

نسخه توسعه یافته شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، جهت استخراج تصاویر سار با جبران سازی حرکت نجمه مردانه^۱، مجید حاتم^{۲*}

۱- کارشناس ارشد ۲- استادیار، پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران
(دریافت: ۹۸/۰۵/۰۹؛ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۳)

چکیده

الگوریتم‌های پردازشی متداول جهت استخراج تصاویر سار در مد نواری، برای استفاده در سار فضاپایه توسعه یافته‌اند. اما در سار هواپایه، به علت وجود اعوجاجات حرکتی ناشی از اغتشاشات جوی و سکو، الگوریتم‌های پردازشی موجود قابل استفاده نخواهند بود. بر این اساس اطلاعات مسیر پرواز جهت جبران‌سازی حرکت باید در اختیار واحد پردازش قرار گیرد. جبران‌سازی حرکت از طریق داده‌های ناوبری معمولاً در دو مرحله و بدون هیچ تغییری در شکل استاندارد الگوریتم‌ها انجام می‌شود. اضافه کردن جبران‌سازی حرکت به شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا به سادگی و مشابه دیگر الگوریتم‌ها نیست و نیازمند اصلاحات اساسی در ساختار این الگوریتم بوده و تا به حال انجام نشده است. اصلاح شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، به گونه‌ای که بتوان الگوریتم‌های جبران‌سازی حرکت را به آن اضافه کرد، موضوع اصلی این مقاله می‌باشد. در این ایده با ایجاد اصلاحاتی در شکل استاندارد و تقریبی الگوریتم امگا-کا، الگوریتمی پیشنهاد می‌شود که قابلیت اعمال جبران‌سازی حرکت را درون خود داشته باشد. جهت ارزیابی کیفیت الگوریتم ارائه شده، از یک نمونه از داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی اخذ شده توسط سامانه سار هواپایه پژوهشکده مکانیک، استفاده شده است. مقایسه تصویر استخراج شده با این الگوریتم و تصویر حاصل از الگوریتم برد-داپلر، کیفیت و کارایی بالای الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

سار هواپایه، شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، جبران‌سازی حرکت

۱. مقدمه

استاندارد^۳ خود قابلیت کاربرد در سار فضاپایه را به علت پایداری مداری بالای ماهواره دارند، اما برای استفاده در حالت هواپایه که مسئله خطاهای حرکتی اجتناب‌ناپذیر است جبران‌سازی خطاهای حرکتی ناشی از اغتشاشات جوی و سکو یک مسئله مهم در اکثر سامانه‌های سار هواپایه می‌باشد که اگر تصحیح نشوند، سبب افت کیفیت تصاویر سار می‌گردند. جبران‌سازی حرکت^۴، رویکردی است که اثر حرکت‌های غیرخطی را در پردازش لحاظ و جبران می‌کند. سه الگوریتم رایج پردازش سیگنال در مد نواری جهت استخراج تصاویر سار، الگوریتم‌های برد-داپلر^۵، مقیاس‌دهی چیرپ^۶ و امگا-کا^{۱۱} می‌باشند. هر کدام از این سه الگوریتم تحت شرایط خاصی که در مرجع [۱] بیان شده است، می‌توانند با حفظ کیفیت تصویر به شکل تقریبی به کار روند که از نظر بار محاسباتی نسبت به شکل دقیق الگوریتم‌ها مناسب‌تر می‌باشند

سامانه‌های راداری دهانه مصنوعی در جهت افزایش حد تفکیک فضایی^۱ توسعه یافته‌اند. این امر نیازمند ترکیب پهنای باند وسیع در راستای برد با بازه‌های ادغام سمت طولانی می‌باشد. سه مد عملکردی رایج در سامانه‌های سار (SAR)، مدهای نواری^۲، پرتو افکنی^۴ و اسکن سار^۵ می‌باشند. در مد نواری، جهت نشانه‌روی آنتن در طول پرواز ثابت می‌باشد. الگوریتم‌های پردازشی موجود جهت استخراج تصاویر سار، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قابلیت متمرکز کردن داده‌های راداری را در حالتی که مسیر حرکت سکو^۶ مستقیم باشد، دارند. حسگرهای هواپایه نسبت به حسگرهای فضاپایه، همیشه انحرافات را نسبت به مسیر پرواز ایده‌آل نشان می‌دهند. لذا الگوریتم‌های پردازشی موجود در شکل

*ایانامه نویسنده مسئول: m.hatam@isrc.ac.ir

¹ Resolution
² Synthetic Aperture Radar
³ Stripmap
⁴ Spotlight
⁵ ScanSAR
⁶ Platform

^۷ فرم استاندارد الگوریتم‌های پردازش سیگنال سار با فرض حرکت پلتفرم روی خط مستقیم با سرعت ثابت طراحی شده‌اند.

⁸ Motion Compensation
⁹ Range Doppler
¹⁰ Chirp Scaling
¹¹ Omega-K

۲. شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا

در الگوریتم امگا-کا، عملیات کلیدی در حوزه فرکانس دو بعدی انجام می‌شود. برای بررسی این الگوریتم، در ابتدا به صورت خلاصه به ذکر برخی از ویژگی‌های مهم دو الگوریتم برد-داپلر و مقیاس‌دهی چیرپ پرداخته می‌شود:

- یکی از خصوصیات اصلی الگوریتم برد-داپلر استفاده از یک فیلتر درون‌یاب متغیر با برد برای جبران جابجایی سلول‌های برد در حوزه برد-داپلر می‌باشد که در عین حال خود را با تغییرات RCM و فرکانس داپلر مرکزی با برد نیز وفق می‌دهد. تزویج^۵ بین برد و سمت نیز دارای وابستگی شدید به فرکانس سمت و وابستگی ضعیف به زمان برد می‌باشد. از آنجا که در شکلی از این الگوریتم که از نظر بار محاسباتی مناسب است، SRC^۶ معمولاً در حوزه فرکانس برد و زمان سمت اجرا می‌شود، عملاً از دو وابستگی ذکرشده صرف‌نظر می‌گردد. حتی در شکل دقیق‌تر الگوریتم برد-داپلر که SRC در حوزه فرکانس دو بعدی اجرا می‌گردد، از وابستگی به برد صرف‌نظر شده است. این مسأله به این معنی است که در حالتی که عرض پرتو زیاد باشد (عرض باند سمت زیاد باشد)، SRC به‌طور دقیق اجرا نمی‌گردد.

- الگوریتم مقیاس‌دهی چیرپ فیلتر درون‌یاب مورد استفاده در الگوریتم برد-داپلر را که برای RCMC به‌کار گرفته می‌شود با یک تابع فاز دقیق‌تر جایگزین می‌کند. این الگوریتم، SRC را در حوزه فرکانس دو بعدی انجام می‌دهد که به این معنی است که وابستگی تزویج بین برد و سمت به فرکانس سمت در اینجا لحاظ می‌گردد اما وابستگی به برد همچنان نادیده گرفته می‌شود.

برای اجتناب از این‌گونه کاستی‌ها، الگوریتم امگا-کا از عملیاتی در حوزه فرکانس دو بعدی استفاده می‌کند که در آن وابستگی تزویج بین برد و سمت به فرکانس داپلر و زمان برد اصلاح می‌گردد. بنابراین، الگوریتم امگا-کا توانایی پردازش داده‌هایی که در آن‌ها عرض یا زاویه کجی پرتو زیاد باشد را نیز داراست [۱].

بلوک دیاگرام شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا در شکل (۱) مشاهده می‌شود. طبق این بلوک دیاگرام، الگوریتم امگا-کا شامل مراحل زیر است [۱]:

۱- به‌وسیله تبدیل فوریه دو بعدی، داده‌ها به حوزه فرکانس دو بعدی منتقل می‌شوند (داده‌ها در هر یک از دو راستای برد و سمت به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند).

