

تخمین پارامترهای هدف متحرک زمینی در رادار دهانه مصنوعی لوچ تک آنتنی

سید محمد ذبیحی مداح^۱، سید علیرضا سیدین^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت: ۹۵/۰۷/۲۹؛ پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۳)

چکیده

در این مقاله با در نظر گرفتن یک زاویه لوچ برای رادار دهانه مصنوعی در شیوه نواری، روشی برای تخمین پارامترهای هدف متحرک با شتاب ثابت ارائه شده است. وجود مرکز داپلر غیر صفر و اتصال میان برد و سمت در حالت لوچ سبب پیچیده شدن معادلات و به وجود آمدن ابهام داپلر می‌گردد. بنابراین، تبدیل کی استون کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین روش تبدیل رادون در حالت لوچ برای تعیین مرکز داپلر بدون ابهام، دقت کافی ندارد. بنابراین، روشی برای بهبود دقت تبدیل رادون با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر هندسه ارائه می‌شود که می‌تواند مهاجرت برد خطی را به خوبی اصلاح کند. سپس با استفاده از روش تبدیل فوریه چندجمله‌ای، پارامترهای داپلر مرتبه دو، سه و همچنین با تخمین پهنای باند داپلر، زمان دهانه مصنوعی هدف متحرک به دست می‌آید. شبیه‌سازی دقت روابط و قدرت الگوریتم پیشنهادی را برای تخمین پارامترهای هدف، تنها با یک آنتن تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی

رادار دهانه مصنوعی، زاویه پرتو لوچ، هدف متحرک زمینی، تخمین پارامترها.

۱. مقدمه

رادار دهانه مصنوعی^۱ (SAR) به منظور تصویربرداری از زمین و اهداف ساکن در شرایط آب و هوایی مختلف معرفی شده است. در عین حال برای استفاده از آن در کارهای نظامی، مانند آشکارسازی هدف متحرک زمینی^۲ (GMTI)، تصویرسازی، موقعیت‌یابی و تخمین پارامترهای هدف متحرک، تحقیقات گسترده‌ای تاکنون انجام گرفته است [۱-۲]. در عمل حرکت هدف باعث تفاوت میان پارامترهای داپلری هدف و کلاتر (اهداف ساکن) می‌گردد که نتیجه آن محوشدگی^۳، جابجایی مکانی (ابهام سمت^۴)، عدم تقارن لوب‌های فرعی و به وجود آمدن ابهام، به‌ویژه برای اهداف سریع می‌باشد [۳-۴]. اگرچه الگوریتم‌های گوناگونی برای تصویرسازی اهداف متحرک پیشنهاد شده‌اند [۵-۷]، اما در اغلب سناریوها برای به دست آوردن تصویر دقیق از هدف متحرک نیاز به محاسبه پارامترهای حرکتی هدف است که شامل سرعت و شتاب در جهت برد و سمت می‌باشد. روش‌های GMTI به دو دسته تک آنتنی^۵ و چند آنتنی^۶ تقسیم می‌شوند [۸]. آشکارسازی اهداف

متحرک برای سامانه SAR تک آنتنی در شرایط نسبت سیگنال به کلاتر به علاوه نویز^۷ (SCNR) بالا، خوب کار می‌کند، اما تخمین پارامترهای حرکتی هدف که مبتنی بر روابط حرکت هدف می‌باشد با توجه به تعداد روابط محدود در تک آنتنی کاهش می‌یابد و عملاً تخمین همه پارامترهای هدف و موقعیت آن در تک آنتنی امکان ندارد [۹].

سامانه SAR جانب نگر^۸، امواج مغناطیسی را در یک جهت خاص و با پرواز بر همان ناحیه دریافت می‌کند. بنابراین دارای کاربرد محدود می‌باشد. در حالی که سامانه SAR لوچ^۹ با افزایش قابلیت انعطاف می‌تواند تصویرسازی از اهداف را در یک ناحیه مشخص بدون پرواز بر آن ناحیه انجام دهد که سبب افزایش امنیت سکوی حامل رادار می‌گردد و در کاربردهای نظامی بسیار حائز اهمیت است. در [۱۰] الگوریتم تصویرسازی برای اهداف متحرک با سرعت ثابت در حالت لوچ بدون تخمین پارامترها توسط روش کاپن^{۱۰} ارائه شده است. در [۱۱] روابط مرکز داپلر و نرخ چیرپ^{۱۱} تنها برای هدف با سرعت ثابت، در حالت لوچ ارائه

*رایانامه نویسنده مسئول: seyedin@um.ac.ir

⁶ Multi Antenna⁷ Signal to Clutter and Noise Ratio (SCNR)⁸ Broadside⁹ Squint SAR¹⁰ Capon¹¹ Chirp Rate¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)² Ground Moving Target Indication (GMTI)³ Blurred⁴ Azimuth Ambiguity⁵ Single Antenna

