

الگوریتمی برای جبران‌سازی حرکت در رادار روزنه مصنوعی (SAR) بر پایه الگوریتم تصویرسازی زیردهانه بی‌درنگ (RTS)

سید روح‌الله ثمره هاشمی*

استادیار گروه پژوهشی فیبر نوری، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
(دریافت: ۹۸/۰۲/۰۲؛ پذیرش: ۹۸/۰۶/۲۴)

چکیده

در این مقاله الگوریتمی برای تخمین و اصلاح خطای فاز ناشی از حرکت غیر آرمانی سکوی حامل رادار در رادار روزنه مصنوعی بر مبنای الگوریتم زیردهانه بی‌درنگ (RTS) در شیوه کارکرد نواری ارائه گردیده است. در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا سیگنال وارد الگوریتم پردازشی RTS شده و با استخراج زمان قله سیگنال در کانال‌های پردازشی مربوط به زیردهانه‌های مختلف، گرادیان فاز در آن زمان‌ها به دست می‌آید. با تلفیق گرادیان فاز مربوط به اهداف واقع در مکان‌های سمت مختلف به روش پیشنهاد شده و سپس انتگرال‌گیری، خطای فاز در کل زمان سمت به دست آمده و از سیگنال ورودی حذف می‌گردد. ویژگی اصلی الگوریتم پیشنهادی سادگی محاسبات و پردازش موازی است و قادر است خطاهای فاز فرکانس پایین و متوسط را با دقت قابل قبولی تخمین زده و اصلاح نماید. شبیه‌سازی‌های انجام شده کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد

واژگان کلیدی

آنتروپی، تجزیه به مقادیر ویژه، تمرکز خودکار، رادار دهانه مصنوعی معکوس

۱. مقدمه

یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم زیردهانه بی‌درنگ^۵ (RTS) است که کارایی آن اثبات شده و در سامانه‌های عملیاتی به کار گرفته شده است [۹-۸]. این الگوریتم با تقسیم داده به چند زیردهانه و انجام پردازش مربوط به هر زیردهانه در کانالی جداگانه و در نهایت ترکیب همدوس^۶ تصویر حاصل از هر زیردهانه‌ها، به تصویر نهایی دست می‌یابد. در [۱۰] حجم محاسباتی الگوریتم RTS با سایر الگوریتم‌های تصویرسازی مرسوم مقایسه شده است. به طور خلاصه حجم محاسباتی الگوریتم RTS قابل مقایسه با حجم محاسباتی الگوریتم برد-داپلر^۷ (RDA) - که از تبدیل فوریه سریع^۸ (FFT) استفاده کرده و حاصل ضرب زمان در پهنای باند^۹ (TBP) در آن بالاتر از ۱۰۰ است - می‌باشد. در صورتی که مقدار TBP کمتر از ۱۰۰ باشد حجم محاسباتی الگوریتم RTS کمتر از الگوریتم RDA خواهد بود.

رادار روزنه مصنوعی^۱ (SAR) سامانه‌ای است که قادر است با استفاده از امواج الکترومغناطیس تصویری دوبعدی از سطح زمین بدون نیاز به چشمه نور و در شرایط آب و هوایی مختلف تهیه کند. ویژگی اصلی این سامانه حرکت سکوی^۲ رادار و تشکیل روزنه مصنوعی جهت دستیابی به حد تفکیک لازم در جهت حرکت (سمت^۳) است. الگوریتم‌های مختلفی برای تشکیل تصویر با استفاده از داده دریافتی از صحنه مورد نظر ارائه گردیده‌اند [۴-۱]. با توجه به تقاضای روزافزون برای دستیابی به سامانه‌های SAR با قدرت تفکیک بالا و نیز تصویرسازی از صحنه‌های وسیع، حجم داده مورد پردازش در الگوریتم‌های تصویرسازی بسیار افزایش یافته است، لذا پژوهش‌هایی برای ارائه الگوریتم‌های تصویرسازی «بی‌درنگ^۴» با استفاده از پردازش موازی انجام شده است [۷-۵].

*ایمانامه نویسنده مسئول: s.r.hashemi@gmail.com

^۵ Real-Time Subaperture Algorithm

^۶ Coherent

^۷ Range-Doppler Algorithm

^۸ Fast Fourier Transform

^۹ Time-Bandwidth Product

^۱ Synthetic Aperture Radar

^۲ Platform

^۳ Azimuth

^۴ Real-time

انجام می‌گیرد. از تصویر محوشده، پارامترهای لازم در پردازش‌های بعدی استخراج می‌شود. سپس در پنجره‌های زمانی که طول آن با استفاده از تصویر محوشده به دست می‌آید. در تمام زیردهانه‌ها زمان قله به دست آمده و با استفاده از آن طبق الگوریتم اولیه گرادیان فاز ناشی از آن هدف به دست می‌آید. با استخراج گرادیان فاز ناشی از اهداف مختلف و تلفیق آنها به کمک بخش‌های داری همپوشانی، گرادیان فاز در کل زمان استخراج می‌گردد. سپس از گرادیان فاز انتگرال گرفته شده و خطای فاز حاصل در سیگنال ورودی جبران می‌گردد. سپس الگوریتم تصویرسازی مورد نظر داده را به تصویر نهایی تبدیل می‌نماید. با کاربرد این الگوریتم، با حفظ قابلیت بی‌درنگ بودن سامانه و حداکثر افزایش یک تأخیر اولیه جهت محاسبه خطای فاز مربوط به یک روزنه مصنوعی، کارایی الگوریتم RTS افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

این مقاله در پنج بخش تنظیم شده است. پس از مقدمه، در بخش دوم الگوریتم تصویرسازی RTS به اختصار توضیح داده خواهد شد. در بخش سوم الگوریتم‌های خودمیزانی اولیه و تعمیم‌یافته بیان می‌گردند. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه شده و در نهایت در بخش پنجم به جمع‌بندی نتایج پرداخته می‌شود.

۲. الگوریتم RTS

این الگوریتم بر جمع هم‌دوس تصاویر نادقیق^۸ حاصل از چندین زیردهانه استوار است. مطابق روابط [۷] اگر سیگنال مدوله فرکانس و فیلتر منطبق^۹ متنظر در زیردهانه \ln ام به ترتیب به صورت $s(t)$ و $h_{o_n}(t)$ در نظر گرفته شوند، آنگاه تابع پاسخ ضربه^{۱۰} (IRF) حاصل از کانولوشن^{۱۱} زمانی در هر زیردهانه و جمع هم‌دوس تصاویر زیردهانه‌ها به صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$|f_o(t)| = \left| \sum_{n=-N1}^{N1} h_{o_n}(t) \otimes s_n(t) \right| \quad (1)$$

که \otimes نماد کانولوشن است. تعداد زیردهانه‌ها برابر با $2N_1 + 1$ ، طول انتگرال‌گیری هر کدام T_1 و نرخ چیرپ^{۱۲} ۱۲ سیگنال $s(t)$ برابر با $\frac{b}{\pi}$ است. سیگنال‌های $s_n(t)$ و $h_{o_n}(t)$ مربوط به زیردهانه \ln ام به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

در الگوریتم RTS، پردازش موازی سیگنال مربوط به هر زیردهانه باعث افزایش سرعت پردازش و نیز امکان اعمال پردازش خودمیزانی^۱ در الگوریتم خواهد شد [۷]. توضیح اینکه اگر سکوی حامل رادار حین حرکت در اثر عواملی مانند اغتشاشات جوی از مسیر مستقیم و با سرعت ثابت منحرف شود، تصویر نهایی محوشده^۲ خواهد بود. برای رفع محوشدگی تصویر، لازم است با استفاده از داده سامانه ناوبری^۳ و نیز با استفاده از خود سیگنال دریافتی، خطای فاز ناشی از انحراف حرکتی سکو اصلاح شود [۱۱]. الگوریتم RTS با توجه به پردازش جداگانه داده مربوط به زیردهانه‌های سمت، پتانسیلی ذاتی جهت مقایسه تصویر حاصل از هر زیردهانه و تخمین خطای فاز با استفاده از آن دارد. از طرف دیگر در شیوه تصویربرداری نواری^۴، خطای فاز مربوط به اهداف واقع در مکان‌های سمت مختلف، متفاوت است. این الگوریتم با افزودن قابلیت خودمیزانی، امکان تخمین و اصلاح پیوسته خطای فاز حین دریافت سیگنال و تصویرسازی بی‌درنگ را دارد، در صورتی که امکان استفاده مستقیم الگوریتم‌های خودمیزانی معروفی مثل الگوریتم گرادیان فاز^۵ (PGA) در شیوه نواری وجود ندارد [۱۳-۱۲] و تا کنون پژوهش‌های متعددی برای اعمال خودمیزانی در شیوه نواری انجام شده که عمده آن‌ها بر پردازش زیردهانه استوار هستند [۱۸-۱۴].