۲- طیف دو بعدی داده‌ها در تابع مرجع ضرب می‌شود که این کار، اولین قدم کلیدی در این الگوریتم می‌باشد. این تابع در

(تعداد عملیات ممیز شناور^۱ کمتری دارند) [۱-۲]. الگوریتم امگا-کا یک الگوریتم پردازشی مرسوم برای متمرکز کردن داده‌های سار می‌باشد. قابلیت کاربرد این الگوریتم در سار هواپایه، به دلیل عدم اعمال جبران‌سازی حرکت محدود شده است. اعمال جبران‌سازی حرکت در شکل دقیق الگوریتم امگا-کا در مراجع [۳-۶] با ایجاد اصلاحاتی در نگاشت استولت بررسی شده است. جبران‌سازی حرکت در مراجع [۵-۶] در دو مرحله ارائه شده است و در مراجع [۳-۴] رویکردی جهت اعمال دقیق‌تر جبران‌سازی حرکت در سه مرحله ارائه می‌شود. برای سناریوهای با زوایای کجی^۲ بالا و دهانه مصنوعی طویل، الگوریتم ارائه‌شده در مرجع [۳] مقاوم‌تر از الگوریتم‌های ارائه‌شده در مراجع [۵-۶] است. این الگوریتم [۳] قابلیت پردازش داده‌های سار هواپایه پهن باند با فرکانس پایین را ایجاد می‌کند. اما در این مقاله، شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا به‌گونه‌ای توسعه داده می‌شود که قابلیت اعمال جبران‌سازی حرکت را در دو مرحله داشته باشد. لازم به ذکر است، بررسی مسئله جبران‌سازی حرکت در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا تا به حال بررسی نشده است و برای اولین بار در این مقاله ارائه می‌گردد. جبران‌سازی حرکت با استفاده از داده‌های ناوبری معمولاً در دو مرحله انجام می‌شود. جبران‌سازی مرتبه (مرحله) اول، بخش مستقل از برد می‌باشد که به‌طور مستقیم، قبل یا بعد از فشرده‌سازی برد انجام می‌شود. اما جبران‌سازی مرتبه دوم که وابسته به برد می‌باشد، باید بعد از فشرده‌سازی برد و RCMC^۳ (تصحیح مهاجرت سلول برد) و قبل از فشرده‌سازی سمت انجام شود [۶-۷]. به دلیل اجرای توأم RCMC و فشرده‌سازی سمت در الگوریتم امگا-کا بر خلاف الگوریتم‌هایی مثل برد-داپلر و مقیاس‌دهی چیرپ، اعمال بخش دوم جبران‌سازی حرکت در شکل استاندارد الگوریتم امگا-کا امکان‌پذیر نمی‌باشد. در واقع اعمال جبران‌سازی حرکت درون الگوریتم‌های برد-داپلر و مقیاس‌دهی چیرپ بدون هیچ تغییری در شکل استاندارد این الگوریتم‌ها انجام می‌شود، اما اعمال جبران‌سازی حرکت در الگوریتم امگا-کا، نیازمند تغییراتی در شکل استاندارد این الگوریتم می‌باشد.

برای بررسی مسئله جبران‌سازی حرکت در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، در ابتدا این الگوریتم بررسی می‌شود و در ادامه روشی پیشنهاد می‌گردد که قابلیت جبران‌سازی حرکت در این الگوریتم گنجانده شود. در انتها، الگوریتم پیشنهادی به داده‌های سار هواپایه شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی که توسط سامانه سار هواپایه پژوهشگاه فضایی ایران^۴ به‌دست آمده‌اند، اعمال می‌گردد و کیفیت تصویر حاصل مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

^۱ Floating Point Operation

^۲ Squint Angle

^۳ Range Cell Migration Correction

^۴ ISRCSAR

^۵ Coupling

^۶ Secondary Range Compression

زیر نمایش داده می شود [۱]:

$$S_{2df}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) = A w_r(\mathbf{f}) w_a(\mathbf{f}_a - f_{DC}) \times \exp\{j\theta_{2df}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a)\} \quad (1)$$

\mathbf{f} فرکانس در راستای برد، \mathbf{f}_a فرکانس در راستای سمت، f_{DC} فرکانس مرکز داپلر، j بیانگر عدد موهومی $\sqrt{-1}$ و $w_r(\mathbf{f})$ و $w_a(\mathbf{f}_a)$ به ترتیب نسخه مقیاس دهی شده ای از پوش سمت سیگنال و پوش برد سیگنال می باشند.

با فرض این که نرخ سیگنال سار مثبت و معادله برد هذلولوی باشند، فاز رابطه (۱) برابر است با [۱]:

$$\theta_{2df}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) = -\frac{4\pi r_0}{c} \sqrt{(\mathbf{f} + f_0)^2 - \left(\frac{c \mathbf{f}_a}{2 V_r}\right)^2} - \frac{\pi \mathbf{f}^2}{K_r} \quad (2)$$

K_r نرخ FM سیگنال ارسالی، r_0 کوتاه ترین فاصله بین هدف و رادار، f_0 فرکانس سیگنال ارسالی و V_r سرعت پرنده می باشند. بهترین مقادیر مرجعی که برای جبران فاز می توانند در حوزه فرکانس دو بعدی به کار روند، مقادیر مربوط به وسط نوار برای برد هدف (r_{ref}) و سرعت حسگر مرجع ($V_{r_{ref}}$) می باشد. بنابراین، تابع مرجع برای جبران فاز در برد مرجع دارای فاز زیر است:

$$\theta_{ref}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) = +\frac{4\pi r_{ref}}{c} \sqrt{(\mathbf{f} + f_0)^2 - \left(\frac{c \mathbf{f}_a}{2 V_{r_{ref}}}\right)^2} + \frac{\pi \mathbf{f}^2}{K_r} \quad (3)$$

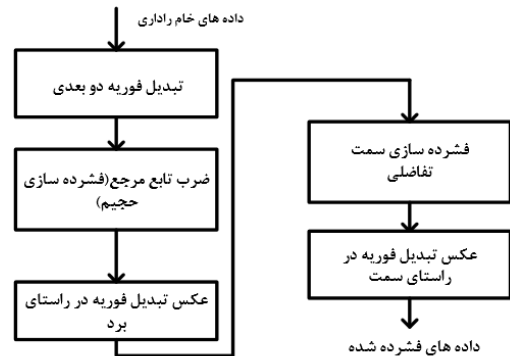
۲-۲. شکل تحلیلی فاز باقیمانده هر هدف پس از فشرده سازی حجیم

پس از جبران فاز در برد مرجع، اگر از وابستگی سرعت حس گر به برد صرف نظر شود، فاز باقیمانده هر هدف در حوزه فرکانس دو بعدی تقریباً برابر می شود با [۱]:

$$\theta_{RFM}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) \approx -\frac{4\pi(r_0 - r_{ref})}{c} \sqrt{(\mathbf{f} + f_0)^2 - \left(\frac{c \mathbf{f}_a}{2 V_r}\right)^2} \quad (4)$$