جانب نگر دارند. به عنوان مثال، نرخ چیرپ که در حالت جانب‌نگر فقط به دو پارامتر سرعت در جهت سمت و شتاب در جهت برد وابسته است، در حالت لوچ به همه چهار پارامتر سرعت و شتاب هدف در جهت برد و سمت وابسته می‌گردد. در حالت جانب‌نگر چون پارامتر شتاب سمت هدف، در مراتب بالا ظاهر می‌شود، می‌توان در برابر شتاب سکو از آن صرف‌نظر نمود. اما در حالت لوچ عدم اصلاح آن، سبب از بین رفتن وضوح تصویر خواهد شد. در مقاله حاضر نشان می‌دهیم در حالت لوچ برخلاف حالت جانب‌نگر، مرکز داپلر به سرعت هدف در جهت سمت وابسته است و می‌تواند بر ابهام سمت هدف و ابهام فرکانس داپلر اثرگذار باشد. همچنین نرخ چیرپ نیز به شتاب در جهت سمت و سرعت در جهت برد وابسته است که می‌تواند بر ابهام باند داپلر و خطای فاز مرتبه دو بیفزاید. بنابراین، دقت تخمین گره‌های بدون ابهام، مانند تبدیل رادون^۹ [۲۱] در حالت لوچ کافی نیست. از طرف دیگر چون داپلر به وجود آمده به خاطر حرکت سکو بسیار بیشتر از داپلر به وجود آمده به خاطر حرکت هدف می‌باشد، بنابراین استخراج پارامترهای سرعت هدف از تخمین مرکز داپلر نیاز به روشی با دقت زیاد دارد. بدین ترتیب روشی جدید ارائه می‌شود که به صورت توأم از تبدیل رادون و یک تخمین‌گر مبتنی بر هندسه^{۱۰} [۲۲] استفاده می‌کند و می‌تواند به خوبی دقت تخمین سرعت هدف را بهبود دهد. سپس با اصلاح مهاجرت سلولی برد^{۱۱} و به کارگیری روش تقریب تبدیل فوری به چند جمله‌ای محلی^{۱۲} پارامتر داپلر مرتبه دو و سه تخمین زده می‌شود. بعد از آن با استفاده از تخمین پهنای باند داپلر، زمان دهانه مصنوعی^{۱۳} [۲۳] محاسبه می‌گردد. سرانجام با به کارگیری چهار معادله مستقل، چهار پارامتر هدف یعنی سرعت و شتاب هدف در جهت برد و سمت با دقت مناسبی تخمین زده می‌شود. در این روش مکان هدف، معلوم در نظر گرفته می‌شود. از مزایای تخمین پارامترهای هدف در حالت لوچ می‌توان گفت چنانچه هدف تنها در جهت سمت حرکت شتابدار داشته باشد، می‌توان سرعت و شتاب هدف را تنها با تخمین پارامترهای داپلری تا مرتبه دو (تخمین مرکز داپلر و نرخ چیرپ) محاسبه نمود که در حالت جانب‌نگر، امکان‌پذیر نمی‌باشد.

جهت ارائه موضوع پس از بخش مقدمه، در بخش دوم، مدل سیگنال دریافتی در حضور هدف متحرک زمینی برای SAR لوچ ارائه می‌شود. در بخش سوم تشریح مسئله با بررسی ویژگی‌های طیفی سیگنال مانند مرکز داپلر، نرخ چیرپ و پارامتر داپلری

گردیده است و الگوریتمی مبتنی بر تصحیح هندسی^۱ برای تصویرسازی و تصحیح مکان هدف متحرک ارائه شده است. در [۱۲] برای آشکارسازی هدف متحرک از کلاتر ساکن، بر اساس انتقال طیف و مبتنی بر روش NLCS^۲ الگوریتمی ارائه گردیده است. در این کار نیز تصویرسازی برای هدفی با سرعت ثابت انجام شده است. بنابراین، تاکنون در تخمین پارامترهای حرکتی هدف در حالت لوچ بررسی جدی صورت نگرفته است.