در این مقاله روشی برای تخمین و اصلاح خطای فاز ناشی از خطای حرکتی سکو بر پایه الگوریتم RTS در شیوه تصویربرداری نواری ارائه گردیده است. برای ارائه این روش در ابتدا الگوریتمی برای استخراج فاز ناشی از خطای حرکت با استفاده از یک هدف نقطه‌ای ارائه گردیده است. در این الگوریتم، گرادیان فاز^۶ سیگنال در لحظات گسسته‌ای از زمان (به تعداد زیردهانه‌ها) با استفاده از سیگنال مورد پردازش در الگوریتم RTS تخمین زده شده و با استفاده از آن، فاز سیگنال در آن لحظات با انتگرال‌گیری در زمان به دست می‌آید. در نهایت با کسر فاز سیگنال مربوط به حرکت آرمانی^۷ سکو و نیز حذف بخش درجه ۱ و درون‌یابی می‌توان به خطای فاز دست یافته و آن را اصلاح نمود. پس از اصلاح خطا، الگوریتم RTS پایه (یا هر الگوریتم تصویرسازی دیگری)، داده را به تصویر بدون محوشدگی تبدیل می‌نماید. در ادامه الگوریتم خودمیزانی اولیه به حالت تصویربرداری نواری تعمیم داده شده است. در الگوریتم تعمیم‌یافته، ابتدا تصویرسازی به روش RTS

¹ Autofocus

² Blurred

³ Navigation System

⁴ Stripmap

⁵ Phase Gradient Autofocus

⁶ Phase Gradient

⁷ Ideal

⁸ Coarse

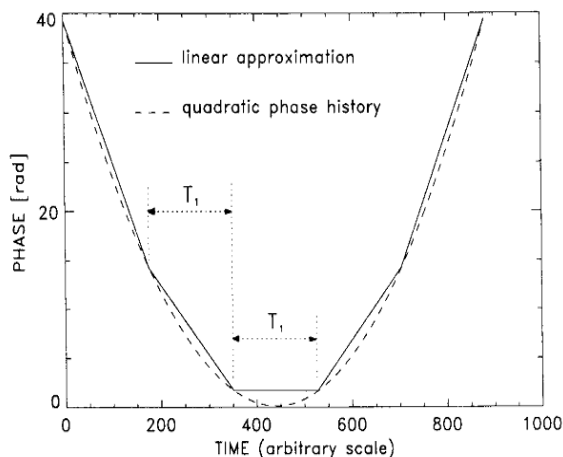
⁹ Matched Filter

¹⁰ Impulse Response Function

¹¹ Convolution

¹² Chirp Rate

که $N_{1ovl} = N_1 / (1 - ovl)$ و $n' = n(1 - ovl)$ در شکل (۲) نحوه پیاده سازی این الگوریتم نشان داده شده است. توابع $g_n(t)$ و $h_n(t)$ مورد استفاده در این الگوریتم به صورت روابط (۷) و (۸) می باشند:



شکل (۱): تقسیم دهانه کامل به چند زیردهانه در الگوریتم RTS [۷]

$$g_n(t) = \exp[-j2n'T_1 b(t - t_0)] \quad (7)$$

$$h_n(t) = \exp[jn'b(2T_1(t - t_0) - n'T_1^2)] \quad (8)$$

در این الگوریتم از دوبار انتگرال گیری برای محقق شدن تابع پنجره ۲ مثلثی استفاده شده است:

$$|f(t)| = \left| \sum_{n=-N_{1ovl}}^{N_{1ovl}} \{h_n(t)[s(t)g_n(t) \otimes \text{rect}\left[\frac{t - t_0 - n'T_1}{T_1}\right] \otimes \text{rect}\left[\frac{t}{T_1}\right]\} \right| \quad (9)$$

در ضمن برای این که بیشینه خطای فاز در هر زیردهانه برابر با ϕ_{max} شود، طول زیردهانه و تعداد زیردهانه ها به صورت زیر تعیین می گردد [۷]:

$$T_1 = 2 \sqrt{\frac{\phi_{max}}{b}} \quad (10)$$

$$2N_{1ovl} + 1 = \text{fix}\left[\frac{\pi B}{2(1-ovl)\sqrt{b\phi_{max}}}\right] \quad (11)$$

$$\begin{cases} s_n(t) = s(t) & (n - \frac{1}{2})T_1 \leq t \leq (n + \frac{1}{2})T_1 \\ s_n(t) = 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} h_{on}(t) = h(t) & (n - \frac{1}{2})T_1 \leq t \leq (n + \frac{1}{2})T_1 \\ h_{on}(t) = 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3)$$

که $h(t)$ همان نسخه معکوس در زمان و مزدوج مختلط $s(t)$ است. از روابط (۱) تا (۳) می توان نتیجه گرفت [۷]:

$$|f_o(t)| = T_1 \left| \sum_{n=-N_1}^{N_1} \frac{\exp[j2nbT_1(t - t_0)]}{\text{sinc}[bT_1(t - t_0)]} \right| \quad (4)$$

که $\text{sinc}(x)$ تابع $\frac{\sin(x)}{x}$ است و t_0 زمان قله ۱ تابع IRF است. با جمع همدوس تصاویر نادقیق زیردهانه ها به وسیله تابع فاز $\exp[j2nbT_1(t - t_0)]$ می توان به تصویر نهایی دست یافت:

$$|f_o(t)| = \sqrt{BT} |\text{sinc}[bT(t - t_0)]| \quad (5)$$

که B پهنای باند سیگنال سمت و T زمان دهانه کامل است $(T = (2N_1 + 1)T_1)$. همان طور که از رابطه (۵) مشخص است، حد تفکیک حاصل پس از جمع همدوس تصاویر زیردهانه برابر با حد تفکیک حاصل از روش فیلتر منطبق خواهد بود.

در پیاده سازی الگوریتم RTS، فاز درجه ۲ سیگنال در هر زیردهانه با فاز خطی تقریب زده شده است و نشان داده شده در صورتی که طول زیردهانه ها به اندازه کافی کوتاه باشد، خطای فاز حاصل از این تقریب باعث تخریب زیاد تابع IRF نخواهد شد. در شکل (۱) نحوه تقسیم دهانه کامل به چند زیردهانه و تقریب خطی فاز در هر زیردهانه نشان داده شده است. در [۷] نشان داده شده در صورتی که طول هر زیردهانه طوری در نظر گرفته شود که خطای فاز حاصل از تقریب فاز درجه ۲ به فاز خطی کمتر از 28.8° و میزان همپوشانی زیردهانه ها دست کم 21% باشد آنگاه مقدار PSLR و ISLR در تابع IRF به ترتیب برابر با 34dB و 14.4dB خواهد بود. با در نظر گرفتن یک تقریب خطی از فاز در هر زیر دهانه و همپوشانی در زیردهانه ها به میزان ovl ، تابع حاصل از الگوریتم RTS به صورت رابطه ذیل خواهد بود [۷]:

$$|f(t)| = \left| \sum_{n=-N_{1ovl}}^{N_{1ovl}} w(n) \times \exp[jb(2n'T_1(t - t_0) - n'^2T_1^2)] \times \int_{t'_1}^{t'_2} \int_{t''_1}^{t''_2} s(\tau) \cdot \exp[-j2n'T_1 b(\tau - t_0)] dt d\tau' \right| \quad (6)$$

² Window Function

¹ Peak

۳. خودمیزانی

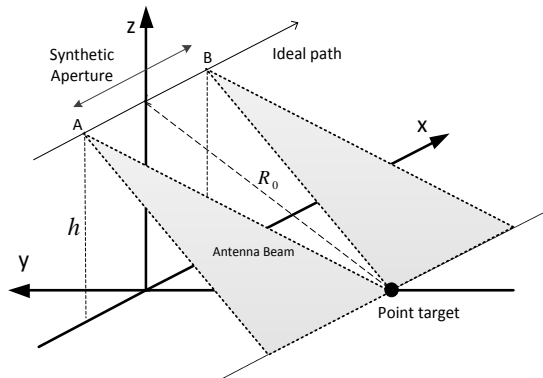
$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ برابر با $T_1(1 - ovl)$ بوده و ثانیاً مقدار γ_i و γ_{i+1} به ترتیب برابر با $2ibT_1(1 - ovl)$ و $2(i + 1)bT_1(1 - ovl)$ خواهد بود $(-N_{1ovl} \leq i \leq N_{1ovl})$.

حال اگر رادار مسیری غیرآرمانی (دارای انحراف از مسیر آرمانی) را طی کند، فاز سیگنال دریافتی علاوه بر مؤلفه درجه ۲، دارای مؤلفه‌های درجات بالاتر نیز خواهد بود، لذا مقدار Δt_i متفاوت از $T_1(1 - ovl)$ می‌گردد. با محاسبه t_i و Δt_i و معلوم بودن گرادیان فاز در زمان قله (γ_i) ، می‌توان تخمینی از فاز در لحظات t_i را به دست آورد:

$$\varphi_i = \sum_{k=-N_{1ovl}}^i \gamma_k \Delta t_k \quad (12)$$

اگر سکو مسیر آرمانی را تجربه کند، فاز فوق برابر با bt_i^2 خواهد بود. حال اگر فاز سیگنال ناشی از حرکت در مسیر آرمانی از φ_i کم شود، می‌توان به خطای فاز در لحظات t_i دست یافت:

$$\varphi_{e,i} = \varphi_i - bt_i^2 \quad (13)$$



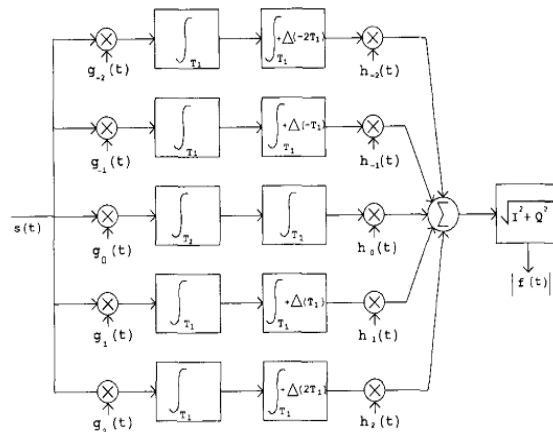
شکل (۳): هندسه سامانه SAR

از آنجا که بخش خطی خطای فاز تأثیری در محو شدن تصویر نداشته و تنها باعث جابجایی در محل آن می‌شود، لذا در مرحله بعد، بخش خطی خطای فاز حذف می‌گردد. با توجه به اینکه خطای فاز در لحظات t_i در اختیار است، می‌توان با درون‌یابی، مقدار آن را در تمام لحظات به دست آورده و سپس آن را از سیگنال ورودی حذف نمود. پس از حذف خطا، تصویرسازی به همان روش RTS (یا الگوریتمی دیگر) انجام می‌گیرد. شکل (۴) الگوریتم روش پیشنهادی برای دست‌یابی به خطای فاز و تصویرسازی را نشان می‌دهد.