در شکل دقیق الگوریتم امگا-کا، فاز باقیمانده در رابطه (۴) با

یک برد به خصوص محاسبه می گردد که معمولاً برد وسط نوار انتخاب می شود. این ضرب، فاز سیگنال را در برد مرجع که شامل فاز ناشی از مدولاسیون فرکانسی در جهت برد، RCM^۱، تزویج بین برد و سمت و مدولاسیون فرکانسی در جهت سمت است جبران می کند (فشرده سازی حجیم^۲). در این مرحله، اهدافی که در برد مرجع قرار دارند به طور کامل و اهدافی که در بردهای دیگر قرار دارند، به صورت جزئی متمرکز می گردند. بدیهی است که هر چه هدفی از برد مرجع دورتر باشد، کمتر متمرکز خواهد شد. در شکل دقیق الگوریتم، عمل درون یابی در واقع بخش تفاضلی عملیات SRC، RCMC و فشرده سازی در جهت سمت را انجام می دهد. از بین این سه مورد، مهم ترین آن ها فشرده سازی سمت تفاضلی است. اگر بخش تفاضلی SRC و RCMC به اندازه ای کوچک باشند که بتوان از آن ها صرف نظر کرد، درون یابی موجود در شکل دقیق الگوریتم را می توان با یک عملیات ضرب فاز جایگزین نمود که تنها فشرده سازی سمت تفاضلی را اجرا می کند. در واقع با این کار فرض شده است که RCM و تزویج بین برد و سمت مستقل از برد می باشند. بنابراین، اگر اثر تزویج بین برد و سمت به علت کوچکی آن صرف نظر شود، در این صورت می توان پس از ضرب تابع مرجع، از داده ها در جهت برد عکس تبدیل فوریه گرفت و فشرده سازی سمت تفاضلی را در حوزه برد-داپلر انجام داد. در نهایت با عکس تبدیل فوریه در جهت سمت، داده ها به حوزه تصویر منتقل می شوند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا [۱]

در ادامه، جهت مشخص شدن فاز تابع مرجع و بلوک فشرده سازی سمت تفاضلی، رابطه تحلیلی سیگنال سار در بخش های مختلف بلوک دیاگرام بیان می شود [۱].

۲-۱. شکل تحلیلی فاز تابع مرجع

سیگنال سار قبل از پردازش، در حوزه فرکانس دو بعدی به صورت

^۱ Range Cell Migration

^۲ Bulk

^۳ Frequency Modulation

توسط خطاهای حرکتی در تصاویر سار نام برد. انحرافات هواپیما از مسیر مستقیم و تغییر سرعت سکو را می‌توان توسط سیستم ناوبری اینرسی (INS)^۱، سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS)^۲ یا واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU)^۳ محاسبه نمود. با پردازش مناسب داده‌های شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های IMU یا INS می‌توان سه مؤلفه حرکت انتقالی هواپیما در سه جهت قائم، عمود بر مسیر حرکت و در امتداد مسیر و نیز مؤلفه‌های زاویه‌ای roll، pitch و yaw را در محل IMU اندازه‌گیری نمود.

همچنین می‌توان اطلاعات انحراف مسیر را به‌طور مستقیم تنها با استفاده از داده‌های سار دریافت شده محاسبه کرد. در موارد دیگر اطلاعاتی که به‌طور مستقیم از داده‌های سار تخمین زده شده‌اند، به‌عنوان مکمل اطلاعات دریافتی از سامانه‌های ناوبری استفاده می‌شوند. در این مقاله جبران‌سازی حرکت تنها با استفاده از داده‌های ناوبری انجام شده است [۷-۹].

۳-۱. اثر حرکت سکو بر کیفیت تصویر سار

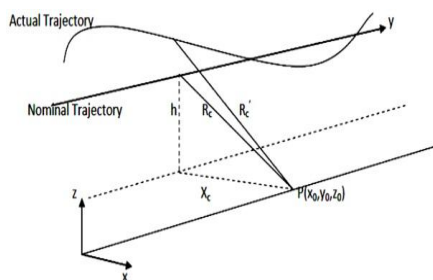
فرض کنید M هدف نقطه‌ای در نواری که می‌خواهد تصویربرداری شود، وجود دارند. نقطه وسط نوار به فاصله R_c از مسیر نامی سکوی حامل رادار مطابق شکل (۲) قرار دارد. این فاصله برابر است با [۹]:

$$R_c = \sqrt{X_c^2 + h^2} \quad (۸)$$

h ارتفاع متوسط سکو از زمین و X_c کوتاه‌ترین فاصله زمینی مرکز نوار تا مسیر پروازی است. هدف m ام در نوار در نقطه p_m قرار دارد و در حالت حرکت روی مسیر نامی، برد لحظه‌ای مایل این هدف برابر با $R_m^n(\eta)$ می‌باشد [۹]:

$$R_m^n(\eta) = \sqrt{(X_c + x_m)^2 + V_r^2 \left(\eta - \frac{y_m}{V_r}\right)^2 + h^2}$$

اگر محور x در جهت برد و محور y در جهت حرکت سکو در نظر گرفته شود، x_m و y_m به ترتیب فاصله هدف m تا مرکز نوار در جهت x و y هستند و η بیانگر زمان سمت می‌باشد.



شکل (۲): هندسه حرکت نامی و واقعی سکوی حامل رادار [۹]

یک درون‌یابی استولت جبران می‌شود که در واقع یک نگاشت در راستای برد از طریق اعمال فیلتر درون‌یاب انجام می‌شود و محتوای فاز داده‌ها در حوزه فرکانس دوبعدی تغییر می‌کند، اما در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، شکل بسط یافته‌ای از این فاز باقیمانده، جبران می‌شود. اگر این بخش به شکل یک سری توانی بر حسب f بسط داده شود، رابطه (۴) به شکل رابطه (۵) قابل بازنویسی است [۱]:

$$\theta_{RFM}(f, f_a) \approx -\frac{4\pi(r_0 - r_{ref})}{c} \times \left[f_0 \mathbf{D}(f_a, \mathbf{V}_r) + \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{D}(f_a, \mathbf{V}_r)} - \frac{f^2}{2f_0} \mathbf{D}^3(f_a, \mathbf{V}_r) - \frac{c^2 f_a^2}{4V_r^2 f_0^2} \right] \quad (۵)$$

λ طول موج و $\mathbf{D}(f_a, \mathbf{V}_r)$ فاکتور جابه‌جایی و برابر با

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V_r}\right)^2}$$

به‌علت کوچکی آن صرف‌نظر شود، یعنی از جمله سوم رابطه (۵) چشم‌پوشی شود، با محاسبه جمله دوم این رابطه در یک فرکانس سمت مرجع ($f_{a_{ref}}$)، می‌توان رابطه (۵) را به‌صورت تقریبی زیر در نظر گرفت [۱]:

$$\theta_{RFM}(f, f_a) \approx -\frac{4\pi(r_0 - r_{ref})}{c} \times \left[\frac{\mathbf{f}}{\mathbf{D}(f_{a_{ref}}, \mathbf{V}_r)} + f_0 \mathbf{D}(f_a, \mathbf{V}_r) \right] \quad (۶)$$

از رابطه (۶) مشخص است که فاز فیلتر منطبق سمت برابر با قرینه بخش دوم این رابطه می‌باشد. فیلتر منطبق سمت، جهت فشرده‌سازی داده‌ها در راستای سمت (فشرده‌سازی سمت تفاضلی) به شرح زیر می‌باشد [۱]:

$$\mathbf{MF}_{az} \approx \exp\left(\frac{4\pi j}{c}(r_0 - r_{ref})\right) \times f_0 \mathbf{D}(f_a, \mathbf{V}_r) \quad (۷)$$

۳. جبران‌سازی حرکت

یک مشکل اساسی در اکثر حسگرهای سار هواپایه، جبران خطاهای حرکت ناشی از اغتشاشات جوی است (جبران تغییرات جهت و مقدار بردار سرعت حرکت مستقیم سکو) که در مراجع [۷-۹] این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور خاص، تنزل حد تفکیک هندسی و رادیو متریک، ابهام در جهت سمت و اعوجاج هندسی و فاز را می‌توان به‌عنوان اثرات اصلی تولیدشده