برای تخمین پارامترهای هدف متحرک در سامانه SAR جانب‌نگر، از الگوریتم‌هایی با کارایی بسیار خوب در تخمین سرعت در جهت برد استفاده شده است [۱۳]. اما سرعت در جهت سمت با استفاده از روابط میان نرخ چیرپ و پارامترهای حرکتی هدف تعیین می‌شود [۱۴]. برای تخمین نرخ چیرپ، ابزار آنالیز زمان-فرکانس مانند توزیع ویگنر-ویل^۳ [۱۶-۱۵] و تبدیل فوری کسری^۴ [۱۷] به طور گسترده‌ای استفاده شده است. البته این الگوریتم‌ها به تنهایی نمی‌توانند شتاب هدف را تخمین بزنند در حالی که در عمل، اغلب وسایل نقلیه در جاده‌ها و بزرگراه‌ها دارای حرکت شتابدار می‌باشند که می‌تواند بر تخمین سرعت، اثر زیادی داشته باشد [۱۸]. به عنوان مثال در حالت جانب‌نگر، سابقه فاز^۵ به وجود آمده توسط شتاب هدف در جهت برد و سرعت در جهت سمت، در رابطه نرخ چیرپ به صورت توأم ظاهر می‌شود که تأثیر جدی بر مقدار تخمین سرعت دارد [۱۹]. همچنین در حالت جانب‌نگر شتاب در جهت سمت تنها در عبارت فاز مرتبه سه^۶ و بالاتر وجود دارد که با سرعت در جهت سمت در یک رابطه ظاهر می‌شود. این پدیده توأم بودن سرعت‌ها و شتاب‌ها، تخمین را، حتی در حالت جانب‌نگر مشکل و پیچیده می‌سازد. به طوری که در [۲۰] اثر شتاب هدف بر تخمین پارامترهای سرعت در جهت برد و سمت در حالت جانب‌نگر برای سامانه SAR دو آنتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتیجه آن تأثیر قابل توجه شتاب در جهت برد، بر تخمین سرعت در جهت سمت می‌باشد.

در این مقاله روابط هدف متحرک با شتاب ثابت در حالت لوچ ارائه می‌شود. تخمین پارامترهای هدف به طور همزمان برای سامانه SAR تک آنتنی در مد نواری^۷ مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل وجود اتصال^۸ میان برد و سمت در حالت لوچ، پارامترهای داپلری هدف وابستگی بسیار بیشتری به یکدیگر نسبت به حالت

¹ Geometry Correction

² None Linear Chirp Scaling

³ Wigner-Ville

⁴ Fractional Fourier Transform

⁵ Phase History

⁶ Cubic Phase term

⁷ Strip-Mode

⁸ Coupling

⁹ Radon Transform

¹⁰ Geometry-Based Doppler Centroid Estimator(GDE)

¹¹ Range Cell Migration Correction(RCM)

¹² Local Polynomial Fourier Transform (LPFT)

¹³ Synthetic Aperture Time

آن دو می توان ضلع AB که همان $R(\eta)$ می باشد را به دست آورد. اگر سرعت در جهت برد مایل (در صفحه داپلر صفر) $v_r = v_x \cos(\psi)$ و $a_r = a_x \cos(\psi)$ فرض شود. طول ضلع AB را می توان به صورت زیر نوشت:

$$R(\eta) = \sqrt{\left[R_0 - v_r(\eta - \eta_c) - \frac{1}{2} a_r (\eta - \eta_c)^2 \right]^2 + \left[(v - v_y)(\eta - \eta_c) - \frac{1}{2} a_y (\eta - \eta_c)^2 - R_0 \tan(\theta_{sq}) \right]^2} \quad (5)$$

به صورت رابطه (۶) نوشت:

$$\begin{aligned} R(\eta) = & R_c - \left[v_r \cos(\theta_{sq}) + (v - v_y) \sin(\theta_{sq}) \right] (\eta - \eta_c) \\ & + \frac{\left[v_r \sin(\theta_{sq}) + (v - v_y) \cos(\theta_{sq}) \right]^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq})}{2R_c} (\eta - \eta_c)^2 \\ & + \left\{ \frac{v_r a_r \sin^2(\theta_{sq}) - (v - v_y) a_y \cos^2(\theta_{sq}) + [v_r a_y - a_r (v - v_y)] \sin(\theta_{sq}) \cos(\theta_{sq})}{2R_c} + \dots \right. \\ & \left. \frac{[v_r \cos(\theta_{sq}) + (v - v_y) \sin(\theta_{sq})][v_r \sin(\theta_{sq}) + (v - v_y) \cos(\theta_{sq})]^2}{2R_c^2} \right\} (\eta - \eta_c)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$v_l = v_r \cos(\theta_{sq}) + (v - v_y) \sin(\theta_{sq}) \quad (7)$$

$$v_{l\perp} = v_r \sin(\theta_{sq}) + (v - v_y) \cos(\theta_{sq})$$

با جایگذاری رابطه (۶) و (۷) در (۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} s(\tau, \eta) = & A w_a (\eta - \eta_c) \text{sinc} \left[\pi B_r \left(\tau - \frac{2R_c}{c} \right) \right] \\ & \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_c \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} v_l \eta \right) \\ & \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v_{l\perp}^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq})}{2R_c} \eta^2 \right) \\ & \times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \frac{[a_r \sin(\theta_{sq}) + a_y \cos(\theta_{sq})][v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq})]}{2R_c} + \frac{v_l v_{l\perp}^2}{2R_c^2} \right\} \eta^3 \right) \quad (8) \\ & \times \exp \left(j \frac{4\pi k_r}{c} v_l \tau \eta \right) \\ & \times \exp \left(-j \frac{4\pi k_r}{c} \frac{v_{l\perp}^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq})}{2R_c} \tau \eta^2 \right) \end{aligned}$$