۱-۳. بیان ایده برای تک‌هدف

در شکل (۳) هندسه یک SAR نواری با فرض یک هدف نقطه‌ای^۱ نشان داده شده است. وقتی رادار در نقطه A قرار دارد، هدف وارد پرتو^۲ شده و وقتی رادار به نقطه B می‌رسد هدف از پرتو خارج می‌گردد. در این فاصله، در صورت حرکت هدف با سرعت ثابت و در مسیر آرمانی، سیگنال باندپایه دریافتی به دلیل تغییر مسافت بین رادار و هدف، با تقریب خوبی دارای مدولاسیون فرکانس خطی (فاز درجه ۲) خواهد بود. در این حالت مطابق شکل (۱) می‌توان با تقریب فاز خطی در هر زیردهانه و با ضرب تابع $g_n(t)$ در هر زیردهانه و انتگرال‌گیری به تصویری نادقیق از هدف دست یافت.

در واقع با توجه به شکل (۲) و نیز رابطه (۹) مشخص است که در این الگوریتم تابع با فاز خطی $g_n(t)$ در سیگنال ورودی ضرب شده و در ناحیه‌ای از زمان که شیب فاز سیگنال ورودی و شیب فاز تابع $g_n(t)$ مطابقت داشته باشد، پس از انتگرال‌گیری، یک قله در آن زیردهانه تشکیل می‌گردد. بنابراین، در هر زیردهانه (هر کانال پردازشی در شکل (۲)) پس از انتگرال‌گیری و قبل از شیفت^۳، در هر زمانی که یک قله داشته باشیم، شیب تابع فاز برابر با شیب تابع $g_n(t)$ مربوط به آن زیردهانه بوده است.



شکل (۲): الگوریتم زیردهانه بی‌درنگ (RTS) [۷]

مطابق رابطه (۷) در صورتی که سکو مسیر آرمانی را طی کند، اگر محل قله در دو زیردهانه متوالی t_i و t_{i+1} و مقدار گرادیان فاز در این لحظات γ_i و γ_{i+1} نامیده شود، اولاً مقدار

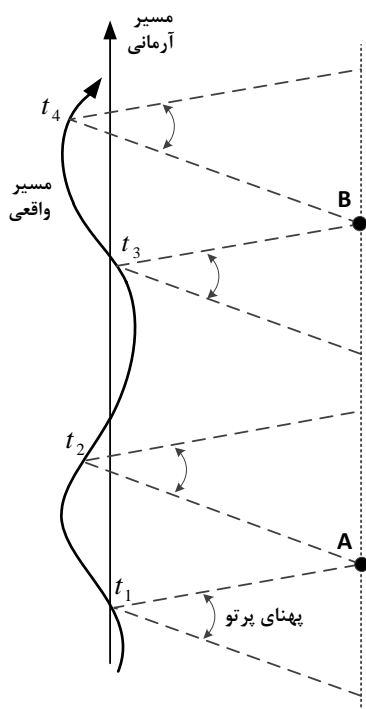
¹ Point Target
² Beam
³ Shift

۲-۳. خودمیزانی در شیوه نواری

در تصویربرداری به شیوه نواری، سابقه فاز هر هدف تنها مربوط به بخشی از زمان پرواز است، لذا اهداف واقع در زمانه‌ای سمت متفاوت، خطای فاز متفاوتی را تجربه می‌کنند. به‌عنوان مثال در شکل (۵)، سابقه فاز هدف A مربوط به حرکت سکو از لحظه t_1 تا t_2 است، در حالی که سابقه فاز هدف B مربوط به حرکت سکو از لحظه t_3 تا لحظه t_4 است، بنابراین با استفاده از سابقه فاز اهداف A و B می‌توان تخمینی از فاز به ترتیب در بازه $[t_1, t_2]$ و $[t_3, t_4]$ به دست آورد. از آنجا که در الگوریتم پیشنهادی، مقدار گرادیان فاز در زمان روزنه مصنوعی مربوط به هر هدف برجسته تخمین زده می‌شود، لذا برای دست یافتن به خطای فاز کلی، باید گرادیان فاز تخمینی حاصل از اهداف واقع در مکان‌های سمت مختلف با هم ترکیب شده و سپس با انتگرال‌گیری از آن به خطای فاز در کل زمان سمت دست یافت.

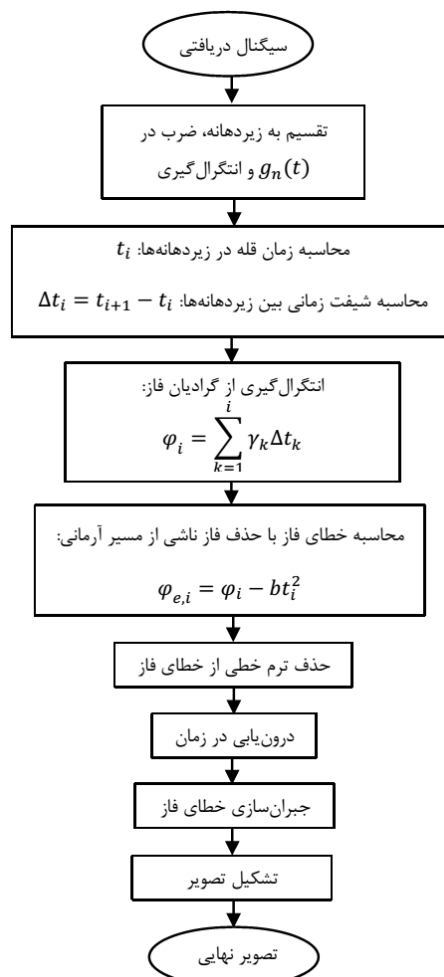
هنگام تلفیق گرادیان فاز حاصل از اهداف مختلف، برای حفظ پیوستگی باید یک مقدار ثابت به آن‌ها اضافه شود. با استفاده از اهدافی که سابقه فاز آنها دارای همپوشانی است (اهدافی که فاصله آنها در سمت کمتر از یک روزنه مصنوعی است) می‌توان این مقدار ثابت را محاسبه نمود [۱۸]. الگوریتم پیشنهادی برای تخمین و اصلاح خطای فاز در شیوه نواری در شکل (۶) نشان داده شده است. مراحل الگوریتم پیشنهادی به شرح زیر است:

(۱) مطابق الگوریتم پیش‌گفته در شکل (۴)، پس از ورود داده به زیردهانه‌ها، ضرب در توابع $g_n(t)$ ، انتگرال و شیفت، در هر زیرهانه یک تصویر نادقیق از صحنه تشکیل می‌گردد که در صورت وجود خطای فاز این تصاویر نسبت به هم دارای شیفت خواهند بود.



شکل (۵): مسیر حرکت واقعی و آرمانی سکو. تخمین فاز در بازه‌های زمانی $[t_1, t_2]$ و $[t_3, t_4]$ به ترتیب با استفاده از سابقه فاز هدف A و B صورت می‌گیرد.

هدف ما در این الگوریتم محاسبه مقدار این شیفت و تخمین خطای فاز با استفاده از آن است. در ضمن با انجام جمع همدوس سیگنال زیردهانه‌های مختلف، تصویر دقیق (که دارای محوشدگی است) تشکیل می‌گردد. از این تصویر برای مشخص کردن اهداف برجسته و نیز طول پنجره مربوط به آنها و نیز تلفیق خطای فاز اهداف مختلف در مراحل بعدی استفاده می‌شود.



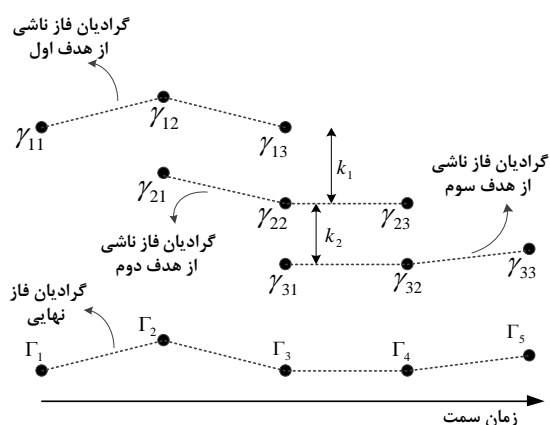
شکل (۴): الگوریتم پایه پیشنهادی برای تخمین خطای فاز

(۵) با محاسبه گرادیان خطای فاز با استفاده از اهداف برجسته واقع در زمانه‌ای سمت دیگر و تلفیق آنها تخمین گرادیان خطای فاز در کل زمان سمت صورت می‌گیرد. باید توجه نمود گرادیان فاز ناشی از اهدافی که فاصله آنها در سمت کمتر از طول یک روزنه مصنوعی است، داری همپوشانی هستند. در ضمن گرادیان فاز ناشی از این دو هدف ممکن است در یک مقدار ثابت اختلاف داشته باشند. بنابراین در مرحله تلفیق گرادیان فاز ناشی از اهداف مختلف، ابتدا باید این مقدار ثابت با استفاده از بخش‌های داری همپوشانی تخمین زده شده و سپس گرادیان‌های فاز ناشی از اهداف مختلف که با اضافه کردن مقدار ثابت تخمینی، هم‌تراز شده‌اند، تلفیق شوند. هنگام تلفیق، بین بخش‌های داری همپوشانی با توجه به وزن مربوطه میانگین گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال مطابق شکل (۷) در صورتی نمونه‌های زمانی گرادیان فاز ناشی از سه هدف برجسته - که فاصله آنها کمتر از طول یک روزنه مصنوعی است - γ_{ij} نامیده شود به‌طوری که i نشان‌دهنده شماره هدف و j اندیس زمانی باشد، در ابتدا مقادیر ثابت k_1 و k_2 به‌صورت زیر با میانگین‌گیری از اختلاف نمونه‌های داری همپوشانی تخمین زده می‌شود:

$$k_1 = \frac{1}{2}[(\gamma_{12} - \gamma_{21}) + (\gamma_{13} - \gamma_{22})] \quad (14)$$

$$k_2 = \frac{1}{2}[(\gamma_{22} - \gamma_{31}) + (\gamma_{23} - \gamma_{32})]$$

سپس با جمع مقادیر k_1 و k_2 ، گرادیان‌های فاز هم‌تراز می‌شوند:

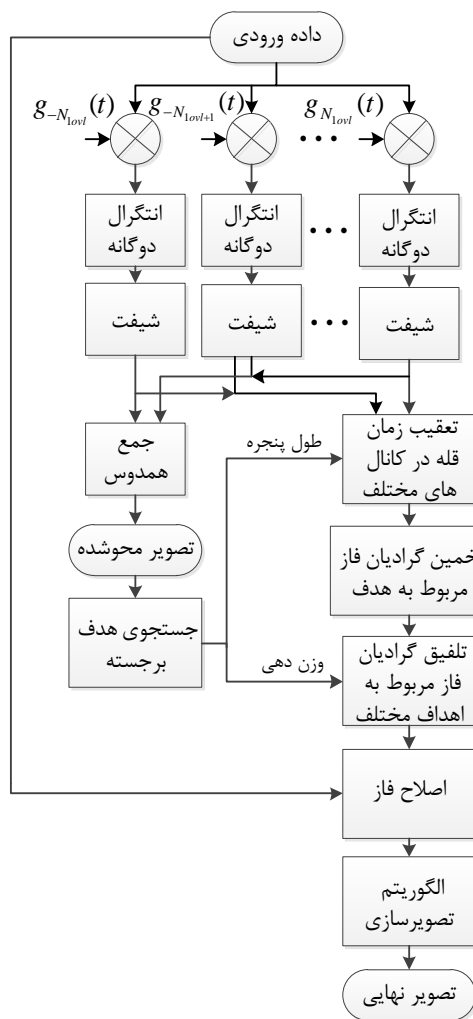


شکل (۷): گرادیان فاز ناهم‌تراز ناشی از سه هدف واقع در مکان‌های سمت مختلف

$$\begin{aligned} \gamma'_{1i} &= \gamma_{1i}, (i = 1,2,3) \\ \gamma'_{2i} &= \gamma_{2i} + k_1, (i = 1,2,3) \\ \gamma'_{3i} &= \gamma_{3i} + k_1 + k_2, (i = 1,2,3) \end{aligned} \quad (15)$$

(۲) با استفاده از خروجی بلوک جمع همدوس (تصویر محوشده)، یک هدف برجسته جستجو می‌شود. فرایند جستجوی هدف برجسته می‌تواند در شکل ساده آن هدفی باشد که اندازه آن از یک حد آستانه بزرگ‌تر است. با تعیین هدف برجسته و بسته به میزان کشیدگی آن در سمت، طول پنجره مورد نظر برای آن هدف به‌دست می‌آید.

(۳) پنجره زمانی مرحله قبل به همه کانال‌های پردازشی زیردهانه‌های مختلف اعمال شده و در آن پنجره، زمان قله محاسبه می‌گردد.



شکل (۶): الگوریتم پیشنهادی برای تخمین و اصلاح خطای فاز در شیوه تصویربرداری نواری

(۴) مطابق توضیحات الگوریتم شکل (۴)، با یافتن زمان قله در کانال‌های مختلف، گرادیان خطای فاز مربوط به آن هدف در آن زمان‌ها به‌دست می‌آید. سپس گرادیان فاز در زمان سمت مربوط به آن هدف درون‌یابی می‌شود.

که γ'_{ij} ها مقادیر گرادیان فاز هم تراز شده هستند. حال با تلفیق گرادیان های فاز هم تراز شده، می توان مقدار گرادیان فاز در کل زمان سمت را به دست آورد. هنگام تلفیق، نمونه های داری هم پوشانی با توجه به وزن اختصاص یافته میانگین گیری می شوند. این وزن می تواند دامنه تصویر محوشده هدف مربوطه پس از مرحله جمع همدوس باشد. وزن دهی باعث می شود اهداف قوی تر، سهم بیشتری در تعیین گرادیان فاز نهایی داشته باشند. مثلاً اگر نمونه های گرادیان فاز نهایی را Γ_i و وزن مربوط به سه هدف را c_1, c_2, c_3 بنامیم، آنگاه با توجه به شکل (۷):

که γ'_{ij} ها مقادیر گرادیان فاز هم تراز شده هستند. حال با تلفیق گرادیان های فاز هم تراز شده، می توان مقدار گرادیان فاز در کل زمان سمت را به دست آورد. هنگام تلفیق، نمونه های داری هم پوشانی با توجه به وزن اختصاص یافته میانگین گیری می شوند. این وزن می تواند دامنه تصویر محوشده هدف مربوطه پس از مرحله جمع همدوس باشد. وزن دهی باعث می شود اهداف قوی تر، سهم بیشتری در تعیین گرادیان فاز نهایی داشته باشند. مثلاً اگر نمونه های گرادیان فاز نهایی را Γ_i و وزن مربوط به سه هدف را c_1, c_2, c_3 بنامیم، آنگاه با توجه به شکل (۷):

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \gamma'_{11} \\ \Gamma_2 &= \frac{c_1 \gamma'_{12} + c_2 \gamma'_{21}}{c_1 + c_2} \\ \Gamma_3 &= \frac{c_1 \gamma'_{13} + c_2 \gamma'_{22} + c_3 \gamma'_{31}}{c_1 + c_2 + c_3} \\ \Gamma_4 &= \frac{c_2 \gamma'_{23} + c_3 \gamma'_{32}}{c_2 + c_3} \\ \Gamma_5 &= \gamma'_{33} \end{aligned} \quad (16)$$

در نهایت با انتگرال گیری از گرادیان فاز سراسری می توان به خطای فاز دست یافت.

در مرحله بعد خطای فاز از سیگنال ورودی حذف می شود. لازم به ذکر است که برای حذف این خطا کافی است سیگنال ورودی به اندازه طول زمانی یک روزنه مصنوعی تأخیر داده شود تا در این فاصله، تخمینی از خطای فاز به دست آید. پس از آن می توان با جبران سازی خطای فاز در سیگنال ورودی، تصویرسازی با استفاده از یکی از الگوریتم های تصویرسازی (از جمله RTS) را به انجام رساند.

از نظر حجم محاسبات، الگوریتم پیشنهادی در شکل (۶) شامل یک مرحله تشکیل تصویر اولیه به وسیله الگوریتم RTS، یک مرحله تخمین و اصلاح خطای فاز و یک مرحله تشکیل تصویر نهایی است. همان طور که گفته شد، حجم محاسبات مربوط به الگوریتم RTS کمتر یا مساوی حجم محاسبات الگوریتم RDA است [۷]. در بخش تخمین و اصلاح خطای فاز، بخش اصلی بخش درون یابی است که باید مقدار خطای فاز در تمامی نقاط زمان سمت با استفاده از نقاطی که در آنها خطای فاز به دست آمده است، درون یابی شود. اگر تعداد زیردهانه ها (کانال های پردازشی) برابر با M و تعداد نمونه های سیگنال سمت در یک روزنه مصنوعی برابر با N در نظر گرفته شود، آنگاه می توان گفت که در بخش اول الگوریتم و پس از انتگرال گیری در کانال های پردازشی مختلف مقدار خطای فاز در M نقطه از N نقطه زمان سمت مشخص می گردد و برای تخمین مقدار فاز در

$$2MK \log_2 K \geq 2N \log_2 K \quad (17)$$

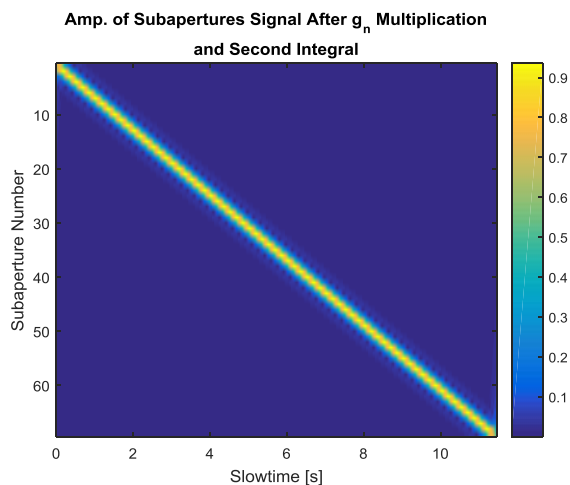
حال با مقایسه کل عملیات ضرب و جمع لازم برای درون یابی در الگوریتم پیشنهادی یعنی $(N - M)(2P - 1)$ با تعداد عملیات جمع و ضرب محاسبه FFT در PGA زیردهانه ای که حداقل برابر با $2N \log_2 K$ است، می توان نتیجه گرفت در صورتی که P (تعداد نقاط مورد استفاده در درون یابی) بیشتر از $\log_2 K$ نباشد، حجم محاسبات الگوریتم پیشنهادی بیشتر از الگوریتم های مرسوم دیگر به روش زیردهانه ای نیست. به عنوان نمونه اگر تعداد نمونه ها در روزنه مصنوعی $N = 4096$ ، تعداد نمونه ها در هر زیردهانه $K = 64$ و میزان هم پوشانی بین زیردهانه ها ۲۵ درصد فرض شود، تعداد زیردهانه ها $M = 85$ به دست خواهد آمد. در صورتی که در الگوریتم روش پیشنهادی از یک درون یاب ۸ نقطه ای استفاده شود (که برای خطای فاز درجات پایین مناسب است) آنگاه تعداد عملیات جمع و ضرب لازم در درون یابی ۶۰۱۶۵ خواهد بود. از طرفی تعداد عملیات ضرب و جمع لازم در محاسبه FFT در کل زیردهانه ها در PGA زیردهانه ای برابر با ۶۵۲۸۰ خواهد شد.