^۱ Inertial Navigation System

^۲ Global Positioning System

^۳ Inertial Measurement Unit

با توجه به انحرافات از مسیر نامی، سیگنال واقعی دریافتی نسبت به سیگنال دریافتی در حالت ایده آل به صورت رابطه (۱۳) می باشد [۹]:

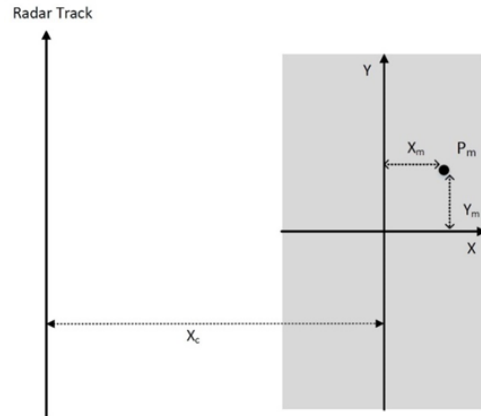
$$S_{MC}(\tau, \eta) = S_r\left(\tau - \frac{2G_m(\eta)}{c}, \eta\right) \times \exp(-j4\pi \frac{G_m(\eta)}{\lambda}) \quad (13)$$

در نتیجه اگر از نظر تئوری بتوان سیگنال را در حوزه زمان برد به اندازه $\frac{2G_m(\eta)}{c}$ شیفت داد و در عامل نمایی $\exp(j4\pi \frac{G_m(\eta)}{\lambda})$ ضرب کرد، سیگنال دریافتی برابر با سیگنال دریافتی ایده آل با حرکت روی خط مستقیم می شود. اهدافی که در پرتو آنتن رادار در جهت برد یکسان اما سمت متفاوتی قرار می گیرند، به خاطر حرکت سکوی حامل رادار، شیفت برد متفاوتی پیدا می کنند. لذا این روش جبران سازی حرکت، تنها برای یک پیکسل (هر پیکسل با دو مشخصه برد و سمت تعریف می شود) از تصویر برقرار می باشد. در واقع، تابع نمایی استفاده شده در رابطه (۱۳) به منظور جبران سازی حرکت، برای هر پیکسل متفاوت شده، که منجر به افزایش بار محاسباتی می گردد. جهت کاهش بار محاسباتی، تقریب هایی برای اعمال جبران سازی حرکت وجود دارد. یکی از این روش ها، جبران سازی حرکت را در دو مرحله اعمال می کند، بدین صورت که در مرحله اول تصحیح حرکت برای یک برد مرجع انجام می شود (برد مرجع، کمترین فاصله سکو تا وسط نوار در نظر گرفته می شود). و در مرحله دوم، بعد از فشرده سازی برد و اعمال RCMC، تفاوت بین جبران سازی لازم بین سلول بردی که هدف در آن قرار دارد با سلول برد مرجع در تمام زمان های سمت انجام می شود. در این مقاله از این نوع جبران سازی دو مرحله ای استفاده شده است. در واقع در این روش، جبران سازی حرکت بجای اینکه پیکسل به پیکسل انجام شود، برای تمام اهدافی که در سلول بردهای متفاوتی قرار دارند، انجام می شود. چون فاصله رادار از نوار خیلی بیشتر از فاصله بین اهداف واقع در یک سلول برد با مکان سمت های متفاوت، می باشد. این تقریب قابل قبول است [۹].

۴. جبران سازی حرکت در شکل تقریبی الگوریتم

امگا-کا

همان طور که در بخش ۱ ذکر شد، به دلیل اجرای توأم RCMC و فشرده سازی سمت، اعمال بخش دوم جبران سازی حرکت در شکل استاندارد الگوریتم امگا-کا امکان پذیر نمی باشد. برای حل این مشکل در الگوریتم پیشنهادی، تابع مرجع به گونه ای اصلاح می گردد که فاز ناشی از مدولاسیون فرکانسی در جهت برد، RCMC و تزویج بین برد و سمت را در برد مرجع جبران کند ولی مدولاسیون فرکانسی سمت را تغییر ندهد. این اصلاح تابع مرجع،



شکل (۳): مکان هدف m در نوار تصویربرداری [۹]

برد مایل لحظه ای برای حرکت روی مسیر واقعی (مسیر داراری انحراف) برابر است با [۹]:

$$R_m^a(\eta) = \sqrt{(X_c + x_m + \Delta x(\eta))^2 + V_r^2 \left(\eta - \frac{y_m - \Delta y(\eta)}{V_r}\right)^2 + (h + \Delta z(\eta))^2} \quad (10)$$

$\Delta x(\eta)$ ، $\Delta y(\eta)$ و $\Delta z(\eta)$ به ترتیب انحرافات لحظه ای مسیر واقعی نسبت به مسیر ایده آل در هر یک از راستاهای برد و سمت و ارتفاع می باشند.

با فرض ارسال سیگنال چیرپ با نرخ FM برابر با K_r ، سیگنال دریافتی دمدوله شده از هدف m برابر می شود با [۹]:

$$S_r(\tau, \eta) \approx A_0 w_r \left(\tau - \frac{2R_m^a(\eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_m^a(\eta)}{\lambda} + j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R_m^a(\eta)}{c} \right]^2 \right\} \quad (11)$$

w_a و w_r پوش برد و پوش سمت در حوزه زمان می باشند.

۳-۲. روش جبران سازی حرکت

برای آن که اثر جابه جایی سکو در الگوریتم پردازشی وارد نشود، باید سیگنال خام دریافتی را قبل از ورود به بخش پردازشی الگوریتم اصلاح کنیم، به طوری که با سیگنال دریافتی در حالت حرکت ایده آل یکی شود. اختلاف بین برد مایل لحظه ای واقعی و نامی به صورت زیر تعریف می شود [۹]:

$$G_m(\eta) = R_m^a(\eta) - R_m^n(\eta) \quad (12)$$

$$\mathbf{MF}_{az_mod} \approx \exp\left(\frac{4\pi j \mathbf{r}_0}{c} \times f_0 \mathbf{D}(\mathbf{f}_a, \mathbf{V}_r)\right) \quad (16)$$

جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، مقایساتی بین این الگوریتم و سایر الگوریتم‌های موجود از حیث بار محاسباتی در ادامه این بخش و از حیث کیفیت تصاویر خروجی در بخش بعدی انجام شده است.

هریک از عملگرهای به کار رفته در الگوریتم‌های پردازشی (تبدیل فوریه، عکس تبدیل فوریه، ضرب فاز مختلط، درون‌یابی و فیلترهای منطبق) را می‌توان با تعدادی ضرب و جمع پیاده‌سازی کرد. منظور از بار محاسباتی، تعداد این جمع و ضرب‌ها (تعداد عملیات ممیز شناور) می‌باشد. در مرجع [۱] (کتاب کیومینگ) بار محاسباتی هر یک از الگوریتم‌های پردازشی محاسبه شده است و اثبات می‌گردد که بار محاسباتی فرم تقریبی الگوریتم امگا-کا نسبت به هر یک از الگوریتم‌های برد-داپلر، مقیاس‌دهی چیرپ و فرم دقیق الگوریتم امگا-کا کمتر است. لذا با اضافه کردن یک نوع جبران‌سازی حرکت به این الگوریتم‌ها، همین ترتیب بین الگوریتم‌ها از نظر بار محاسباتی حفظ می‌شود؛ بدین معنی که بار محاسباتی فرم تقریبی الگوریتم امگا-کا که جبران‌سازی حرکت به آن اضافه شده است (الگوریتم پیشنهادی در این مقاله) نسبت به سایر الگوریتم‌های پردازشی ذکر شده که جبران‌سازی حرکت در آن‌ها اعمال شده است، کمتر است.