η^3 می باشد پارامترهای داپلری مرتبه اول (مرکز داپلر)، مرتبه دوم (نرخ چیرپ) و پارامتر داپلری مرتبه سه نامیده می شوند. فاز این سه جمله را که تابعی از زمان آهسته است فاز سمت هدف متحرک نامیده و به صورت رابطه (۹) نشان می دهند [۲۳]:

شکل ۲، در صفحه برد مایل و سمت ترسیم شده است. هدف در لحظه $\eta = \eta_c$ که مرکز پرتو از روی آن عبور می کند در نقطه Q قرار داشته است و بعد از η ثانیه در نقطه B قرار می گیرد. در مثلث ABC با محاسبه اضلاع AC، BC و زاویه میان

با انجام محاسبات ساده سازی و نوشتن بسط تیلور تا مرتبه سه برای این رابطه حول η_c ، بعد از انجام محاسبات می توان آن را

رابطه بالا برای اولین بار ارائه شده است. این رابطه تعیین کننده فاصله لحظه ای هدف تا سکو بر حسب لحظه عبور مرکز پرتو از روی هدف در حالت لوچ است. با تعریف سرعت هدف در جهت راستای دید v_l و در جهت عمود بر دید $v_{l\perp}$ به صورت رابطه (۷) خواهیم داشت:

۳. تشریح مسئله

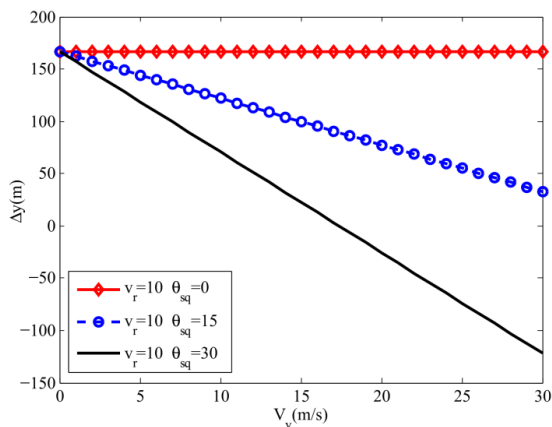
رابطه (۸) سیگنال دریافتی هدف متحرک را در حوزه زمان دوبعدی توصیف می نماید. این رابطه پنج جمله نمایی دارد که جملات نمایی اول و دوم و سوم که به ترتیب ضریبی از η ، η^2 و

$$K_a = \frac{2v_{l\perp}^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq})}{\lambda R_c} \quad (11)$$

و ξ پارامتر داپلری مرتبه سه نامیده می شود و از رابطه (۱۲)

به دست می آید:

$$\xi = -\frac{3}{\lambda} \left\{ \frac{[a_r \sin(\theta_{sq}) + a_y \cos(\theta_{sq})][v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq})]}{R_c} + \frac{v_{l\perp}^2}{R_c^2} \right\} \quad (12)$$



شکل ۳. جابجایی سمت هدف برحسب سرعت سمت به ازای زوایای لوچ متفاوت و سرعت های برد یکسان

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای رادار دهانه مصنوعی

واحد	مقدار	پارامتر
متر بر ثانیه	۱۲۰	v سرعت سکو
متر	۱۰۰۰	h ارتفاع سکو
متر	۲۰۰۰	R_0 کمترین برد تا مرکز صحنه
درجه	۱۵-۳۰	θ_{sq} زاویه لوچی
متر	۰/۳	λ طول موج سیگنال ارسالی
هرتز	۳۰۰	prf فرکانس تکرار پالس
متر	۳۲۶/۲	L_s طول دهانه مصنوعی
مگاهرتز	۶۰	B_r پهنای باند سیگنال ارسالی

۳-۲. اثر سرعت هدف بر ابهام داپلر

بزرگ ترین فرکانس داپلری که توسط هدف متحرک می تواند تولید شود از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۳]:

$$f_{dcMax} = f_{dcs} + f_{dem} + \frac{B_d}{2} \quad (15)$$

در این رابطه B_d پهنای باند داپلر هدف می باشد. در حالت لوچ با توجه به این که f_{dcs} صفر نخواهد بود امکان ایجاد ابهام داپلر بسیار زیاد است. ابهام داپلر وقتی به وجود می آید که f_{dcMax} از نصف فرکانس تکرار پالس بیشتر شود. حتی سرعت هدف نیز

$$\varphi(\eta) = 2\pi(f_{dc}\eta + \frac{1}{2}K_a\eta^2 + \frac{1}{3}\xi\eta^3) \quad (9)$$