۴. شبیه سازی

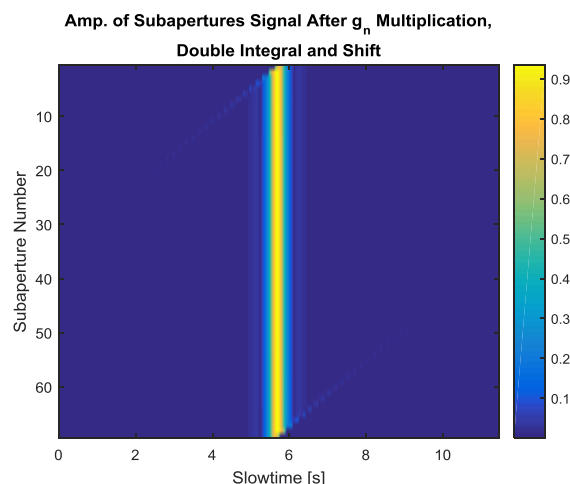
۴-۱. الگوریتم پایه برای تک هدف

۴-۱-۱. الگوریتم RTS بدون خطای حرکت

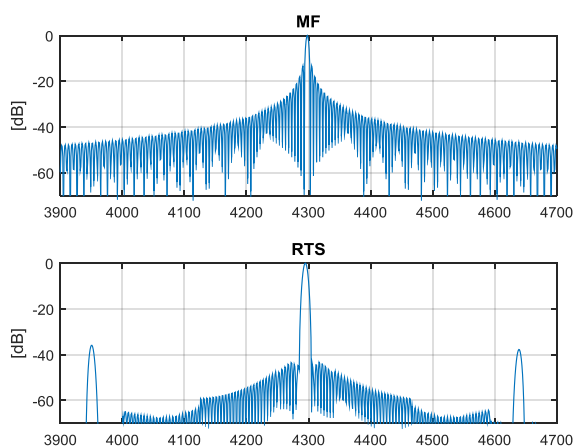
در ابتدا یک سناریو برای شبیه سازی الگوریتم اولیه شکل (۴) در نظر گرفته می شود. مشخصات سامانه SAR مورد شبیه سازی در



شکل (۸): اندازه سیگنال دریافتی پس از تقسیم به زیردهانه، ضرب در تابع $g_n(t)$ و انتگرال دوگانه در حالت حرکت آرمانی سکو



شکل (۹): اندازه سیگنال دریافتی پس از تقسیم به زیردهانه، ضرب در تابع $g_n(t)$ ، انتگرال دوگانه و شیفت در حالت حرکت آرمانی سکو



شکل (۱۰): تصویر حاصل از الگوریتم فیلتر منطبق (بالا) و الگوریتم RTS (پایین) در حالت حرکت آرمانی سکو

جدول (۱) آورده شده است. مطابق شکل (۳) یک هدف نقطه‌ای در $x = \frac{L_s}{2}$ در نظر گرفته شده و سیگنال سمت در زمانی که سکو بین نقاط $x = L_s$ و $x = 0$ قرار دارد، شبیه‌سازی می‌گردد. سپس مطابق الگوریتم پیشنهادی در شکل (۴)، جبران‌سازی خطای فاز و تصویرسازی به‌وسیله الگوریتم RTS صورت می‌گیرد.

در ابتدا یک سناریو بدون خطای حرکتی شبیه‌سازی شده است. با توجه به پارامترهای جدول (۱)، طول روزنه مصنوعی برابر با $572/85$ m و زمان آن برابر با $11/46$ s خواهد بود. مقدار ϕ_{emax} برابر با $26/82^\circ$ و میزان همپوشانی بین زیردهانه‌ها برابر با ۲۲٪ در نظر گرفته شده است.

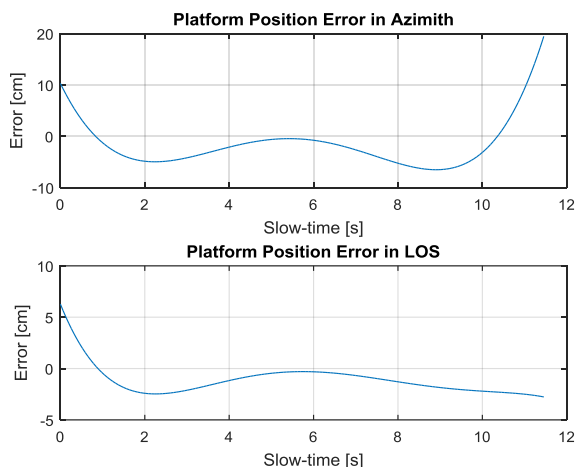
بر این اساس مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) طول هر زیردهانه برابر با $213/4$ m/s و تعداد زیردهانه‌ها ۶۹ به‌دست آمده است. اندازه سیگنال دریافتی پس از تقسیم به زیردهانه، ضرب در تابع $g_n(t)$ و انتگرال دوگانه در شکل (۸) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان شیفت زمانی بین قله سیگنال در زیردهانه‌های مختلف در حالتی که خطای حرکتی وجود ندارد برابر با مقدار ثابتی است. در شکل (۹) اندازه سیگنال در زیردهانه‌های مختلف پس از شیفت و تطبیق زمانی قله‌ها نشان داده شده است. پس از جمع هم‌دوس سیگنال مربوط به زیردهانه‌ها، تصویر هدف نقطه‌ای به‌دست می‌آید.

جدول (۱): مشخصات سامانه

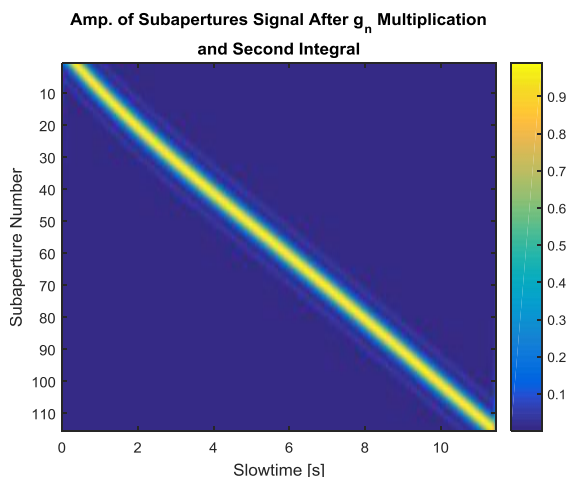
مقدار	مشخصه
۳ cm	طول موج
$2/58^\circ$	پهنای پرتو در سمت
۵۰ m/s	سرعت سکو
۳۳ km	ارتفاع سکو
45°	زاویه نشیب*
$572/8$ m	طول روزنه مصنوعی
۳۳ cm	حد تفکیک در سمت

در شکل (۱۰) تصویر حاصل از الگوریتم RTS و نیز تصویر حاصل از الگوریتم فیلتر منطبق (MF) رسم شده است. اندازه دو گلبرگ فرعی مشاهده‌شده در شکل (۱۰) در الگوریتم RTS با توجه به تنظیم میزان همپوشانی بین زیردهانه‌ها به اندازه کافی کوچک است و اندکی پهنای بیشتر گلبرگ اصلی در الگوریتم RTS نسبت به الگوریتم MF به دلیل پنجره مثلثی (انتگرال دوگانه) به کار برده شده در این الگوریتم است [۷].

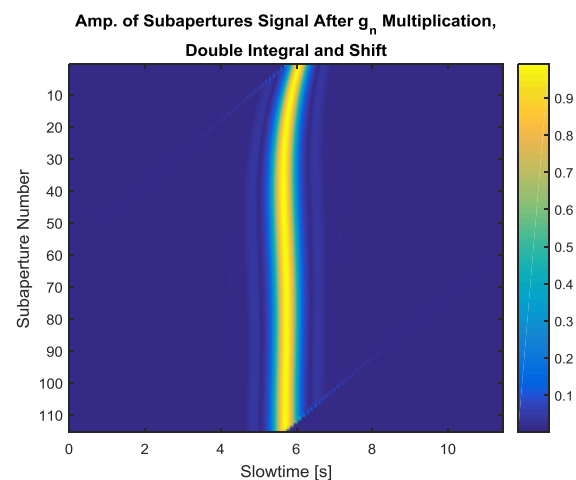
۴-۱-۲. خودمیزانی در الگوریتم پایه



شکل (۱۱): میزان انحراف سکو از مسیر آرمانی بر حسب زمان در جهت حرکت (بالا) و در راستای LOS (پایین)



شکل (۱۲): اندازه سیگنال دریافتی پس از تقسیم به زیردهانه، ضرب در تابع $g_n(t)$ و انتگرال دوگانه در حالت حرکت غیرآرمانی سکو



شکل (۱۳): اندازه سیگنال دریافتی پس از تقسیم به زیردهانه، ضرب در تابع $g_n(t)$ ، انتگرال دوگانه و شیفت در حالت حرکت غیرآرمانی سکو

در ادامه یک سناریوی دارای خطای حرکتی شبیه‌سازی شده است. از آنجا که خطاهای مؤثر در محو شدن تصویر، جابجایی در راستای دید^۱ (LOS) و خطای سرعت (جابجایی در جهت حرکت) است، این دو خطای حرکتی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل وجود خطای فاز در اینجا می‌توان مقدار Φ_{emax} و طول زیردهانه را کمتر و میزان همپوشانی را بیشتر گرفت. در این حالت تعداد زیردهانه و لذا تعداد نقاط محاسبه بیشتر شده و دقت محاسبه بالاتر می‌رود. البته در کم کردن طول زیردهانه محدودیت وجود دارد زیرا کم کردن بیش از حد طول زیردهانه باعث کم شدن دقت تصویر زیردهانه و افزایش خطا در یافتن محل قله در زیردهانه خواهد شد.