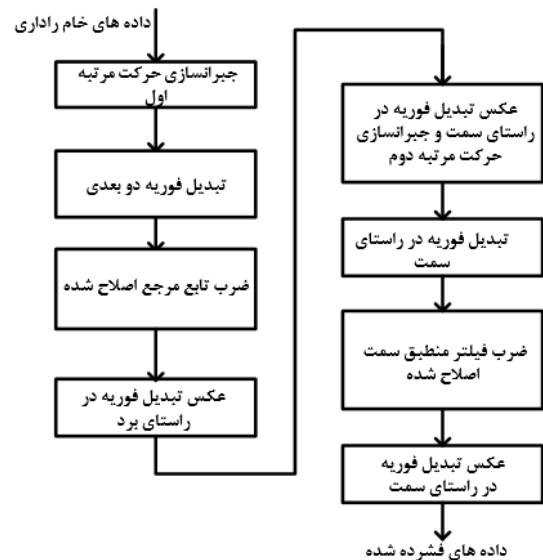
۵. شبیه‌سازی و تحلیل الگوریتم پیشنهادی

در ادامه، به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی توسط شبیه‌سازی پرداخته شده است. در شبیه‌سازی‌های این بخش از پارامترهای جدول (۱) برای شبیه‌سازی اکوی دریافتی از یک هدف نقطه‌ای استفاده شده است. این هدف نقطه‌ای در مرکز نوار تصویربرداری قرار داده شده است. مدت زمان تصویربرداری یک ثانیه بوده است.

جدول (۱): مشخصات فنی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

مقدار	مشخصه
۹/۵۸۵GHz	فرکانس کاری
۴۰۰m	ارتفاع سکو
۱۰۰m/s	سرعت
۷۰°	زاویه برخورد
۰°	زاویه کجی پرتو
۴ KHz	PRF
۰/۵ m × ۰/۳۶m	ابعاد آنتن
۲۰ μs	عرض پالس ارسالی
۱۶۰ MHz	پهنای باند چرپ
۲۵۰ MHz	فرکانس نمونه‌برداری

الزام اصلاح فیلتر منطبق سمت را نیز ایجاد می‌کند. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی جهت اعمال جبران‌سازی حرکت در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام پیشنهادی جهت اعمال جبران‌سازی حرکت در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا

طبق مطالب بیان‌شده، جهت جبران فاز در برد مرجع، فاز مرجع اصلاح‌شده پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

$$\theta_{ref_mod}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) = + \frac{4\pi r_{ref}}{c} \sqrt{(\mathbf{f} + f_0)^2 - \left(\frac{c \mathbf{f}_a}{2 \mathbf{V}_{ref}}\right)^2} + \quad (14)$$

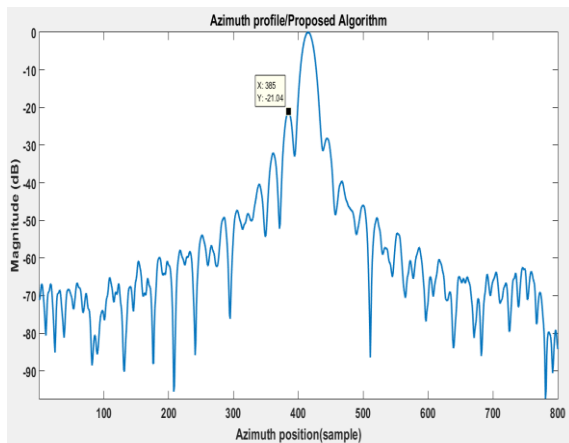
$$\frac{\pi \mathbf{f}^2}{K_r} - \frac{4\pi r_{ref}}{c} \sqrt{f_0^2 - \left(\frac{c \mathbf{f}_a}{2 \mathbf{V}_{ref}}\right)^2}$$

با بسط رابطه ۱۴ به صورت یک سری توانی بر حسب \mathbf{f} و پس از جبران فاز در برد مرجع، فاز باقیمانده هر هدف در حوزه فرکانس دو بعدی، برابر با رابطه ۱۵ می‌شود:

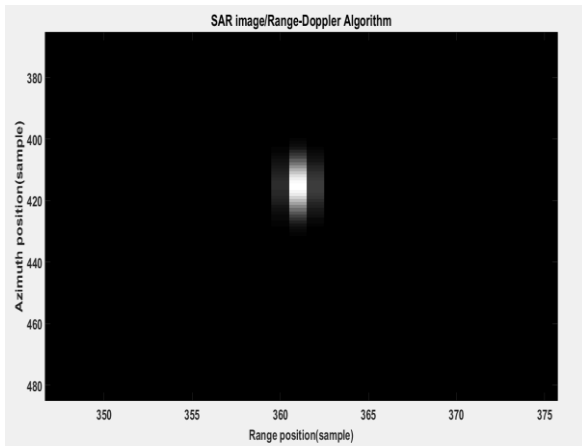
$$\theta_{RFM_mod}(\mathbf{f}, \mathbf{f}_a) \approx - \frac{4\pi(\mathbf{r}_0 - r_{ref})}{c} \times \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{D}(\mathbf{f}_a, \mathbf{V}_r)} - \quad (15)$$

$$\frac{4\pi \mathbf{r}_0}{c} f_0 \mathbf{D}(\mathbf{f}_a, \mathbf{V}_r)$$

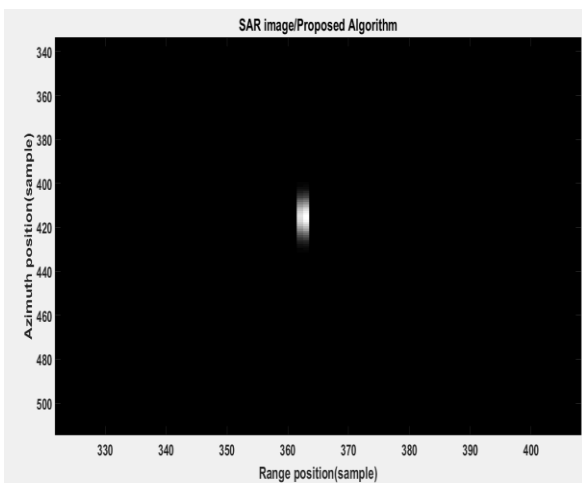
از رابطه (۱۵) مشخص است که فاز فیلتر منطبق سمت برابر با قرینه بخش دوم این رابطه می‌باشد، لذا فیلتر منطبق سمت اصلاح‌شده پیشنهادی برابر با رابطه (۱۶) می‌باشد:



شکل (۶): پروفایل سمت هدف (الگوریتم پیشنهادی)



شکل (۷): تصویر سار (الگوریتم برد-داپلر)



شکل (۸): تصویر سار (الگوریتم پیشنهادی)

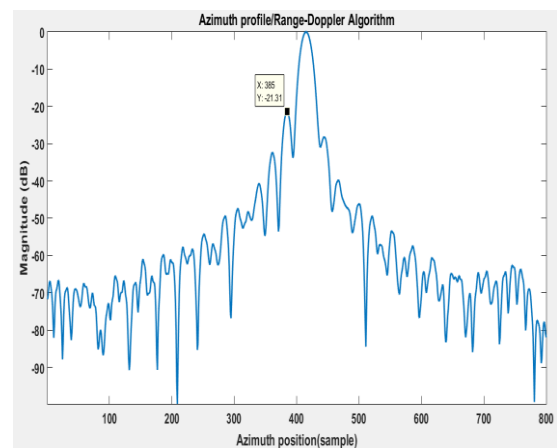
اطلاعات مربوط به PSNR بین دو تصویر سار شکل های (۷-۸) و پهنای ۳ dB و سطح سایدلوب پروفایل سمت شکل های (۵-۶) در جدول (۲) قابل مشاهده می باشد.

