

آشکارسازی وسایط نقلیه متحرک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای SAR

ابوالفضل آقای میبیدی*^۱، محمد سعادت سرشت^۲، محمدعلی رجبی^۲

^۱دانشجوی دکتری سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
ab_ghaee@yahoo.com

^۲استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
{msaadat, marajabi}@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۱، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۲)

چکیده

با پیشرفت تکنولوژیهای ماهواره‌ای SAR و توسعه‌ی الگوریتمهای پردازشی، همراه با دیگر کاربردهای این نوع سنجنده‌های راداری، امکان آشکارسازی اهداف متحرک زمینی و تعیین سرعت آنها توسط ماهواره‌های سنجش از دور SAR نیز فراهم گشته است. اگرچه قبلاً سیستمهای هوایی SAR و بخصوص در کاربردهای نظامی مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند اما در حال حاضر این امکان در برخی ماهواره‌های سنجش از دور SAR و بمنظور کاربردهای غیر نظامی از جمله نمایش ترافیک وسایل نقلیه در دریا و خشکی و همچنین عملیات جستجو و نجات، بوجود آمده است. در این تحقیق، علاوه بر ارائه‌ی مفاهیم فرایند تشکیل تصویر SAR و تاثیر مولفه‌های حرکت بر آن، شبیه‌سازی‌های مورد نیاز در محیط MATLAB صورت گرفته و نتایج آن ارائه شده است. همچنین روشهای آشکارسازی اهداف متحرک شامل روشهای ATI و DPCA بر روی تصاویر شبیه‌سازی شده پیاده‌سازی گردیدند. در انتها نیز روشهای مورد نظر بر روی تصویر ماهواره‌ی TerraSarX و بمنظور استخراج وسایط نقلیه متحرک پیاده‌سازی شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند.

واژگان کلیدی: تصویر ماهواره‌ای SAR، شناسایی اهداف متحرک زمینی، ATI

۱- مقدمه

تصاویر راداری بدلیل قابلیت‌های منحصر بفرد خود در اخذ اطلاعات در کلیه‌ی شرایط آب و هوایی و در شب و روز، به عنوان داده‌های مناسب در آشکارسازی اهداف، مورد توجه بوده‌اند. از زمانی که تکنیک SAR در سال ۱۹۵۴ توسط Carl Wiley بمنظور دستیابی به تصاویر راداری با توان تفکیک بالا پیشنهاد شد [۱]، سکوه‌های هوایی و فضایی SAR بصورت عملیاتی و در کاربردهای متنوعی شامل انواع کاربردهای نظامی و غیر نظامی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

با توسعه‌ی روز افزون سیستم‌های تصویربرداری و روش‌های پردازش سیگنال SAR، کاربردهای مربوط به رادار از قبیل آشکارسازی، تصویربرداری از تارگتهای متحرک و همچنین تخمین پارامترهای حرکتی، در کاربردهای نظامی و غیرنظامی مد نظر قرار گرفتند. در گذشته، آشکارسازی اهداف متحرک، صرفاً در حوزه‌ی نظامی و توسط سکوه‌های هوایی انجام می‌شده است. اما در حال حاضر علاوه بر سیستم‌های نظامی شناسایی تارگتهای متحرک، سیستم‌های هوابرد متعددی نیز وجود دارند که در حوزه‌ی غیرنظامی، قادر به آشکارسازی اهداف متحرک می‌باشند که از آن جمله می‌توان به PAMIR متعلق به کشور آلمان [۲] و Convair580 متعلق به کشور کانادا [۳] اشاره کرد. اما امروزه با توسعه‌ی تکنولوژی‌های راداری، سنجنده‌های فضایی SAR طراحی و در مدار قرار گرفته‌اند که قادر به پایش و کنترل مناطق وسیع و آشکارسازی وسایط نقلیه‌ی متحرک می‌باشند. در کاربردهای غیرنظامی، این ماهواره‌ها قادر به نمایش ترافیک وسایل نقلیه در دریا و خشکی و همچنین عملیات جستجو و نجات می‌باشند [۴]. در حال حاضر امکان آشکارسازی اهداف متحرک توسط ماهواره‌های سنجنش از دور راداری، در دو ماهواره‌ی RADARSAT-2 و TerraSAR-X بوجود آمده است.

قبل از مساله‌ی آشکارسازی تارگتهای متحرک زمینی، موضوع شناسایی تارگت متحرک از طریق سیستم‌های زمینی مطرح بوده است. در این حالت، فقط آشکارسازی تارگتهای متحرک و بدون نیاز به تشکیل تصویر مورد نظر بوده است. این سیستمها بمنظور آشکارسازی هواپیما و جداسازی آن از دیگر تارگتهای مزاحم از قبیل ساختمان،

درخت، باران و غیره استفاده می‌شدند. در این حالت، پالسهای بازگشتی مختلف مقایسه شده و در صورت تغییر زمان بازگشت پالس، وجود تارگت متحرک اعلام می‌شده است. مفهوم بنیادین که هم در سیستم‌های آشکارسازی کلاسیک و هم سیستم‌های آشکارسازی اهداف متحرک زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شیفت داپلر^۱ می‌باشد. میزان شیفت داپلر، بستگی به سرعت تارگت در جهت خط واصل فرستنده موج و تارگت (جهت برد) دارد. با انتقال سیستم رادار از سطح زمین به سکوه‌های هوایی، علیرغم افزایش قابلیت‌های سیستم‌های آشکارسازی اهداف، چالشهای متعددی نیز ایجاد شد. مهمترین چالش در استفاده از سیستم‌های هوابرد راداری بمنظور مشاهده‌ی تارگتهای متحرک زمینی، وجود تغییرات در پالسهای راداری در اثر بازگشتهای مختلف ناخواسته‌ی موج یا کلاتر^۲ می‌باشد بطوریکه توانایی در آشکارسازی تارگتهای متحرک را با چالشهای جدی روبرو می‌کند.