در اینجا مقدار Φ_{emax} برابر با $10/48^\circ$ و میزان همپوشانی برابر با ۲۵٪ لحاظ شده است. بر این اساس طول هر زیردهانه برابر با ۱۳۳/۳ ms و تعداد آن‌ها برابر با ۱۱۵ به‌دست آمده است.

در شکل (۱۲) اندازه سیگنال مربوط به زیردهانه‌ها پس از ضرب در $g_n(t)$ و انتگرال دوگانه مشاهده می‌شود. با مقایسه این شکل با شکل (۸) مشخص است که مکان قله سیگنال در زیردهانه‌های مختلف تغییر کرده است. شکل (۱۳) اندازه سیگنال مربوط به زیردهانه‌های مختلف پس از شیفت سیگنال شکل (۱۲) به اندازه ثابت $T_1(1 - ovl)$ را نشان می‌دهد. مشخص است که قله سیگنال در زیردهانه‌های مختلف از نظر زمانی با هم منطبق نیستند و در صورت جمع همدوس پس از ضرب در تابع $h_n(t)$ تصویر هدف نقطه‌ای مانند آنچه در شکل (۱۴) (وسط) نشان داده شده، به‌دست می‌آید.

در صورتی که تخمین خطای فاز مطابق الگوریتم پیشنهادی شکل (۴) صورت گرفته و سپس تصویرسازی (با استفاده از الگوریتم RTS) انجام شود، تصویر هدف نقطه‌ای مانند شکل (۱۴) (پایین) حاصل خواهد شد که نشان از کارایی خوب روش پیشنهادی دارد. در شکل (۱۴) (بالا) نیز تصویر هدف نقطه‌ای حاصل از الگوریتم فیلتر منطبق (MF) جهت مقایسه نشان داده شده است. در شکل (۱۵) خطای فاز واقعی موجود در سیگنال در اثر انحراف حرکتی و نیز خطای فاز تخمینی حاصل از الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. مقایسه این دو نمودار، دقت قابل قبول الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

^۱ Line Of Sight

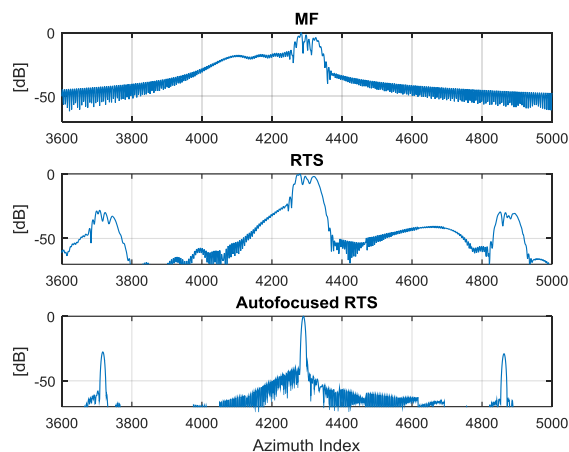
جهت انجام تصحیح مهاجرت برد^۱ (RCMC)، می‌توان با تقسیم مهاجرت برد به بخش خطی (حرکت برد) و درجه دو (انحنای برد^۲) از روش پیشنهادی در [۷] بهره برد. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی فرض بر این است که میزان انحراف سکو از مسیر آرمانی به حدی است که مهاجرت برد غیرسیستمی^۴ (NsRCM) وجود ندارد یا اینکه خطای سامانه ناوبری کمتر از یک سلول حد تفکیک در برد است، لذا می‌توان به استفاده از اطلاعات آن مهاجرت برد غیرسیستمی را اصلاح نمود. در صورتی که این فرض برقرار نباشد، روش ذکر شده در [۷] برای تصحیح مهاجرت برد کافی نبوده و باید از روش‌هایی که از خطای فاز تخمینی برای اصلاح NsRCM استفاده می‌کنند مانند آنچه در [۱۷-۱۹] آمده استفاده نمود.

پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی در جدول (۲) آمده است. در این شبیه‌سازی یک هدف نقطه‌ای در نظر گرفته شده و با توجه به PRF مندرج در جدول، در طول یک روزنه مصنوعی تعداد ۲۰۶۲ پالس دریافت گردیده است. سپس هر یک از این پالس‌ها به وسیله الگوریتم RTS پایه فشرده‌سازی شده است. در فشرده‌سازی برد مقدار ϕ_{max} برابر با $15/6^\circ$ و میزان همپوشانی برابر با ۵۰٪ لحاظ شده است، لذا طول هر زیردهانه برابر با ns ۴۱/۷ و تعداد آن‌ها برابر با ۴۷ به‌دست آمده است. در شکل (۱۶) نمودار نرمال شده سیگنال فشرده‌شده در برد با استفاده از الگوریتم RTS رسم شده است. در این شکل مقدار SNR در سیگنال قبل از فشرده‌سازی در برد برابر با 0 dB فرض شده است. همان‌طور که مشخص است، به دلیل وجود نویز سطح گلبرگ‌های فرعی بالاتر آمده است.

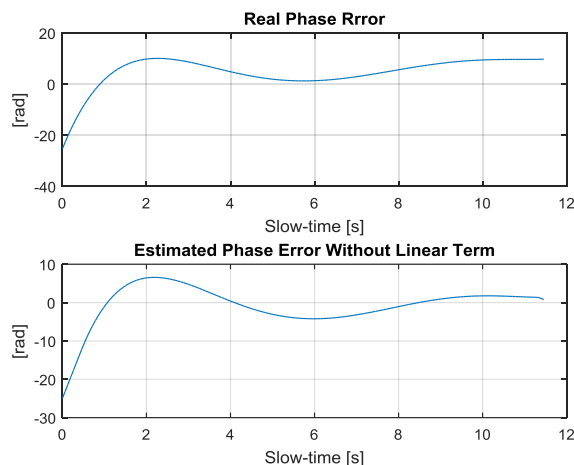
در شکل (۱۷) تصویر پس از فشرده‌سازی در برد و انجام RCMC به روش مندرج در [۷] نشان داده شده است.

جدول (۲): پارامترهای شبیه‌سازی دوبعدی

مقدار	مشخصه
۲۰۰ MHz	پهنای باند
MHz/ μ s	نرخ چیرپ
۱ μ s	عرض پالس
۱۸۰ Hz	فرکانس تکرار پالس
۷۵ cm	حد تفکیک در برد مایل



شکل (۱۴): تصویر هدف نقطه‌ای در حالت حرکت غیرآرمانی با استفاده از الگوریتم MF (بالا)، RTS بدون خودمیزانی (وسط) و روش پیشنهادی (پایین)



شکل (۱۵): خطای فاز واقعی موجود در سیگنال (بالا) و خطای فاز تخمینی به‌وسیله الگوریتم پیشنهادی (پایین)

۳-۱-۴. تعمیم به حالت دوبعدی

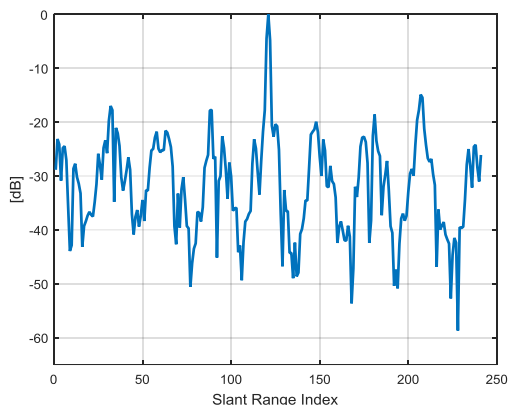
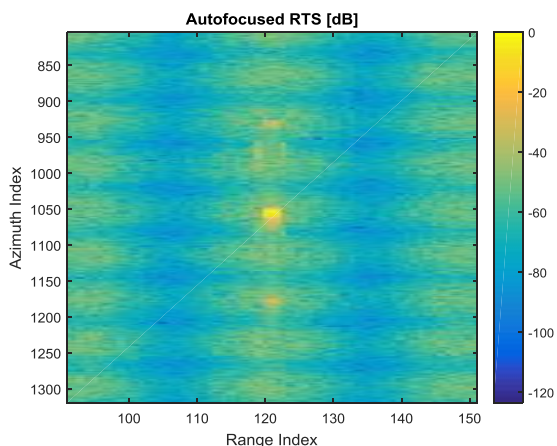
با توجه به اینکه در روند تشکیل تصویر SAR، فشرده‌سازی در هر دو بعد برد و سمت صورت می‌گیرد، می‌توان روش پیشنهادی را به دو بعد تعمیم داد. در این قسمت تعمیم الگوریتم پیشنهادی به دو بعد همراه با بررسی اثر نویز شبیه‌سازی شده است. الگوریتم دوبعدی می‌تواند به‌صورت اجرای الگوریتم RTS در بعد برد و سپس سمت اجرا شود. در فشرده‌سازی برد به‌وسیله الگوریتم RTS، چون خطای فاز وجود ندارد اعمال بخش خودمیزانی لازم نیست، لذا در برد، الگوریتم RTS پایه و در سمت الگوریتم RTS با خودمیزانی به روش پیشنهادی اجرا می‌گردد.