نوع اعوجاجات حرکتی در صفحه عمود بر مسیر پرواز، یک سینوسی فرکانس بالا با دامنه ۱/۵ cm لحاظ گردیده است. دوره تناوب این اعوجاجات یک سوم زمان پرتوگیری هدف می باشد و اعوجاجات در راستای حرکت صفر فرض شده اند

با توجه به تأثیرگذاری خطای فاز سمت بر روی پارامترهای کیفیت تصویر در این راستا و عدم تأثیرپذیری پروفایل برد هدف، پهنای ۳ dB و سطح ساید لوب پروفایل سمت هدف به عنوان دو مشخصه اصلی پروفایل هدف در دو الگوریتم برد-داپلر با فرمی از SRC که تنها وابستگی به فرکانس سمت که وابستگی شدیدی نیز می باشد را در نظر می گیرد، به عنوان یک الگوریتم مرجع و الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرند. همچنین PSNR بین دو تصویر حاصل از الگوریتم پیشنهادی و این فرم از الگوریتم برد-داپلر محاسبه می گردد. لازم به ذکر است از آن جهت که الگوریتم برد-داپلر مدت هاست جهت استخراج تصاویر سار استفاده می شود و این فرم از الگوریتم برد-داپلر (با فرمی از SRC که تنها وابستگی به فرکانس سمت را در نظر می گیرد) از نظر بار محاسباتی تقریباً مشابه الگوریتم پیشنهادی می باشد، به عنوان الگوریتم مرجع انتخاب شده است. در ادامه منظور از الگوریتم برد-داپلر این فرم تقریبی از الگوریتم برد-داپلر می باشد. معیاری جهت ارزیابی کیفیت تصویر مبنی بر اندازه گیری اختلاف بین پیکسل های دو تصویر می باشد. PSNR دو تصویر هشت بیتی به شرح زیر محاسبه می شود [۱]:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (17)$$

MSE در رابطه فوق بیانگر متوسط مجذور خطای پیکسل های دو تصویر می باشد. پروفایل سمت هدف نقطه ای و تصویر حاصل از هر یک از الگوریتم های برد-داپلر و الگوریتم پیشنهادی در شکل های (۵-۸) آورده شده است.

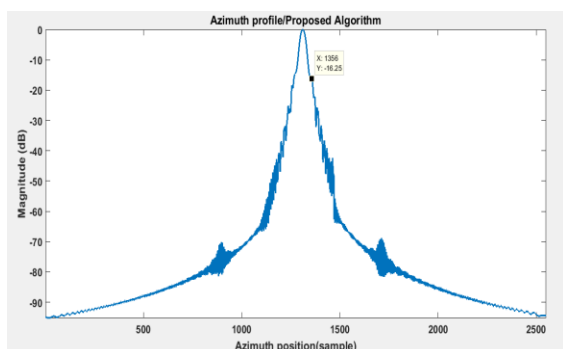


شکل (۵): پروفایل سمت هدف (الگوریتم برد-داپلر)

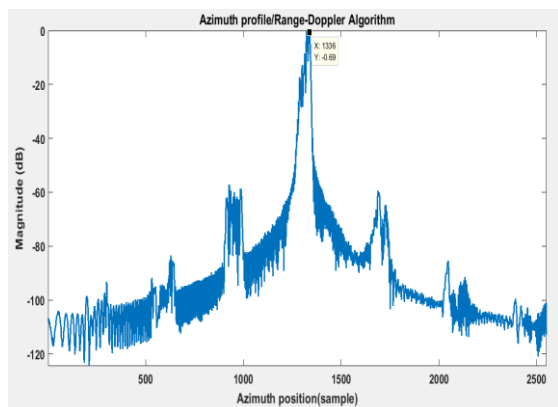
جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی هدف نقطه‌ای با زاویه کجی 3° برای الگوریتم برد-داپلر و الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی	الگوریتم برد-داپلر	
۲/۳۷ m	۲/۲۵ m	پهنای ۳dB
-۲۴/۲ dB	-۲۰/۰۶ dB	سطح ساید لوب

از جدول (۳) مشاهده می‌گردد که در زاویه کجی کم (3°) هر دو الگوریتم با اختلاف سطح ساید لوب کمتر از ۲dB و با اختلاف پهنای ۳dB برابر با ۰/۱۲m، توانایی لازم در تشکیل تصویر را دارند.

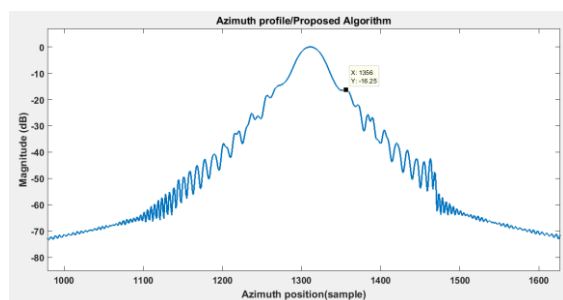


شکل (۱۱): پروفایل سمت هدف با زاویه کجی 20° (الگوریتم پیشنهادی)



شکل (۱۲): پروفایل سمت هدف با زاویه کجی 20° (الگوریتم برد-داپلر)

جهت مقایسه بهتر شکل‌های (۱۱-۱۲)، بزرگنمایی پروفایل سمت هدف در شکل‌های (۱۳-۱۴) رسم گردیده است.



شکل (۱۳): بزرگنمایی شده شکل (۱۱)

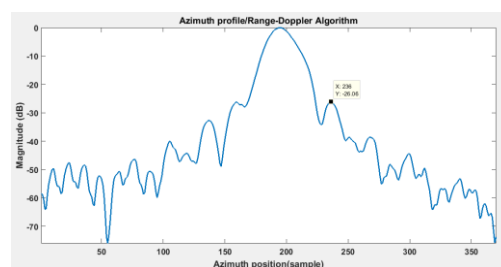
جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی هدف نقطه‌ای برای الگوریتم برد-داپلر و الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی	الگوریتم برد-داپلر	
۱/۷۵ m	۱/۷۵ m	پهنای ۳dB
-۲۱/۰۴ dB	-۲۱/۳۱ dB	سطح ساید لوب
۳۰/۶ dB		PSNR

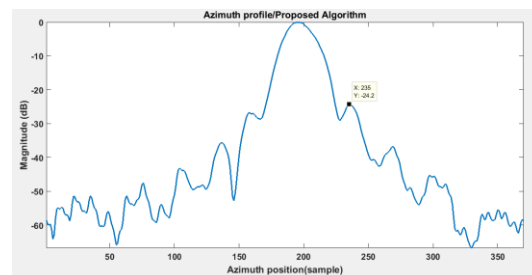
مقایسه مقادیر پهنای ۳dB و سطح ساید لوب پروفایل سمت در هر یک از الگوریتم‌ها در جدول (۴)، نشان می‌دهد که این مقادیر در دو الگوریتم تقریباً برابرند و الگوریتم پیشنهادی، همانند الگوریتم برد-داپلر کارایی لازم در تشکیل تصویر را دارد. همچنین مقدار به دست آمده برای PSNR، نشان‌دهنده کیفیت مطلوب تصویر حاصل از الگوریتم پیشنهادی و جبران نمودن اعوجاجات حرکتی می‌باشد.

جهت بررسی رفتار الگوریتم پیشنهادی در سناریوهای با زاویه کجی غیر صفر، در ادامه شبیه‌سازی‌هایی با زاویه کجی برابر با 3° و 20° ، ارتفاع ۲۵۰۰ m و زاویه تابش 60° انجام شده است.

