hayes and D. R. Griffiths, "Strip-map path correction using phase matching autofocus," in *Proc. 5th ECUA*, Lyon, France, July 2000, pp. 412-418.

[8] D. G. Thompson, J. S. Bates, D. V. Arnold and D. G. Long, "Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude stripmap mode SAR," in *Proc. IEEE Radar Conf*, 1999, pp. 36-40.

[9] Y. H. Lu, Y. S. Teo, N. L. Tan and C. B. Zhang, "A Stripmap to spotlight data converting algorithm," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Sympo. (IGARSS)*, Seattle WA, USA, July. 1998, pp. 1168-1170.

[10] L. Zhang, Z. Qiao, M. Xing, L. Yang and Z. Bao, "A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 8, pp. 3202-3218, Aug. 2012.

[11] B. Fan, Z. Ding, W. Gao and T. Long, "An improved motion compensation method for high resolution UAV

- [14] L. M. William and A. S. James, Principles of Modern Radar, *SciTech Publishing*, vol. II: Advanced Techniques, 2013.
- [15] W. Ye, T. S. Yeo and Z. Bao, "Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 37, no. 5, pp. 2487–2494, Sep. 1999.
- [16] M. Schlutz, Synthetic aperture radar imaging simulated in MATLAB, M.Sc. Thesis, California Polytechnic State University, 2009.
- SAR imaging," *Science China Inf. Sciences*, vol. 57, no. 12, pp. 1-13, Dec. 2014.
- [12] M. Xing, X. Jiang, R. Wu, F. Zhou and Z. Bao, "Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 8, pp. 2870–2883, Aug. 2009
- [13] I. G. Cumming and F. H. Wong, Digital signal processing of synthetic aperture radar data: algorithm and implementation, Norwood, MA: Artech House, 2005.

زیر نویس ها

- ¹ Synthetic Aperture Radar
- ² Concurrent Subbands
- ³ Deramp-On-Receive
- ⁴ Synthetic Bandwidth
- ⁵ Swath
- ⁶ Stepped Linear Frequency Modulation
- ⁷ Motion Compensation
- ⁸ Autofocus
- ⁹ Phase Gradient Autofocus
- ¹⁰ Spotlight
- ¹¹ Stripmap
- ¹² Phase Curvature Autofocus
- ¹³ Phase Matching Autofocus
- ¹⁴ Phase-Weighted-Estimation-PGA
- ¹⁵ Local Maximum-Likelihood- Weighted PGA
- ¹⁶ Range Cell Migration
- ¹⁷ Nonsystematic RCM
- ¹⁸ Range Walk Correction
- ¹⁹ پرنده هدایت پذیر از دور
- ²⁰ Unmanned Air Vehicle SAR
- ²¹ Cross-Track
- ²² Antenna Phase Center
- ²³ Squint Angle
- ²⁴ Incident Angle
- ²⁵ Deramping
- ²⁶ Phase History Domain
- ²⁷ Fast Fourier Transform
- ²⁸ Inverse Fast Fourier Transform
- ²⁹ Kaiser
- ³⁰ Integrated SideLobe Ratio
- ³¹ Synthetic range
- ³² Peak SideLobe Ratio
- ³³ Mean Square Error
- ³⁴ Null