که در آن، f_{dc} مرکز داپلر و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_{dc} = \frac{2v_l}{\lambda} \quad (10)$$

و K_a نرخ چیرپ و از رابطه (۱۱) به دست می آید:

۳-۱. اثر سرعت سمت بر ابهام سمت هدف متحرک

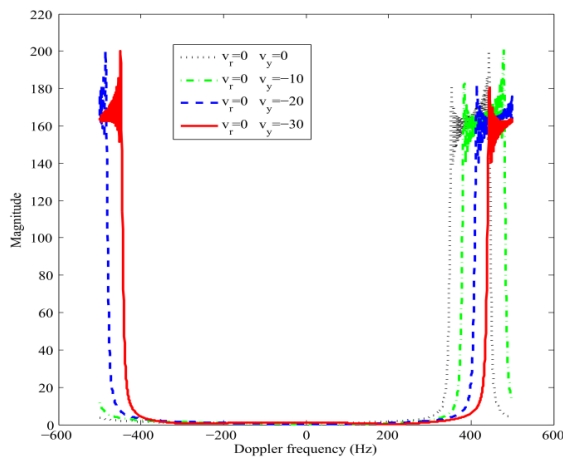
جابجایی مرکز داپلر سبب تغییر مکان سمت هدف در تصویر می شود. با استفاده از رابطه (۷) و (۱۰) داریم:

$$f_{dc} = f_{dcs} + f_{dem} = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_{sq}) + \frac{2}{\lambda} (v_r \cos(\theta_{sq}) - v_y \sin(\theta_{sq})) \quad (13)$$

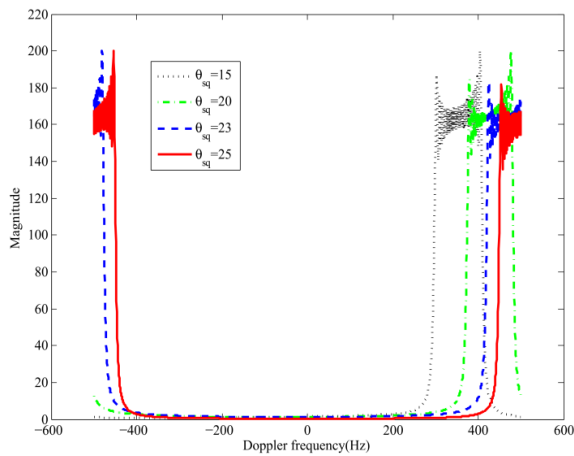
این رابطه نشان می دهد که مرکز داپلر را می توان به صورت مجموع دو قسمت مرکز داپلر وابسته به هدف ساکن (f_{dcs}) و مرکز داپلر وابسته به هدف متحرک (f_{dem}) نشان داد. همچنین از این رابطه مشاهده می شود که در حالت لوچ، جابجایی مرکز داپلر تابعی از سرعت در هر دو جهت برد و سمت هدف می باشد. همان طور که این رابطه نشان می دهد در حالت جانب نگر (با $\theta_{sq} = 0$)، مرکز داپلر تنها تابعی از سرعت هدف در جهت برد مایل می باشد و تغییر سرعت در جهت سمت هیچ گونه اثری بر مرکز داپلر نخواهد داشت [۲۳]. بنابراین، در حالت جانب نگر اهدافی که تنها به موازات سمت حرکت دارند، در موقعیت سمت آن ها ابهامی ایجاد نخواهد شد، در حالی که در حالت لوچ باعث انتقال طیف داپلر می گردد. جابجایی سمت هدف که تنها به دلیل تغییر مرکز داپلر، f_{dem} ، به وجود آمده است از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta y = \frac{\lambda R_c}{2v} f_{dem} = \frac{R_c}{v} (v_r \cos(\theta_{sq}) - v_y \sin(\theta_{sq})) \quad (14)$$

این ترکیب شدن سرعت در جهت برد و سمت در رابطه مرکز داپلر سبب می شود که با تخمین مرکز داپلر هیچ کدام از این دو مجهول تعیین نشود. شکل ۳ ابهام سمت را برای زوایای لوچ متفاوت برحسب سرعت سمت هدف نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در حالت جانب نگر، سرعت سمت تأثیری بر ابهام سمت نخواهد داشت. پارامترهای شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. طیف سمت هدف متحرک، (الف) ابهام داپلر به دلیل تنها حرکت هدف در جهت سمت، (ب) ابهام داپلر برای هدفی با سرعت $v_r = 17/83$ و به ازای زوایای لوچی متفاوت