پردازش داده‌های SAR بمنظور تولید تصویر، اساساً با فرض پدیده‌ی ثابت^۳ توسعه داده شده‌اند. بدین منظور که تمام پیکسل‌های زمینی ثابت فرض شده بطوریکه حرکتی در آنها وجود ندارد. لذا در صورت وجود مولفه‌های حرکتی تارگت، فرایند تشکیل تصویر تارگت متحرک با مشکلاتی مواجه خواهد شد. در این حالت، تارگتهای متحرک به خوبی فوکوس نشده و با توجه به جهت حرکت تارگت، پخش انرژی^۴ و یا جابجایی تارگت در جهت آزیموت رخ خواهد داد. لذا از همین ویژگیها بمنظور آشکارسازی اهداف متحرک و تعیین سرعت آنها استفاده خواهد شد.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

برای اولین بار آقای Raney در سال ۱۹۷۱ به موضوع تارگتهای متحرک در تصاویر SAR پرداخت [۵]. بعد از آن، محققان مختلفی بر روی آشکارسازی و تعیین سرعت تارگتهای متحرک بر روی تصاویر هوایی SAR تحقیقات خود را ارائه نمودند [۶، ۷، ۸ و ۹]. در سال ۲۰۰۰ آقای Thompson و همکارانش، طراحی و قابلیت جدید سنجنده‌ی Radarsat2 را در تشکیل دو آنتن و

۱ Doppler Shift

۲ Clutter

۳ World Stationary

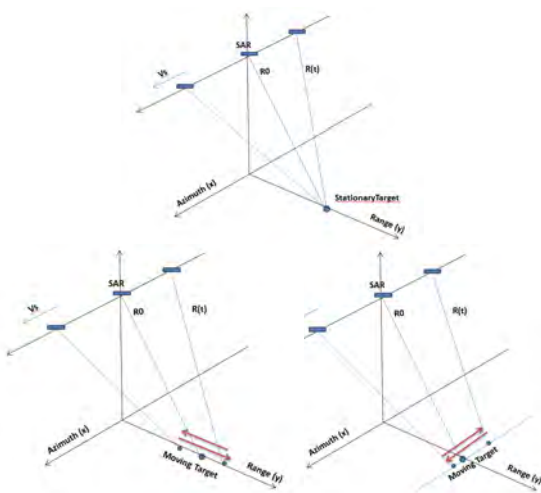
۴ Smearing

مولفه‌های سرعت، مقدار سیگنال دریافتی مطابق $S'(t)$ خواهد بود [۴]:

$$S(t) = a \cdot g(t) \cdot \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} R(t)\right) \quad (1)$$

$$S'(t) = a \cdot w_a \cdot [(V_s - v_x)(t - t_0)] \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} R_0\right) \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} \cdot v_y \cdot (t - t_0)\right)$$

که در آن $v_x, v_y, V_s, R_0, \lambda$ بترتیب شامل طول موج، کوتاهترین فاصله از سنجنده تا تارگت، سرعت سکو، سرعت تارگت در جهت شعاعی و سرعت تارگت در جهت آزیموت می‌باشد. بدین ترتیب تاثیرات دو مولفه‌ی سرعت، به وضوح در رابطه‌ی ۱ نمایان می‌باشد. مولفه‌ی ناشی از سرعت در جهت رادیال، منجر به تغییر در تاریخچه‌ی فاز و ایجاد شیفت داپلر شده و در نهایت باعث جابجایی و تشکیل تصویر تارگت در موقعیت دیگری در جهت آزیموت می‌شود. بدین معنا که در صورت حرکت تارگت در جهت عمود بر حرکت سنجنده، تارگت در هنگام تشکیل تصویر در موقعیتی متفاوت از موقعیت اصلی‌اش در تصویر قرار می‌گیرد که این جابجایی، در جهت آزیموت اتفاق می‌افتد. اما مولفه‌ی حرکتی تارگت در جهت حرکت سکو، منجر به تغییر نسبی سرعت تارگت و سنجنده و در نتیجه تغییر در نرخ مدولاسیون فرکانس شده و لذا کشیدگی و پخش شدن انرژی در جهت آزیموت رخ خواهد داد. شکل ۱ هندسه‌ی تصویربرداری رادار را برای تارگت ساکن و متحرک نشان می‌دهد.



شکل ۱- هندسه تصویربرداری SAR برای یک تارگت ساکن و متحرک در دو جهت کلی موازی با حرکت سنجنده (پایین راست) و عمود بر جهت حرکت سنجنده (پایین چپ)

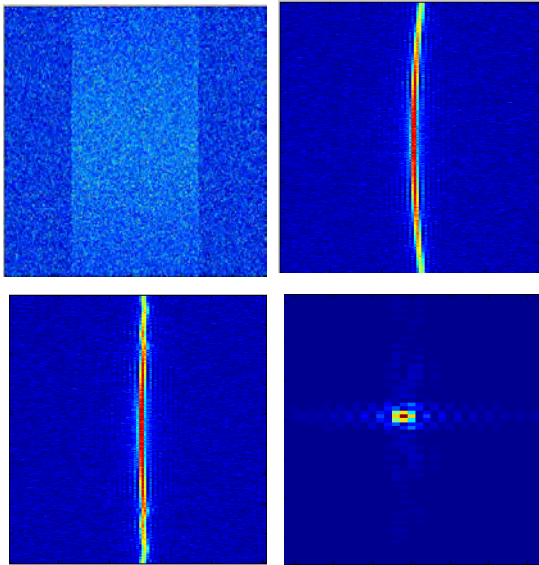
آشکارسازی اهداف متحرک زمینی عنوان نمودند [۱۰]. همچنین Gierull و همکارانش در ۲۰۰۴، تحقیقی را بر روش مناسب برای آشکارسازی تارگت متحرک از تصویر Radarsat2 ارائه نمودند [۱۱]. بدین ترتیب مطالعات متعددی در این حوزه صورت گرفته و روشهای مختلف بررسی و ارائه شده‌اند. دو روش اصلی که بمنظور آشکارسازی اهداف متحرک زمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل روشهای DPCA و ATI بوده‌اند که در تحقیقات مختلف این روشها بررسی و بهبود یافته‌اند. Shen Chiu و همکارانش در سال ۲۰۰۵، نتایج حاصل از مقایسه‌ی این دو روش را بر داده‌های Radarsat2 ارائه نمودند [۱۲].