نوع اعوجاجات حرکتی در صفحه عمود بر مسیر پرواز، یک سینوسی فرکانس بالا با دامنه $1/5$ cm لحاظ گردیده است، دوره تناوب این اعوجاجات یک دوم زمان پرتوگیری هدف می‌باشد و اعوجاجات در راستای حرکت صفر فرض شده‌اند، بقیه پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند. نتایج مربوط به پروفایل سمت هدف و سطح ساید لوب و پهنای ۳dB در هر یک از الگوریتم‌های برد-داپلر و الگوریتم پیشنهادی با زاویه کجی 3° در شکل‌های (۹-۱۰) و جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۹): پروفایل سمت هدف با زاویه کجی 3° (الگوریتم برد-داپلر)



شکل (۱۰): پروفایل سمت هدف با زاویه کجی 3° (الگوریتم پیشنهادی)

با مقایسه شکل‌های (۱۶-۱۵) مشاهده می‌شود که در الگوریتم پیشنهادی با وجود افزایش پهنای ۳dB هدف، قدرت تفکیک اهداف از یکدیگر وجود دارد و هدف نقطه‌ای همچنان به صورت پیوسته در تصویر سار دیده می‌شود. اما در الگوریتم برد-داپلر یک هدف نقطه‌ای به صورت چند لکه دیده می‌شود.

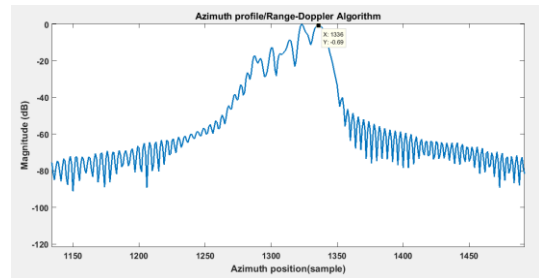
۶. اعمال الگوریتم پیشنهادی به داده‌های واقعی سار هواپایه

در این بخش جهت تأکید بر لزوم جبران سازی حرکت در پردازش داده‌های سار هواپایه، الگوریتم پیشنهادی و شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا بدون جبران سازی خطاهای حرکتی به داده‌های واقعی سامانه سار هواپایه پژوهشگاه فضایی ایران اعمال می‌گردند و کیفیت تصاویر استخراج شده در این دو حالت با تصویر ماهواره‌ای گوگل مقایسه می‌گردند. همچنین جهت ارزیابی اصلاحات پیشنهادی در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا، تصویر حاصل از الگوریتم پیشنهادی با تصویر حاصل از الگوریتم برد-داپلر دارای جبران سازی حرکت مقایسه می‌گردد. در آزمون هوایی مورد نظر، مد تصویربرداری نواری بوده است و از هواپیمای Y12 به عنوان سکوی حامل برای تصویربرداری بر فراز شهر جهرم استفاده شده است. شرایط این آزمون پروازی در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): شرایط آزمون پروازی

مقدار	کمیت / شرح عنوان
۱۳۹۶/۱۲/۱۰	زمان اجرای آزمون پروازی
۱/۶ درجه	زاویه کجی
۶۴ درجه	زاویه برخورد
۱ متر	حد تفکیک سمت
۱/۵ متر	حد تفکیک برد زمینی
۲۱۶۲ متر	ارتفاع پروازی
۳۶ متر بر ثانیه	سرعت حرکت هواپیما
۲۸/۵۵ درجه	عرض جغرافیایی جهرم
۵۳/۵۳ درجه	طول جغرافیایی جهرم

اطلاعات کامل موقعیت و وضعیت هواپیما از مسیر حرکت در دسترس می‌باشد. از این میان به نظر می‌رسد که تغییرات موقعیت پرنده نسبت به حرکت مستقیم الخط در هر یک از



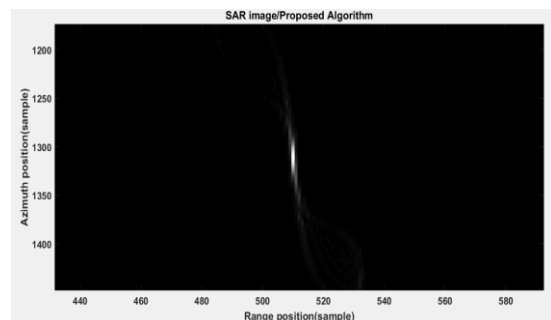
شکل (۱۴): بزرگنمایی شده شکل (۱۲)

با مقایسه شکل‌های (۱۴-۱۳) مشاهده می‌شود که در زاویه کجی بالا (۲۰°)، شکل کلی پروفایل سمت هدف در الگوریتم پیشنهادی با سطح سایه لوب -۱۶/۲۵dB و پهنای ۳dB برابر با ۳/۵m حفظ شده است. اما چندین قله، در پروفایل سمت هدف حاصل از الگوریتم برد-داپلر مشاهده می‌گردد.

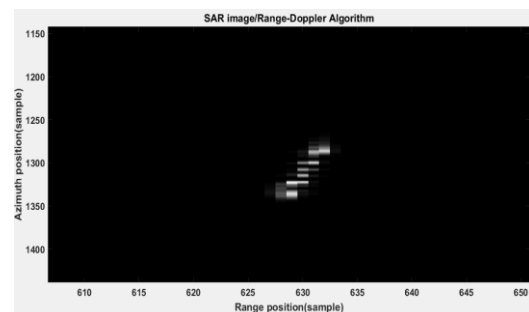
جدول (۴): نتایج شبیه سازی هدف نقطه‌ای با زاویه کجی ۲۰° برای

الگوریتم پیشنهادی	الگوریتم برد-داپلر	
۳/۵ m	۲/۳۷ m	پهنای ۳dB
-۱۶/۲۵ dB	-۰/۶۹ dB	سطح سایه لوب

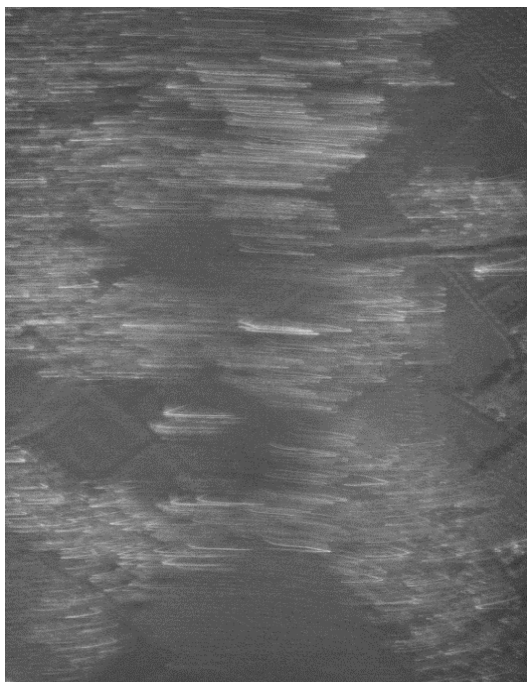
از جدول (۴) مشاهده می‌گردد که در زاویه کجی بالا (۲۰°)، پهنای ۳dB در الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم برد-داپلر افزایش یافته است، اما افزایش سطح سایه لوب در الگوریتم برد-داپلر نسبت به الگوریتم پیشنهادی تغییرات مخرب و چشمگیری دارد. ایجاد چندین قله در پروفایل سمت هدف حاصل از الگوریتم برد-داپلر، باعث می‌شود که هدف نقطه‌ای به صورت چند لکه در تصویر سار دیده شود.