۳-۳. اثر شتاب هدف متحرک بر ابهام باند داپلر

همان طور که از رابطه (۱۱) به دست می آید همه پارامترهای هدف متحرک یعنی v_r ، v_y ، a_r و a_y در مقدار نرخ چیرپ نقش دارند. بنابراین، تخمین دقیق نرخ چیرپ بسیار حائز اهمیت است. اما این وابسته شدن همه پارامترها در یک رابطه، تخمین را با چالش جدی روبرو می کند، در حالی که در حالت جانب نگر نرخ چیرپ تنها به دو پارامتر v_y و a_r وابسته است. با توجه به این که پهنای باند داپلر به صورت $B_d = K_a T_a$ محاسبه می شود می توان با استفاده از رابطه (۱۱) و این که زمان دهانه مصنوعی برای اهداف ساکن در حالت لوچ از رابطه (۱۶) به دست می آید

[۲۷]:

$$T_a = \frac{R_c \lambda}{v d \cos(\theta_{sq})} \quad (16)$$

می تواند سبب ایجاد ابهام داپلر شود. بنابراین، تحلیل مسئله ابهام داپلر در حالت لوچ باید مورد توجه قرار گیرد. چون در حالت جانب نگر تنها سرعت در جهت برد بر ابهام داپلر اثرگذار می باشد اینجا تنها تأثیر سرعت در جهت سمت بر ابهام داپلر مورد بررسی قرار می گیرد که در حالت جانب نگر هیچ گونه تأثیری بر ابهام سمت ندارد. شکل ۴-الف، طیف سمت هدف متحرک را برای سرعت های سمت متفاوت به ازای زاویه لوچ ۳۰ درجه و سرعت شعاعی صفر نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود تغییر سرعت هدف در جهت سمت باعث دوتکه شدن طیف و سبب ابهام فرکانس داپلر می شود. شکل ۴-ب، طیف سمت هدف را به ازای زوایای لوچ متفاوت و برای یک هدف با سرعت ثابت $17/83$ و $v_r = -20$ و $v_y = 20$ متر بر ثانیه نشان می دهد. افزایش زاویه لوچی می تواند سبب ابهام داپلر شود. لازم به توضیح است که تخمین سرعت هدف متحرک در جهت سمت را نمی توان مشابه جبران سازی حرکت سکو در جهت سمت (سکو با سرعت نامعلوم) دانست. زیرا چنانچه سرعت سکو ثابت نباشد (به دلیل شرایط جوی تغییر کند)، همه اهداف ساکن در حالت لوچ به یک نسبت در تصویر دچار جابجایی سمت خواهند شد. اما هدف متحرک که دارای سرعت نسبی $(v - v_y)$ می باشد مقدار جابجایی آن نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین، روش های جبران سازی حرکت مانند الگوریتم گرادیان فاز (PGA) که سرعت نسبی سکو را برای همه اهداف به طور مشابه جبران می کند و نیاز به اهداف غالب (با ضریب انعکاسی بالا) در تصویر دارد [۲۸]، برای اهداف متحرک که دارای سرعت نسبی متفاوت و ضریب انعکاسی کم می باشند مناسب نیست. بنابراین، با جبران سازی های مرسوم امکان تصویر سازی و تصحیح موقعیت هدف متحرک زمینی وجود ندارد. در همه جای این مقاله، سرعت ها بر حسب متر بر ثانیه و شتاب ها بر حسب متر بر مجذور ثانیه است و زوایا بر حسب درجه می باشد. بنابراین، بعضاً واحد آن ها ذکر نمی گردد.

در رابطه (۸) دو جمله نمایی آخر که حاصل ضرب $\pi\eta$ و $\pi\eta^2$ در آن ظاهر شده است به ترتیب مهاجرت برد خطی (گردش برد^۱) و مهاجرت برد مرتبه دو (انحناء برد^۲) را نشان می دهد. یکی از پرکاربردترین روش ها برای اصلاح مهاجرت برد خطی، بدون دانستن سرعت هدف، تبدیل کی استون^۳ مرتبه اول است [۲۹]. اما این تبدیل با وجود ابهام داپلر کارایی خود را از دست می دهد [۲۹].