در ادامه به فرایند تشکیل تصویر SAR و چگونگی تصویر شدن تارگت متحرک در هنگام تصویربرداری اشاره می‌گردد.

۳- تشکیل تصویر SAR و تاثیر مولفه‌های حرکتی تارگت بر آن

فرایند تشکیل تصویر SAR، شامل پردازشهای سنگین و پیچیده‌ی تبدیل سیگنال‌های خام به تصویر مختلط می‌باشد. در این فرایند، از سیگنال‌های مرجع بمنظور فشرده‌سازی سیگنال در دو جهت برد^۱ و آزیموت^۲ استفاده می‌شود. سیگنال‌های مرجع که بمنظور فشرده‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند بر اساس فرض زمین ثابت ساخته می‌شوند. حال در صورتیکه تارگت، دارای مولفه‌ی حرکتی باشد، این فرض ثابت بودن تارگت، غیرمعتبر گشته لذا سیگنال مرجع نادرستی تولید و بر سیگنال دریافتی اعمال می‌شود. این امر موجب می‌شود که تشکیل تصویر تارگت متحرک با مشکلاتی روبرو شود. مولفه‌های حرکت تارگت، شامل سرعت و شتاب در جهت شعاعی (جهت بردار برد مایل) و سرعت و شتاب در جهت حرکت سنجنده (آزیموت) می‌باشد. مولفه‌های سرعت در دو جهت شعاعی و آزیموت، تاثیرات عمده و متفاوتی را بر نحوه‌ی تشکیل تصویر می‌گذارند. در صورتیکه $S(t)$ سیگنال دریافتی برای هر تارگت ثابت در نظر گرفته شود، در صورت وجود

^۱ Range Compression
^۲ Azimuth Compression



شکل ۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیگنال خام تصویر SAR حاصل از یک تارگت نقطه‌ای (الف)، فشرده‌سازی در جهت برد (ب)، تصحیح RCMC (ج) و تصویر فوکوس شده‌ی نهایی حاصل از فشرده‌سازی در جهت آزیموت (د)

حال در صورتی‌که تارگت، ثابت نبوده و دارای سرعتی معادل ۳ متر بر ثانیه در جهت برد و یا آزیموت باشد، تاثیرات مولفه‌های سرعت در تشکیل تصویر تارگت متحرک، برای هر دو حالت به شکل جداگانه شبیه‌سازی شده و در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، مولفه حرکت در جهت عمود بر حرکت سنجنده، منجر به جابجایی تارگت در جهت آزیموت می‌شود (بالا) این در حالیست که مولفه‌ی سرعت در جهت موازی با حرکت سنجنده، فقط منجر به کشیدگی تارگت در جهت آزیموت شده و هیچ جابجایی برای تارگت رخ نخواهد داد (پایین). این در حالیست که در صورتی‌که بردار سرعت هم دارای مولفه‌ی موازی و هم عمود بر جهت حرکت سنجنده باشد، جابجایی تارگت و کشیدگی آن همزمان اتفاق می‌افتد.

میزان جابجایی تارگت بدلیل مولفه‌ی سرعت در جهت رادیال و همچنین میزان کشیدگی آن بدلیل مولفه‌ی سرعت در جهت آزیموت، به بزرگی بردار سرعت بستگی دارد. میزان جابجایی و پخش انرژی سیگنال در جهت آزیموت، در حالت تارگت متحرک، بترتیب از دو رابطه‌ی ذیل محاسبه می‌گردد:

$$D_{az} = R_0 \frac{v_y}{V_p} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$FM(v_x) = \frac{-2(V_p - v_x)^2}{\lambda \cdot R_0}$$

بمنظور بررسی تاثیرات مولفه‌های حرکت تارگت متحرک بر نحوه‌ی تشکیل تصویر، ابتدا فرایند تشکیل تصویر از یک تارگت نقطه‌ای که در مرکز تصویر واقع شده است، شبیه‌سازی و سپس با معرفی بردارهای حرکتی مختلف، تاثیرات آنها بر تشکیل تصویر تارگت نقطه‌ای متحرک، بررسی می‌گردد. بمنظور تشکیل تصویر SAR شبیه‌سازی شده از تارگت نقطه‌ای، ابتدا تصویر خام مختلط حاصل از سیگنال‌های بازگشتی از تارگت مورد نظر شبیه‌سازی و سپس فوکوس کردن آن با استفاده از روش RDA^۱ انجام شده است. در این روش، ابتدا فشرده‌سازی تصویر خام در جهت برد صورت گرفته و با توجه به ایجاد پدیده‌ی تغییر برد در اثر تغییرات فاصله تا تارگت بدلیل حرکت سنجنده، تصحیحی به نام RCMC^۲ انجام و در نهایت فشرده‌سازی در جهت آزیموت صورت می‌گیرد. شکل ۲، تصویر خام شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله در مراحل مختلف را برای یک سیستم SAR هوایی با مشخصات جدول ۱ نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات یک سیستم SAR هوایی بمنظور شبیه‌سازی

height_of_platform (H)	۱۴ Km
sensor_velocity(v)	۲۰۰ m/s
lookangle(θ)	۴۵ deg
central_frequency(f _c)	۸ Ghz (Xband)
Antenna_Length	۱ m
Pulse_duration(τ)	۲.۵ μs
Signal_bandwidth	۱۰۰ Mhz
PRF	۶۰۰ Hz