^۱ Range-Cell Migration Correctio

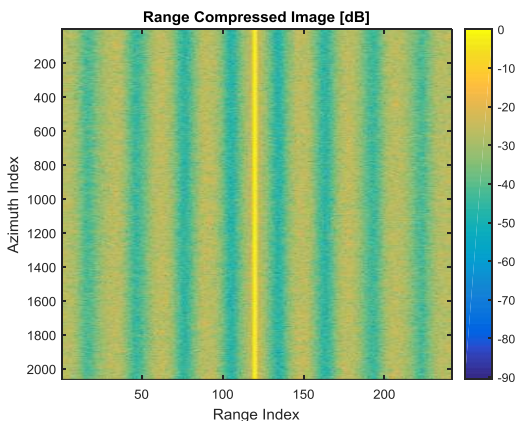
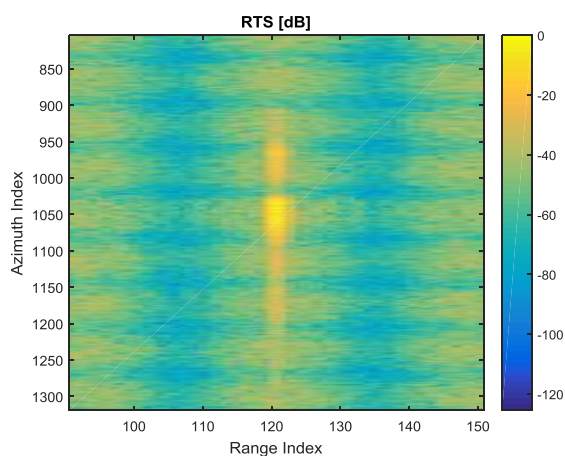
^۲ Range Walk

^۳ Range Curvature

^۴ Non-systematic RCM

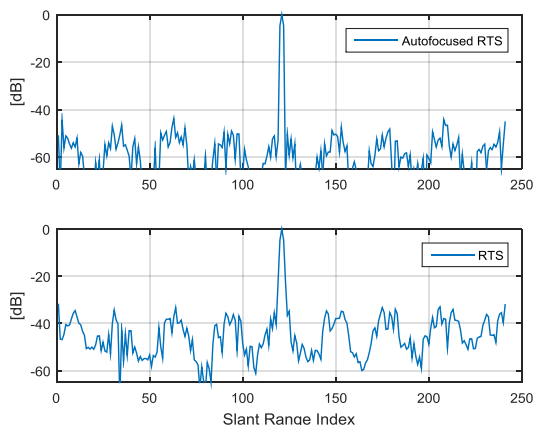


شکل (۱۶): تصویر هدف نقطه‌ای با فرض SNR=0dB پس از فشرده‌سازی در برد به وسیله الگوریتم RTS



شکل (۱۸): تصویر دو بعدی هدف نقطه‌ای با استفاده از الگوریتم RTS

پایه (بالا) و به روش پیشنهادی (پایین)



شکل (۱۷): تصویر هدف نقطه‌ای پس از فشرده‌سازی در برد و تصحیح مهاجرت برد

شکل (۱۹): نیمرخ برد تصویر دوبعدی پس از فشرده‌سازی در سمت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (بالا) و الگوریتم RTS (پایین)

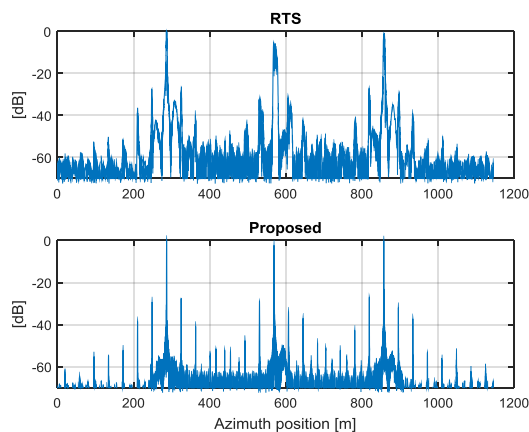
در شکل (۲۰) نیمرخ سمت هدف نقطه‌ای مربوط به شکل (۱۸) رسم شده است. در این شکل نیز به خوبی روشن است که الگوریتم پیشنهادی توانسته خطای فاز را تا حد قابل قبولی اصلاح نماید. ضمناً پایین‌تر بودن سطح نویز در تصویر نرمال‌شده مربوط به روش پیشنهادی (بالا) نسبت به تصویر نرمال‌شده مربوط به روش RTS (پایین) نیز مشخص است.

در مرحله بعد فشرده‌سازی در سمت مطابق الگوریتم پیشنهادی صورت می‌گیرد. در این مرحله طول هر زیردهانه برابر با ۱۶۶/۷ ms، میزان همپوشانی برابر با ۲۳/۳٪ و تعداد زیردهانه‌ها ۹۰ به‌دست آمده است. شکل (۱۸) (بالا) تصویر هدف نقطه‌ای با استفاده از الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. جهت مقایسه، تصویر هدف نقطه‌ای که با استفاده از الگوریتم RTS پایه [۷] به‌دست آمده است نیز در شکل (۱۸) (پایین) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی توانسته در حضور نویز نیز خطای فاز را با دقت مناسبی اصلاح نماید. لازم به ذکر است که در شکل (۱۸) برای نمایش بهتر جزئیات مانند گلبرگ‌های فرعی و نویز، تصویر لگاریتمی رسم شده است. جهت وضوح بیشتر، در شکل (۱۹) نیمرخ برد تصاویر دوبعدی شکل (۱۸) رسم شده است. اولاً مشخص است که روش پیشنهادی در مقایسه با روش RTS بهره فشرده‌سازی بالاتری ایجاد کرده است (نویز در تصویر نرمال‌شده کمتر است) و ثانیاً در مقایسه با شکل (۱۶) مشخص است که فشرده‌سازی در سمت باعث بالاتر رفتن SNR شده است.

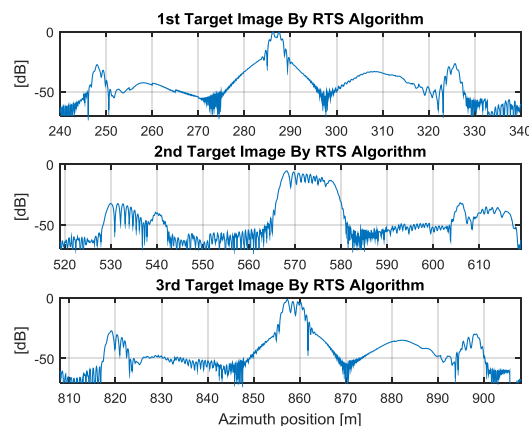
سکو از نقطه $x = 0$ تا نقطه $x = 2L_s$ مطابق مشخصات جدول (۱) پرواز کرده و سیگنال دریافتی مطابق الگوریتم پیشنهادی شکل (۶) مورد پردازش و تصویرسازی قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است الگوریتم تصویرسازی مورد استفاده همان الگوریتم RTS است. در اینجا طول زيردهانه برابر با $133/3$ ms و میزان همپوشانی ۲۵٪ لحاظ شده است. ضمناً وزن انتخاب شده در مرحله تلفیق فاز مربوط به اهداف مختلف، برابر با اندازه نرمال شده قله تصویر هر هدف می‌باشد.

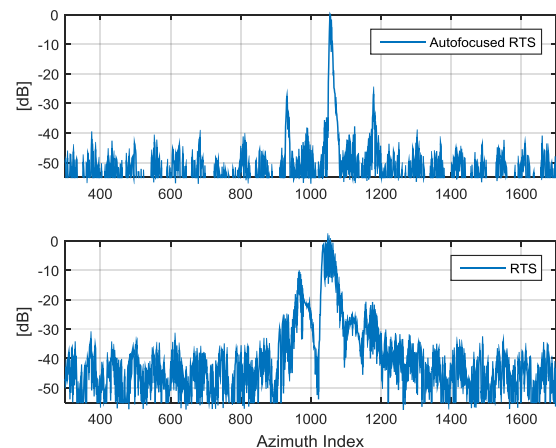
در شکل (۲۲) (بالا) تصویر نرمال شده سه هدف نقطه‌ای بر حسب dB و در شکل (۲۳) تصویر سه هدف نقطه‌ای به صورت جداگانه پس از اعمال الگوریتم RTS پایه و بدون خودمیزانی نشان داده شده است. در شکل (۲۲) (پایین) و شکل (۲۴) نیز نتایج تصویرسازی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این الگوریتم توانسته است به خوبی خطای فاز حاصل از حرکت غیرآرمانی سکو را اصلاح نماید.