¹ Motion Compensation

² Phase Gradient Algorithm

³ Range Walk

⁴ Range Curvature

⁵ Keystone Transform

پهنای باند داپلر را به صورت رابطه (۱۷) به دست آورد d طول آنتن در جهت سمت است):

$$B_d = \frac{2((v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq}))^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq}))}{vd \cos(\theta_{sq})} \quad (17)$$

جدول ۲. مشخصات و پارامترهای رادار دهانه مصنوعی

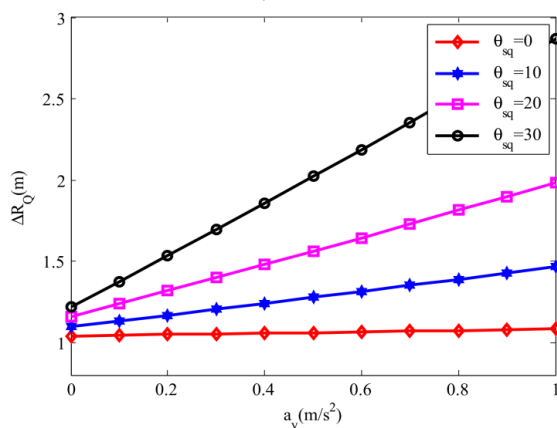
واحد	مقدار	پارامتر
متر بر ثانیه	۱۲۰	v سرعت سکو
متر	۵۰۰۰	h ارتفاع سکو
متر	۱۰۰۰۰	R_0 کمترین برد تا مرکز صحنه
درجه	۲۰	θ_{sq} زاویه لوچی
متر	۰/۳	λ طول موج سیگنال ارسالی
هرتز	۱۰۰۰	prf فرکانس تکرار پالس
درجه	۲	θ_a پهنای پرتو سمت
درجه	۳۰	ψ زاویه خراش
مگاهرتز	۶۰	B_r پهنای باند سیگنال ارسالی

۳-۴. اثر شتاب هدف بر مهاجرت برد مرتبه دو

با فرض تصحیح مهاجرت برد خطی، انحناء برد نیز از مسائلی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. اگر مدت زمان پرتوگیری از هدف در بازه $[-\frac{T_{am}}{2}, \frac{T_{am}}{2}]$ در نظر گرفته شود، با قرار دادن

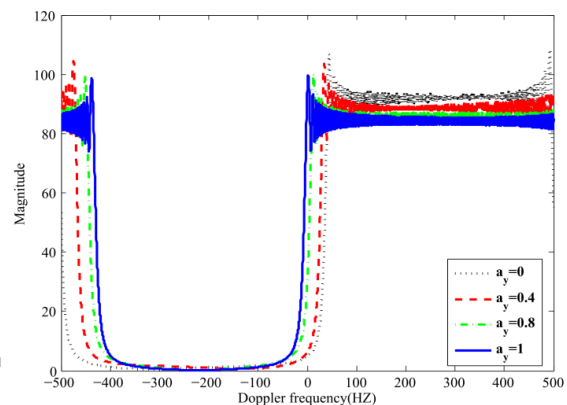
روابط (۶) و (۹) در $\varphi(\eta) = \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta)$ و مطابق تعریفی که برای محاسبه مهاجرت برد مرتبه دو در [۲۷] آمده است، میزان مهاجرت برد مرتبه دو که به طور عمده توسط شتاب هدف به وجود می آید عبارت است از:

$$\Delta R_Q = \frac{(v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq}))^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq})}{2R_c} \left(\frac{T_{am}}{2}\right)^2 \quad (18)$$



شکل ۶. منحنی پیمایش انحناء برد برحسب شتاب هدف در جهت سمت با $v_x = 10, v_y = 25, a_x = 0/3$ به ازای زوایای لوچی متفاوت

رابطه (۱۷) وابسته بودن پهنای باند داپلر در حالت لوچ، به شتاب سمت و سرعت در جهت برد را نشان می دهد که تغییر آن ها می تواند ابهام داپلر تولید کند. لازم به توضیح است که در حالت جانب نگر پهنای باند داپلر به سرعت در جهت برد و شتاب در جهت سمت وابسته نیست. شکل ۵ ابهام پهنای باند داپلر را با تغییر شتاب سمت هدف نشان می دهد.



شکل ۵. طیف سمت هدف متحرک و نمایش ابهام باند داپلر برای هدفی با سرعت $v_y = 20, v_r = 0$ متر بر ثانیه و زاویه لوچی ۲۰ درجه برای شبیه سازی این شکل پارامترهای راداری مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود در حالت لوچ با افزایش شتاب سمت هدف، پهنای باند داپلر افزایش می یابد و می تواند ابهام باند داپلر ایجاد کند.

در شکل ۶ منحنی انحناء برد برحسب شتاب سمت هدف رسم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود شتاب هدف در جهت سمت می تواند سبب پیمایش چندین سلول برد گردد که باید قبل از تخمین پارامترها به نحو مناسبی اصلاح گردد. واضح است که در حالت جانب نگر $\theta_{sq} = 0$ ، با توجه به رابطه (۱۸)، مهاجرت برد به شتاب سمت هدف وابسته نیست و نباید هیچ تغییری در مهاجرت برد به وجود آید. اما همان طور که در شکل ۶ و ۷ مشاهده می شود مقداری افزایش مهاجرت برد دیده می شود که ناشی از تغییر مدت زمان پرتوگیری از هدف می باشد که با تغییر شتاب مقدار آن تغییر خواهد کرد. با توجه به آنچه مطرح شد اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو در حالت لوچ ضروری است.