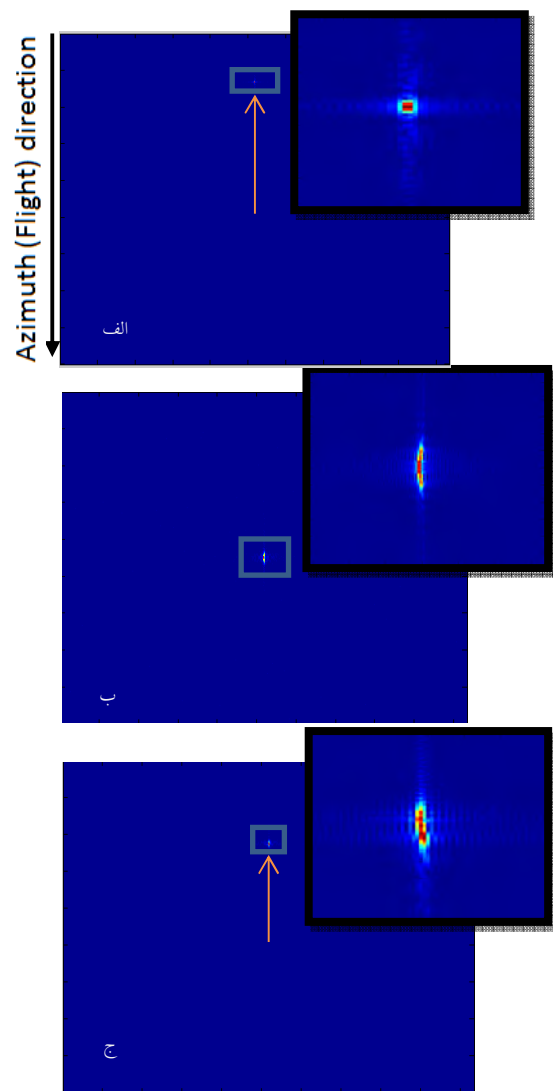
^۱ Range Doppler Algorithm

^۲ Range Cell Migration Correction

نمی‌باشد. لذا استفاده از سیستم‌های SAR با سه کانال مورد تحقیق قرار گرفته بطوریکه ابهامات موجود را نیز برطرف خواهد نمود. اما در حال حاضر، سیستم‌های تجاری و غیرنظامی SAR با سه و بیش از سه کانال در اختیار نیستند. تنها سیستم‌های ماهواره‌ای موجود شامل ماهواره‌های TerraSAR-X و Radarsat2 می‌باشند که علی‌رغم اینکه به یک آنتن منفرد مجهز شده‌اند، امکان سوئیچ کردن آنتن و تشکیل دو آنتن در امتداد حرکت ماهواره، بصورت یک مد آزمایشی فراهم شده است. با توجه به تاثیرات متفاوت مولفه‌های حرکتی تارگت در جهت پرواز و عمود بر آن، روش‌های مختلفی نیز ارائه گردیده است. بطور کلی، الگوریتم‌ها و روش‌های آشکارسازی و تخمین پارامترهای تارگت متحرک به دو صورت می‌باشند: روش‌های مبتنی بر داده‌های خام و روش‌های مبتنی بر تصویر [۱۱]. در روش‌های مبتنی بر داده‌های خام از فرایند تشکیل تصویر بمنظور آشکارسازی تارگت‌های متحرک استفاده می‌شود. اما در روش‌های مبتنی بر تصویر، الگوریتم‌های مورد نظر بر روی داده‌های مختلط SLC اعمال می‌گردد. با توجه باینکه داده‌های خام SAR در اختیار نمی‌باشد، فقط روش‌های مبتنی بر تصویر مورد بررسی و پیاده‌سازی قرار گرفته‌اند. در حال حاضر روش‌های اصلی آشکارسازی تارگت‌های متحرک شامل سه روش ATI، DPCA و FBM می‌باشند که به اختصار ارائه می‌گردند.

۴-۱- روش ATI^۱

سیستم‌های SAR که بمنظور آشکارسازی تارگت‌های متحرک زمینی طراحی گردیده‌اند، از دو آنتن تشکیل شده‌اند که در راستای حرکت سنجنده و بفاصله‌ی مشخصی از یکدیگر (B_{ATI}) قرار گرفته‌اند. شکل ۴، هندسه‌ی سیستم تصویربرداری SAR-ATI را نشان می‌دهد. در تکنیک ATI از دو مرکز آنتن مجزا که در امتداد مسیر پرواز سنجنده واقع شده‌اند استفاده می‌شود [۱۳]. سیگنال‌های اخذ شده از این دو مراکز فاز، در یک بازه‌ی زمانی برابر با فاصله‌ی که سنجنده از مرکز فاز اول به دوم و در جهت پرواز می‌پیماید، منجر با تشکیل تصویر می‌شوند. بنابراین عوارض ثابت در هر دو



شکل ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی تاثیر مولفه‌ی بردار سرعت متحرک در سه حالت: فقط مولفه‌ی حرکت در جهت عمود بر آزیموت (الف)، فقط موازی با جهت آزیموت (ب) و وجود هر دو مولفه‌ی سرعت (ج)

۴- روش‌های آشکارسازی و تعیین سرعت تارگت‌های متحرک از داده‌های SAR

در سیستم‌های سنتی آشکارسازی اهداف متحرک، از سیستم‌های تک کاناله استفاده می‌شده است. اما این روش‌ها با چالش‌های و محدودیت‌های زیادی همراه بوده است. بعد از آن، استفاده از سیستم‌های دو کاناله در آشکارسازی تارگت متحرک متداول گردید. اگرچه با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان آشکارسازی و تعیین پارامترهای سرعت تارگت متحرک را تعیین نمود اما در این روش‌ها، ابهامات فاز و در نتیجه ابهام سرعت قابل حل

^۱ Along Track Interferometry

یک عملیات خطی می‌باشد، لذا می‌توان این روش را بر داده‌های خام نیز اعمال کرد.