شکل (۲۲): تصویر سه هدف نقطه‌ای در حالت حرکت غیرآرمانی با استفاده از الگوریتم RTS (بالا) و به روش پیشنهادی (پایین)

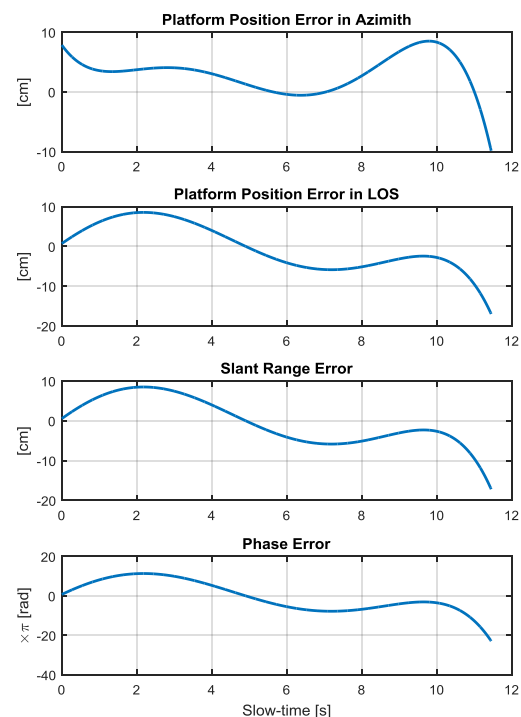


شکل (۲۳): تصویر سه هدف نقطه‌ای در حالت حرکت غیرآرمانی با استفاده از الگوریتم RTS: هدف اول (بالا)، هدف دوم (وسط) و هدف سوم (پایین)



شکل (۲۰): نیمرخ سمت تصویر دوبعدی پس از فشرده‌سازی در سمت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (بالا) و الگوریتم RTS (پایین)

در شکل (۲۱) میزان خطا در سمت، خطا در LOS، خطا در برد مایل و خطای فاز در شبیه‌سازی فوق نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان خطای برد مایل در مقایسه با حد تفکیک در برد مایل (۷۵ cm) در حدی است که تصحیح مهاجرت برد به روش مندرج در [۷] کافی بوده است. اما با این حال گستره خطای فاز به حدی است که بدون استفاده از الگوریتم خودمیزانی، تصویر هدف در سمت محوشده خواهد بود.



شکل (۲۱): از بالا به پایین: انحراف سکو در جهت سمت، انحراف سکو در LOS، انحراف در برد مایل و خطای فاز سیگنال

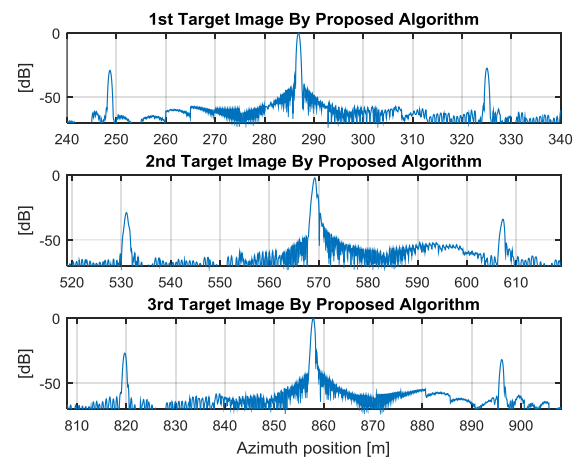
۴-۲. الگوریتم تعمیم‌یافته در شیوه نواری

در این قسمت اجرای الگوریتم شکل (۶) برای سه هدف نقطه‌ای واقع در $x_1 = \frac{L_s}{2}$ ، $x_2 = L_s$ و $x_3 = \frac{3L_s}{2}$ شبیه‌سازی شده است.

نوسانات فرکانس بالای سامانه نیاز به افزایش تعداد زیردهانه‌ها و افزایش طول درون‌یاب است که منجر به افزایش حجم محاسبات خواهد شد. ضمناً دقت بالاتر در تخمین شیفت سیگنال بین زیردهانه‌ها نیز به کاهش خطای الگوریتم منجر خواهد شد که این مورد، مستلزم افزایش نرخ داده‌ها خواهد بود. در مجموع الگوریتم پیشنهادی گزینه مناسبی برای تصویرسازی در یک سامانه با خطای حرکتی متوسط و ضمناً بهره‌گیری از مزایای الگوریتم RTS که مهم‌ترین آن همان پردازش موازی است، می‌باشد.

۶. منابع

- [1] M. Soumekh, "Synthetic aperture radar signal processing," Wiley, 1999.
- [2] G. Cumming and F. H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data," Artech House, 2005.
- [3] G. Franceschetti and R. Lanari, "Synthetic aperture radar processing," CRC press, 1999.
- [4] P. Moreira, M. Prats-Iraola, G. Younis, I. Krieger, Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," IEEE Geoscience and remote sensing magazine, vol. 1, pp. 6-43, 2013.
- [5] S. Brooks, J. Wilson, D. Corr, and P. Gorton, "Real time SAR processing," In Military Microwaves' 86, pp. 411-416, 1986.
- [6] Cumming and J. Bennett, "Digital processing of SEASAT SAR data," In Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP79, pp. 710-718, 1979.
- [7] Moreira, "Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach," IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 30, pp. 714-722, 1992.
- [8] Moreira, T. Misra, and S. Chowdhury, "Modelling and performance evaluation of a new subaperture approach for real-time SAR processing," In Radar 92. International Conference, pp. 399-402, 1992.
- [9] Moreira, R. Spielbauer, and W. Potzsch, "Conceptual design, performance analysis and results of the high resolution real-time processor of the DLR airborne SAR system," In International Geoscience And Remote Sensing Symposium, pp. 912-912, 1994.
- [10] Moreira, "Ein Echtzeit-Subapertur Verfahren zur digitalen Verarbeitung von SAR-Daten," Technical University of Munich, 1992.
- [11] G. Fornaro, "Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 35, pp. 997-1009, 1999.
- [12] E. Wahl, P. Eichel, D. Ghiglia, and C. Jakowatz, "Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 30, pp. 827-835, 1994.
- [13] Wahl, C. Jakowatz, P. Thompson, and D. Ghiglia, "New approach to strip-map SAR autofocus," In Digital Signal Processing Workshop, 1994 Sixth IEEE, pp. 53-56, 1994.



شکل (۲۴): تصویر سه هدف نقطه‌ای در حالت حرکت غیرآرمانی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی: هدف اول (بالا)، هدف دوم (وسط) و هدف سوم (پایین)

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تخمین و اصلاح خطای فاز ناشی از حرکت غیرآرمانی سکوی رادار بر مبنای الگوریتم تصویرسازی RTS ارائه گردید. در الگوریتم پیشنهادی اولیه برای تخمین خطای فاز با استفاده از تک‌هدف، ابتدا الگوریتم تصویرسازی RTS تا مرحله انتگرال دوگانه انجام می‌شود، سپس با استفاده از مکان قله سیگنال در زیردهانه‌های مختلف، گرادیان فاز در محل قله‌ها استخراج شده و سپس خطای فاز تخمین زده شده و پس از درون‌یابی در زمان سمت، از سیگنال دریافتی حذف می‌گردد. برای تخمین و حذف خطای فاز در حالت کارکرد نواری که اهداف واقع در مکان‌های سمت مختلف خطای فاز متفاوتی را تجربه می‌کنند، الگوریتم اولیه به حالت نواری تعمیم داده شده است. در الگوریتم تعمیم یافته، ابتدا تصویرسازی طبق الگوریتم RTS صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از تصویر اهداف در مکان‌های مختلف سمت، تخمینی از گرادیان فاز در زمان مربوطه انجام شده و این توابع به روش پیشنهادی تلفیق می‌شوند. بنابراین با اضافه شده یک تأخیر به اندازه زمان روزنه مصنوعی، تصویرسازی می‌تواند با استفاده از الگوریتم RTS یا الگوریتم‌های دیگر انجام شود.

شبیه‌سازی انجام شده نشان داد الگوریتم پیشنهادی قادر است خطای فاز ناشی از انحرافهای ملایم حرکتی سامانه SAR را تا حد قابل قبولی حذف نماید. نشان داده شد حجم محاسبات در این الگوریتم با فرض خطاهای فاز درجه پایین، کمتر از حجم محاسبات در الگوریتم‌های زیردهانه‌ای مرسوم است. برای حذف

- [18] L. Zhang, Z. Qiao, M. Xing, L. Yang, and Z. Bao, "A Robust Motion Compensation Approach for UAV SAR Imagery," In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 8, pp. 3202-3218, Aug. 2012.
- [19] L. Yang, S. Zhou, L. Zhao, and M. Xing, "Coherent Auto-Calibration of APE and NsRCM under Fast Back-Projection Image Formation for Airborne SAR Imaging in Highly-Squint Angle," Remote Sensing, vol. 10, p. 321, 2018.
- [14] G. Thompson, J. S. Bates, and D. V. Arnold, "Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude stripmap mode SAR," In Radar Conference, 1999. The Record of the 1999 IEEE, pp. 36-40, 1999.
- [15] M. Da-di Ding Chi-biao, "A New Approach to Autofocus Considering Strip Map SAR," Journal of Electronics and Information Technology, vol. 9, p. 002, 2005.
- [16] J. Wang and X. Liu, "SAR minimum-entropy autofocus using an adaptive-order polynomial model," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 3, pp. 512-516, 2006.
- [17] Zhu, R. Jiang, X. Mao, and Z. Zhu, "Multi-subaperture PGA for SAR autofocusing," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, pp. 468-488, 2013.

An Algorithm for Motion Compensation in Synthetic Aperture Radar (SAR) Based on Real-time Sub-aperture (RTS) Image Formation Algorithm

S. R. Samare Hashemi^{*}

Fiber Optics Group, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences,
Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

(Received: 22/04/2019, Accepted: 15/09/2019)

Abstract

In this paper an algorithm based on the real-time sub-aperture (RTS) algorithm is presented for phase error estimation and compensation of synthetic aperture radar (SAR) in the case of non-ideal platform motion. In the proposed algorithm, the signal is input into the RTS algorithm, then extracting the peak time of different sub-aperture processing channels, the phase gradient of peak times is computed and after integration and interpolation, the estimated phase error is compensated in the received signal and finally the RTS algorithm is executed again in order to form the final image. Using the proposed algorithm, the motion compensation (autofocus) ability can be added to the RTS algorithm without changing its processing core whilst keeping the real-time capability. Simulations show the effectiveness of the proposed algorithm for compensating phase errors due to motion fluctuations of the radar platform.

Keywords: Real-Time Sub-Aperture Algorithm (RTS), Sub-Aperture Processing, Autofocus, Synthetic Aperture Radar (SAR)

* Corresponding author E-mail: sr.hashemi@kgut.ac.ir