شکل (۱۵): تصویر سار با زاویه کجی ۲۰° (الگوریتم پیشنهادی)



شکل (۱۶): تصویر سار با زاویه کجی ۲۰° (الگوریتم برد-داپلر)



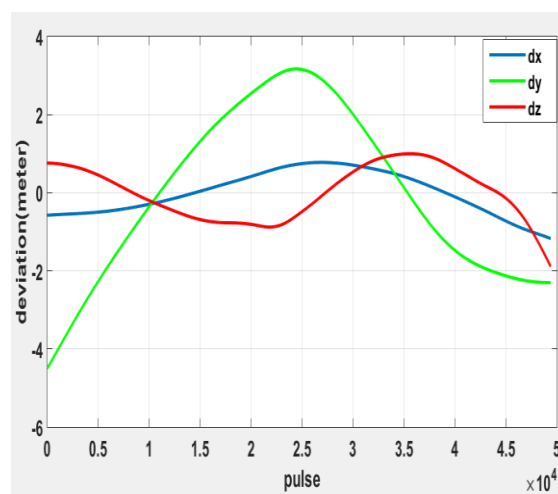
شکل (۱۹): تصویر سار حاصل از شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا بدون جبران‌سازی حرکت



شکل (۲۰): تصویر سار حاصل از الگوریتم پیشنهادی

مقایسه تصاویر سار شکل‌های (۱۹-۲۰) با تصویر ماهواره‌ای گوگل شکل (۱۸)، لزوم جبران‌سازی حرکت در سار هواپایه را نشان می‌دهد. برای مقایسه روش ارائه‌شده در این مقاله با

راستاهای (x, y و z) در دستگاه بدنه هواپیما، بیشترین اطلاعات را در مورد دشواری جبران‌سازی حرکت به ما ارائه خواهد کرد. لذا، این انحرافات در هریک از راستاها در قالب شکل (۱۷) نمایش داده شده است. تصویر ماهواره‌ای گوگل ناحیه تصویربرداری برای مقایسه در شکل (۱۸) آورده شده است. تصویر سار استخراج شده توسط شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا بدون اعمال جبران‌سازی حرکت و الگوریتم پیشنهادی به ترتیب در شکل‌های (۱۹-۲۰) ارائه شده است.



شکل (۱۷): انحرافات حرکتی پرنده در هر یک از راستاهای حرکت (z و y, x)



شکل (۱۸): تصویر ماهواره‌ای گوگل مربوط به شهر جهرم



شکل (۲۳): بزرگنمایی شده تصویر سار حاصل از الگوریتم پیشنهادی

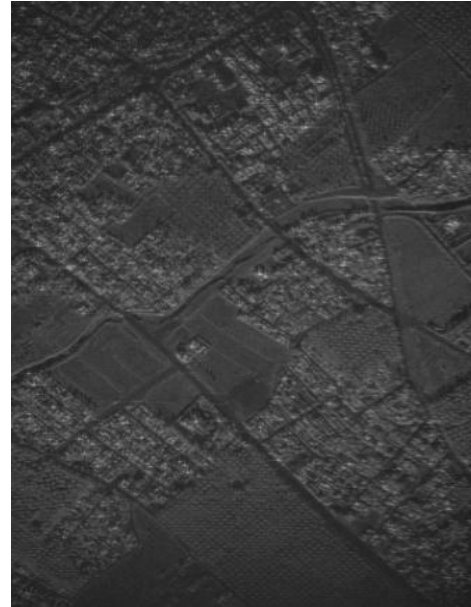
۷. نتیجه گیری

با توجه به اینکه شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا نسبت به شکل دقیق آن، بار محاسباتی به مراتب کمتری دارد، توسعه استفاده از آن در سار هواپایه یک مزیت عمده به حساب می آید. در این مقاله با ارائه اصلاحاتی در شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا امکان اعمال جبران سازی حرکت در آن فراهم شده است. در الگوریتم ارائه شده که در واقع نسخه توسعه یافته شکل تقریبی الگوریتم امگا-کا می باشد، قابلیت جبران اثر اغتشاشات و لرزش های پرنده های سبک افزوده شده است. در این مقاله با استفاده از داده های واقعی اخذ شده توسط سامانه سار هواپایه پژوهشکده مکانیک، کیفیت تصویر استخراج شده با روش استاندارد برد-داپلر مقایسه شده و در نتیجه، کارایی مناسب روش ارائه شده مورد تأیید قرار گرفته است.

۸. منابع

- [1] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data," Artech House, Norwood, 2005.
- [2] W. Carrara, R. Goodman, and R. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms," Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [3] A. Reigber, E. Alivizatos, A. Potsis, and A. Moreira, "Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation," IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 153, pp. 301-310, 2006.
- [4] Li, Yan-lei, et al., "A motion compensation approach integrated in the omega-K algorithm for airborne SAR," 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings. IEEE, 2012.
- [5] Alivizatos, Emmanouil, A. Reigber, and A. Moreira, "SAR processing with motion compensation using the extended wavenumber algorithm," In Proc. EUSAR, pp. 157-160, 2004.

روش های استاندارد حاوی جبران سازی حرکت، تصویر استخراج شده به وسیله الگوریتم برد-داپلر نیز در شکل (۲۱) ارائه شده است.



شکل (۲۱): تصویر سار حاصل از الگوریتم برد-داپلر

مقایسه بصری دو تصویر شکل ۲۰ و شکل ۲۱، نشان دهنده شباهت بسیار زیاد کیفیت تصویر الگوریتم ارائه شده با الگوریتم برد-داپلر و بهبود اندک کنتراست تصویر حاصل از الگوریتم پیشنهادی است. اما برای کمی شدن مقایسه، مقدار PSNR بین تصویر حاصل از الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم برد-داپلر نیز محاسبه شده است که برابر با ۳۰/۶۵dB می باشد. این مقدار بیانگر کیفیت مناسب تصویر و گویای توانایی الگوریتم ارائه شده در جبران اعوجاجات حرکتی می باشد.

در ادامه جهت مقایسه بهتر شکل های (۲۰-۲۱)، بخشی از این شکل ها با بزرگنمایی نشان داده شده اند.



شکل (۲۲): بزرگنمایی شده تصویر سار حاصل از الگوریتم برد-داپلر

-
- [8] J. C. Kirk, "Motion compensation for synthetic aperture radar," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, no. 3, pp. 338-348, 1975.
- [9] H. Hashempur and A. Sheikhi, "Compensating platform motion in radar imaging in stripmap mode," In 20th conference on electrical engineering Iran, 2012.(In persian)
- [10] Al-Najjar, A. Y. Yusra, and D. Chen Soong, "Comparison of image quality assessment: PSNR, HVS, SSIM, UIQI," Int. J. Sci. Eng. Res 3, no. 8, pp. 1-5, 2012.
- [6] A. Reigber, A. Potsis, E. Alivizatos, N. Uzunoglu, and A. Moreira, "Wavenumber domain SAR focusing with integrated motion compensation," In International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 3, pp. III-1465, 2003.
- [7] G. Fornaro, "Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 3, pp. 997-1009, Jul. 1999.

The Extended Version of Approximate Omega-K SAR Focusing with Integrated Motion Compensation

N. Mardaneh, M. Hatam^{*}

^{*} Institute of Mechanics, Shiraz, Iran

(Received: 31/07/2019, Accepted: 13/01/2020)

Abstract

Available processing algorithms to extract stripmap SAR images are able to deal with spaceborne case rather than airborne case, because of atmospheric and platform trajectory disturbances. Flight path information should be provided to the processing unit to compensate motion deviations. Motion compensation through navigation data is usually done in two steps and doesn't change the standard form of the traditional algorithms. Adding motion compensation to the approximate $-k$ algorithm is not so easy and similar to other algorithms. It requires major changes in the standard form of the algorithm and has not been done so far. This modification is the main goal of this article. In this paper, we propose a modified form of approximate $-k$ algorithm which is capable to consider motion compensation, unlike the traditional form. To evaluate the performance of the proposed algorithm, a set of simulated data and real raw data of ISRC SAR system are applied. Comparison of the extracted images indicates the high performance of the proposed algorithm.

Keywords: Airborne SAR, Approximate Version of Omega-K, Motion Compensation

^{*} Corresponding author E-mail: m.hatam@isrc.ac.ir