$$DPCA(t) = S_1(t) - S_2(t) \quad (5)$$

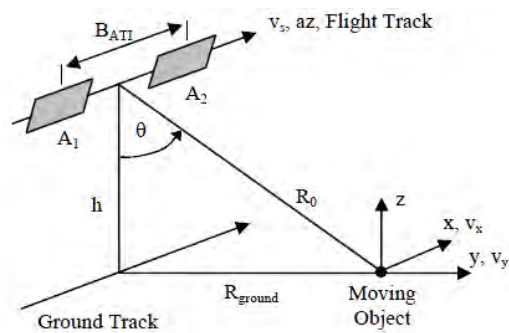
با توجه به اینکه این تفاضل متناسب با سینوس سرعت تارگت در جهت رادیال می‌باشد، لذا در این روش تارگت‌های با سرعت پایین به شدت توسط کلاتر محو می‌شوند و در نتیجه این روش برای تارگت‌های با سرعت بالا مناسب است. روش DPCA فرم ساده شده‌ی روش STAP^۲ می‌باشد بطوری‌که روش STAP برای بیش از دو آنتن مورد استفاده قرار گرفته است. این روش تنها به مولفه‌ی سرعت در جهت رادیال (یا جهت عمود بر مسیر سنجنده) حساس بوده و فقط قادر به آشکارسازی تارگت‌های متحرکی می‌باشد که دارای این مولفه از سرعت باشند.

۴-۳- روش FBM^۳

همانطور که قبلاً اشاره شد، روش‌های ATI و DPCA وقتی قابل استفاده هستند که فاز اینترفرومتری وجود داشته باشد و این حالت فقط هنگامی رخ می‌دهد که تارگت دارای مولفه‌ی سرعت در جهت عمود بر مسیر سنجنده باشد. در صورتی‌که تارگت صرفاً در جهت آزیموت حرکت کند، این روش‌ها قابل استفاده نمی‌باشند. همانطور که قبلاً گفته شد، وجود مولفه‌ی سرعت در جهت آزیموت، منجر به تغییر در نرخ فرکانس داپلر شده و در نتیجه فرایند فشرده‌سازی در جهت آزیموت که بوسیله‌ی یک سیگنال رفرنس صورت می‌گیرد بخوبی انجام نشده و پخش انرژی تارگت در جهت آزیموت رخ می‌دهد. یکی از روش‌های آشکارسازی و تعیین مولفه‌ی سرعت تارگت در جهت آزیموت، استفاده از سرعت‌های مختلف و جایگزینی آن در سیگنال رفرنس به نحوی که کمترین پخش انرژی اتفاق بیفتد. در این صورت سرعت تارگت قابل تعیین می‌باشد. هنوز این روش، به عنوان بهترین روش برای تعیین مولفه‌ی سرعت در جهت آزیموت مطرح می‌باشد.

تصویر، یکسان بوده در حالیکه تارگت‌های متحرک منجر به شیفت فاز بین دو تصویر خواهند شد لذا با محاسبه‌ی اینترفروگرام می‌توان این شیفت فاز را آشکارسازی و تعیین نمود. بمنظور محاسبه‌ی اینترفروگرام باید ابتدا دو تصویر کاملاً نسبت به هم ثبت هندسی شده و سپس تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم ضرب شود. بدین ترتیب فاز اینترفرومتری، آرگومان این ضرب مختلط خواهد بود. در صورتیکه S_1, S_2 ، تصاویر اخذ شده توسط دو آنتن باشند، اینترفروگرام مطابق ذیل محاسبه می‌گردد:

$$ATI(t) = S_1(t)S_2^*(t) = |S_1(t)||S_2(t)|\exp(j[\phi_1(t) - \phi_2(t)]) \quad (3)$$



شکل ۴- هندسه‌ی سیستم تصویربرداری SAR-ATI

این روش وقتی می‌تواند بمنظور آشکارسازی تارگت متحرک استفاده شود که فاز اینترفرومتری وجود داشته باشد و این در حالتی است که مولفه‌ی سرعت در جهت عمود بر مسیر حرکت سنجنده غیرصفر باشد. فاز ATI برای تارگت‌های ساکن و یا تارگتهایی که بطور کامل در جهت آزیموت (جهت حرکت سنجنده) حرکت داشته باشد، صفر خواهد بود. رابطه‌ی فاز ATI با مولفه‌ی سرعت در جهت عمود بر مسیر سنجنده، مطابق ذیل می‌باشد:

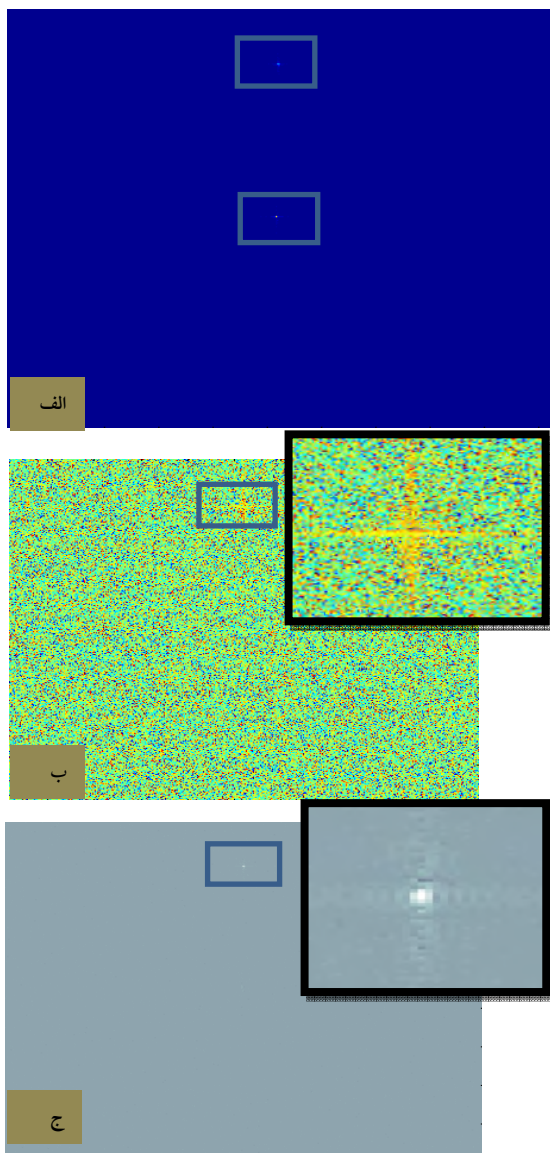
$$\phi_{ATI} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot B_{ATI} \cdot \frac{v_y \cdot \sin \theta}{V_p} \quad (4)$$

۴-۲- روش DPCA^۱

در این روش، تصاویر مختلط اخذ شده توسط دو آنتن یا بیشتر که کاملاً نسبت بهم ثبت هندسی شده‌اند، از هم تفاضل شده و اختلاف بین آنها می‌تواند منجر به حذف پیکسل‌های ثابت شود [۱۲]. از آنجایی‌که پردازش SAR

^۲ Space Time Adaptive Processing
^۳ Filter Bank Method

^۱ Displaced Phase Center Antenna



شکل ۵ - نتایج حاصل از شبیه‌سازی تشکیل تصویر SAR دو تارگت نقطه‌ای ساکن و متحرک (الف)، پیاده‌سازی روش ATI (ب) و روش DPCA (ج)

۶- آشکارسازی وسایط نقلیه متحرک از تصاویر ماهواره‌ای TerraSAR-X با استفاده از روشهای ATI و DPCA

ماهواره TerraSAR-X به عنوان یک پروژه مشترک بین سازمان فضایی آلمان و شرکت ASTRIUM آلمان و در سال ۲۰۰۷ بصورت عملیاتی مورد استفاده قرار گرفت. این ماهواره‌ی پهلونگر در محدوده‌ی X امواج راداری، فعال بوده و دارای مدهای Stripmap، Spotlight و ScanSAR می‌باشد. اما این ماهواره، علاوه بر مدهای عملیاتی فوق،

۵- پیاده‌سازی دو روش ATI و DPCA بر روی تصاویر SAR شبیه‌سازی شده بمنظور آشکارسازی اهداف متحرک

بمنظور مشاهده‌ی نتایج دو روش ATI و DPCA، دو تصویر SAR هوایی حاصله از دو آنتن مجزا که به فاصله‌ی مکانی ۰/۵ متر از یکدیگر فرض شده که در امتداد جهت آزمایش قرار گرفته‌اند، شبیه‌سازی شده‌اند. بمنظور بررسی بهتر نتایج، دو تارگت نقطه‌ای و جداگانه بفاصله‌ی ۵ پیکسل از یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند که یکی ثابت و دیگری دارای مولفه‌ی سرعت عمود بر جهت حرکت سنجنده و به میزان سه متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه اینکه دو تصویر در فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاهی توسط دو آنتن اخذ شده‌اند، دو تصویر دامنه‌ی اخذ شده کاملاً به هم شبیه هستند. در هر یک از تصاویر دامنه، دو تارگت دیده می‌شوند بطوریکه تارگت ساکن در وسط تصویر و تارگت دیگر که به اندازه‌ی پنج پیکسل در مجاورت تارگت اول در نظر گرفته شده بود، بدلیل مولفه‌ی سرعت در جهت عمود بر آزمایش، جابجا شده و تصویر آن در نقطه‌ی دیگری تشکیل شده است. حال با مشاهده‌ی صرفاً تصویر دامنه، تشخیص تارگت متحرک از تارگت ساکن، امکان‌پذیر نمی‌باشد. اما با تشکیل اینترفروگرام و با استفاده از فاز اینترفرومتری، توسط دو روش فوق، تارگت متحرک قابل آشکارسازی می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ الف ملاحظه می‌گردد، تصویر دامنه‌ی دو تارگت نقطه‌ای که در مجاورت هم در نظر گرفته شده بودند، بفاصله‌ای از یکدیگر تصویر شده‌اند و تشخیص تارگت متحرک از ساکن ممکن نمی‌باشد. اما با اعمال روش ATI در شکل ۵ ب ملاحظه می‌گردد که وجود فاز اینترفرومتری تارگت متحرک، آنرا قابل تشخیص ساخته است. شکل ۵ ج نیز، نتیجه حاصل از روش DPCA را نشان می‌دهد.

نقاط با فاز بالا در دو طرف جاده‌ی مورد نظر می‌باشد که دارای مقادیر فاز مثبت و منفی می‌باشند. همانطور که از مفاهیم تئوری برداشت می‌شود، در صورتیکه وسیله‌ی نقلیه دارای مولفه‌ی عمود بر مسیر حرکت سنجنده و در جهت نزدیک شدن به سنجنده باشد، مولفه‌ی سرعت، منفی بوده و لذا جابجایی مثبت و در جهت حرکت سنجنده رخ خواهد داد. اما در صورتیکه متحرک از سنجنده دور شود، جابجایی در جهت آزیموت، در جهت خلاف حرکت ماهواره می‌باشد.

لذا در تصویر فاز اینترفرومتری ایجاد شده نیز وجود پیکسل‌های دارای فاز بالای مثبت و منفی مشاهده می‌شود. حال با توجه به اینکه حرکت سنجنده از نوع پایین‌رونده بوده است، لذا فازهای بالای ایجاد شده در سمت پایین جاده‌ی مورد نظر که دارای علامت مثبت می‌باشند، نشان‌دهنده‌ی تارگت‌های متحرکی می‌باشند که مولفه‌ی حرکتی آنها به سمت ماهواره بوده است در حالی که فازهای مشخص شده در بالای جاده که دارای علامت منفی هستند، تارگت‌هایی را نشان می‌دهند که در حال دور شدن از سنجنده می‌باشند.

شکل ۶، توزیع تارگت‌های استخراج شده بروش DPCA را بصورت مربع‌های قرمز و زرد نشان می‌دهد که تارگت‌های مشخص شده با مربع‌های زرد که در بالای جاده‌ی اصلی عبور کننده از وسط تصویر نشان داده شده‌اند، شامل وسایل نقلیه متحرکی هستند که حرکت آنها در جهت دور شدن از ماهواره بوده و تارگت‌های مشخص شده با رنگ قرمز که در پایین جاده‌ی مورد نظر آمده‌اند، تارگت‌هایی را نشان می‌دهند که جهت حرکت آنها به سمت ماهواره می‌باشد.

دارای یک مد آزمایشی به نام 1^{DRA} می‌باشد که امکان آشکارسازی اهداف متحرک را فراهم می‌نماید. در این حالت، آنتن سنجنده می‌تواند بصورت الکترونیکی به دو بخش فرستنده و گیرنده تقسیم شده و لذا دو آنتن در بازه‌ی مکانی حدود $1/19$ متر تشکیل می‌گردد که تصاویر اخذ شده توسط این دو آنتن می‌توانند بمنظور آشکارسازی اهداف متحرک استفاده شوند. داده‌ی مورد نظر که شامل دو تصویر اخذ شده در فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاه بوده و مشخصات آن مطابق جدول ۲ ارائه شده است، بگونه‌ای انتخاب و تهیه شدند که جاده‌های مناسب (ترجیحا بزرگراه) در آن وجود داشته باشد تا از وجود تارگت متحرک اطمینان حاصل گردد. این تصاویر توسط نرم افزار DORIS خوانده شده و با انجام فرایندهای ثبت هندسی و حذف اثرات مختلف، اینترفروگرام حاصل از این دو تصویر تشکیل گردید. لذا با داشتن اینترفروگرام حاصله و با استفاده از فاز اینترفرومتری، دو روش ATI و DPCA بمنظور آشکارسازی وسایل نقلیه‌ی متحرک، پیاده‌سازی شدند.

جدول ۲- مشخصات TerraSAR-x

<i>height_of_platform (H)</i>	۱۴ Km
<i>sensor_velocity (v)</i>	۷۴۸۹ m/s
<i>lookangle (θ)</i>	۴۱deg
<i>central_frequency(f_c)</i>	۹.۶۵ GHz(Xband)
<i>Antenna_Length</i>	۴.۸ m
<i>AntennasBaseline</i>	۱.۱۹
<i>Signal_bandwidth</i>	۱۵۰ Mhz
<i>PRF</i>	۶۲۰۹ Hz

همانطور که در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص گردید، با پیاده‌سازی روش ATI و محاسبه‌ی اینترفروگرام، وجود فازهای بالا در تصویر فاز اینترفرومتری ملاحظه گردید بگونه‌ای که در فاصله‌ی مشخصی از جاده‌ی اصلی مورد نظر قرار گرفته‌اند. تشخیص تارگت‌های با فاز بالا از روی فاز اینترفرومتری، بدلیل وجود نویز زیاد و وجود پیکسل‌های متعدد با فاز بالا، جداسازی تارگت‌های متحرک را با مشکل مواجه می‌نماید. اما با اعمال روش DPCA ملاحظه می‌شود که بدلیل حذف پیکسل‌های نویز با فاز بالا، تشخیص این پیکسل‌ها بهبود یافته است. آنچه که در نتایج این دو روش ملاحظه می‌شود، وجود دو دسته

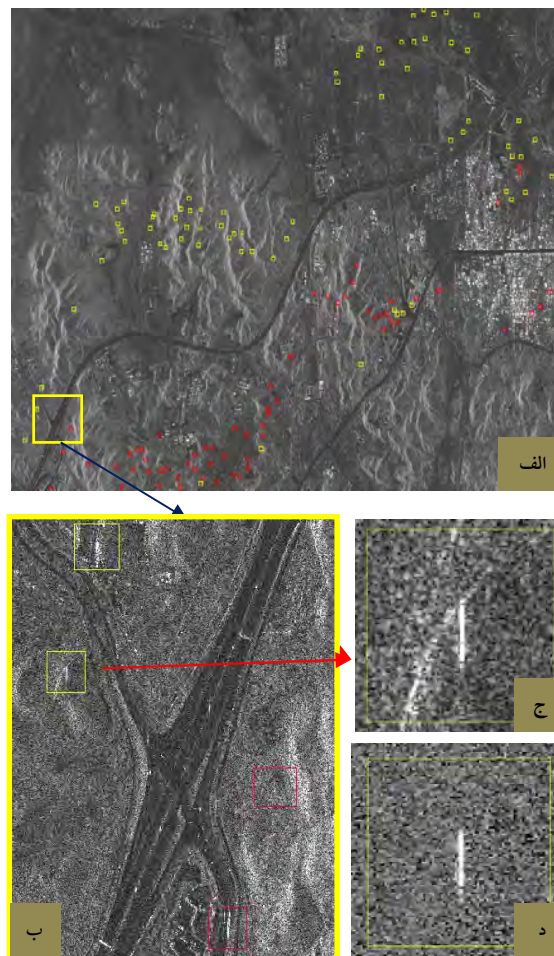
^۱ Dual Receive Antenna

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نحوه‌ی تشکیل تصاویر راداری SAR با فرض ثابت بودن کلیه عوارض و حرکت نسبی سنجنده نسبت به آنها، صورت می‌گیرد. حال در صورت وجود مولفه‌ی حرکتی در تارگت، فرایند فوکوس نمودن و در نتیجه تشکیل تصویر تارگت متحرک، با اشکالاتی همراه خواهد شد. لذا علیرغم این مشکلات، از این ویژگی‌ها بمنظور آشکارسازی اهداف متحرک استفاده می‌گردد. در این مقاله، روش‌های کلی در آشکارسازی وسایل نقلیه متحرک از روی تصاویر ماهواره‌ای راداری TerraSAR-X پیاده‌سازی شده و به روش بصری استخراج گردیدند. در این مقاله، در ابتدا با توجه به اهمیت مفاهیم تشکیل تصویر SAR، این فرایند شبیه‌سازی شده و نتایج آن ارائه گردیدند. همچنین تاثیرات مولفه‌ی حرکتی نیز با استفاده از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل گردیدند.

نتایج بدست آمده بر روی تصویر واقعی، بخوبی نشان داده است که تارگت‌های متحرک با توجه به جهت حرکت و در نتیجه مولفه‌های حرکتی آنها، بفاصله‌ی مشخصی در دو طرف جاده تصویر شده‌اند که در صورت عدم استفاده از روش‌های آشکارسازی، امکان جداسازی آنها از تارگت‌های ثابت، ممکن نمی‌باشد. فاصله‌ی وسایل نقلیه‌ی متحرک تا جاده، به زاویه‌ی جاده و سرعت وسیله‌ی نقلیه بستگی دارد. بدیهی است که هرچه جهت جاده به امتداد حرکت سنجنده نزدیک شود، میزان جابجایی کمتر و پخش انرژی تارگت بیشتر خواهد شد.

در این تحقیق، استخراج تارگت‌های متحرک از روی اطلاعات فاز اینترفرومتری و تصویر DPCA بصورت بصری صورت پذیرفته است. علاوه بر اطلاعات فوق بمنظور تفسیر بهتر، از اطلاعات دامنه نیز استفاده شده است. ضمناً با توجه باینکه تصویر دیگری با اختلاف زمانی ۱۱ روز از همین منطقه در اختیار بوده است، به عنوان اطلاعات کمکی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقات بعدی، استخراج اتوماتیک تارگت‌های متحرک صورت خواهد پذیرفت. ضمن اینکه در این تحقیق فقط به آشکارسازی اهداف متحرک بسنده شده است. این در حالیست که با آشکارسازی هدف متحرک



شکل ۶- وسایل نقلیه متحرک آشکارسازی شده از تصویر ماهواره‌ای TerraSAR-X که توسط مربعهای کوچک قرمز و زرد مشخص شده- اند(الف)، تصویر بزرگنمایی شده‌ی بخش از تصویر (ب) تصویر دامنه (ج) و تصویر حاصل از مدل DPCA (د)

یکی از نکاتی که به وضوح در نتایج حاصله دیده می‌شود، پخش‌شدگی انرژی مربوط به تارگتهایی است که دارای مولفه‌ی سرعت در جهت آزیموت (جهت حرکت ماهواره) می‌باشند. همانطور که در شکل ۶- ب دیده می‌شود، یک جاده‌ی اریب در منطقه وجود داشته و لذا وسیله‌ی نقلیه‌ی متحرک در این جاده، بدلیل زاویه جاده، دارای مولفه‌ی سرعت در جهت آزیموت، علاوه بر جابجایی در جهت آزیموت، پخش انرژی نیز در این تارگت اتفاق افتاده است(شکل ۶- ج). در این حالت همانطور که ملاحظه می‌شود، میزان جابجایی، کمتر از تارگت‌هایی می‌باشد که در جاده‌ی که جهت آن در مسیر عمود بر حرکت ماهواره بوده‌اند حرکت کرده‌اند.

سپاسگزاری

در انتها لازم می‌دانیم از آژانس فضایی آلمان بخاطر در اختیار قرار دادن تصویر ماهواره‌ای TerraSAR-X تشکر بعمل آوریم.

و استخراج فاز اینترفرومتری مرتبط، مولفه‌ی سرعت در جهت رادیال قابل محاسبه می‌باشد. لذا در تحقیق بعدی، استخراج سرعت متحرک نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] Raney, R. K. (1982). Processing Synthetic. Aperture Aadar data. International Journal of Remote Sensing, 3(3):243–257.
- [2] Joachim H. G. Ender and Andreas R.Brenner.(2005). PAMIR - A Wideband Phased Array SAR/MTI System. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 150(3):165-172, June
- [3] Ishuwa Sikaneta and John Campbel.(2001) The Convair 580 Along Track INSAR Processor, Documentation, Guaide and History. Technical Memorandum. Defence R&D Canada, August
- [4] Gierull, C. H. and Sikaneta, I. C. (2003). Raw Data based two aperture SAR moving target indication in Proceeding of IGARSS.
- [5] Raney, R. K. (1971). Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 7(3):499–505.
- [6] Coe, D. J. and White, G. (1996). Experimental moving target detection results from a three- beam airborne SAR. *AE "U International Journal of Electronic Communication*, 50(2):157–164.
- [7] Ender, J. (1996). Detection and Estimation of Moving Target Signals by Multi-Channel SAR. *AE "U International Journal of Electronic Communication*, 50(2):150–156.
- [8] Lombardo, P. (1996). DPCA processing for SAR moving targets detection in the presence of internal clutter motion and velocity mismatch. In *SPIE Proceedings*, volume 2958, pages 50– 61, Taormina, Italy.
- [9] Werness, S. A., Stuff, M. A., and Fienup, J. R. (1990b). Two-dimensional imaging of moving targetes in SAR data. In *Proceedings of the 24th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computing*, paper MP5, pages 16–22, Monterrey, California.
- [10] Thompson, A. and Livingstone, C. (2000). Moving target performance for RADARSAT-2. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, volume 6, pages 2599–2601, Honolulu, Hawaii.
- [11] Gierull, C. H. and Livingstone, C. (2004). SAR-GMTI concept for RADARSAT-2. In Klemm, R., editor, *The Applications of Space-Time Processing*. IEE Press, Stevenage, UK.
- [12] Chiu,s and Livingstone,c. (2005).A comparison of Displaced Phase Centre Antenna and Along-track linterferometry techniques for RADARSAT-2 ground moving target indication. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 31, No. 1, pp. 37–51
- [13] Chiu, S. (2002). SAR along-track interferometry with application to RADARSAT-2 ground moving target indication. In *SPIE International Symposium on Remote Sensing*, volume 4885, pages 246–255.