همان طور که دیده می شود. با در نظر گرفتن حد تفکیک برد، دو برابر آن یعنی حدود ۱/۷۵ متر می توان از انحناء برد به وجود آمده صرف نظر نمود. با توجه به پارامترهای راداری جدول ۲ در زاویه لوچی ۲۰ درجه، حد تفکیک در برد ۲/۶۶ متر می باشد. بنابراین، برای اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو تابع زیر را در حوزه فرکانس برد و زمان سمت ضرب می کنیم:

$$y_1(\tau, \eta) = \text{ifft} \left\{ s(f_r, \eta) \exp(j \frac{2\pi v^2 \cos^2(\theta_{sq})}{cR_c} f_r \eta^2) \right\} \quad (20)$$

در این رابطه، $s(f_r, \eta)$ تبدیل فوریه حوزه برد از سیگنال فشرده سازی شده رابطه (۸) است. $y_1(\tau, \eta)$ سیگنالی است که انحناء برد در آن حذف شده است.

۴-۲. تخمین مرکز داپلر

با توجه به آنچه گفته شد مسئله ابهام داپلر در حالت لوچ اثرگذارتر از حالت جانب نگر است و باید روش های مورد استفاده در تخمین مرکز داپلر این اثر را در نظر گرفت. در [۲۴] از روش دامنه برای تخمین مرکز داپلر استفاده شده که در حضور ابهام داپلر کارایی خود را از دست می دهد. در اینجا از روش دیگری به نام تبدیل رادون استفاده خواهد شد [۲۱]. این روش مبتنی بر تخمین شیب خط در حوزه تصویر می باشد. با توجه به این که حرکت هدف در جهت X و در جهت Y در طول زمان دهانه مصنوعی باعث این مهاجرت برد شده است بنابراین، برای محاسبه تعداد سلول های پیموده شده با استفاده از رابطه (۱۰) در این دو جهت خواهیم داشت:

$$\Delta x = \frac{v_c T_a}{c/2f_s} \quad (21)$$

$$\Delta y = PRF \cdot T_a \quad (22)$$

در این رابطه، f_s نرخ نمونه برداری برد، Δx و Δy به ترتیب سلول های پیموده شده در جهت برد و سمت می باشد.

$$\tan(\theta) = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{(v_r \cos(\theta_{sq}) + (v - v_y) \sin(\theta_{sq})) \cdot 2f_s}{PRF \cdot c} \quad (23)$$

در این رابطه θ زاویه میان خط و محور سمت است. با تخمین θ استفاده از تبدیل رادون، می توان به مقدار \hat{v}_c از رابطه زیر دست یافت:

$$\hat{v}_c = \frac{PRF \cdot c \cdot \tan(\theta)}{2f_s} \quad (24)$$

اما برای این که مقدار مهاجرت برد مرتبه دومی را که فقط ناشی از حرکت هدف است به دست آوریم کافی است ΔR_{Q0} را از مقدار انحناء برد مربوط به اهداف ساکن R_{Q0} کم کنیم. مقدار R_{Q0} با صفر قرار دادن پارامترهای سرعت هدف در رابطه (۱۸) به دست می آید:

$$R_{Q0} = \frac{v^2 \cos^2(\theta_{sq})}{2R_c} \left(\frac{T_a}{2}\right)^2 \quad (19)$$

همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش زاویه لوچی این مقدار برای هدفی با مشخصات $a_x = 0.3$ ، $a_y = 25$ ، $v_x = 10$ کاهش می یابد. لازم به ذکر است همه منحنی های این بخش توسط شبیه سازی به دست آمده است.

بر اساس توضیحات فوق چالش ها و نوآوری های این مقاله عبارت است از: ۱- ارائه روابط در حالت لوچ برای هدف متحرک با شتاب ثابت. ۲- بررسی ابهام سمت هدف متحرک در حالت لوچ که می تواند برخلاف حالت جانب نگر با تغییر سرعت سمت هدف به وجود آید. ۳- مهاجرت برد خطی به خاطر وجود ابهام داپلر توسط تبدیل کی استون قابل اصلاح نمی باشد. ۴- مهاجرت برد مرتبه دو که می تواند در حالت لوچ با افزایش شتاب سمت بسیار بزرگ تر از حالت جانب نگر تغییر کند. ۵- ارائه روشی جدید بر اساس تلفیق دو روش تبدیل رادون و تخمینگر مبتنی بر هندسه (GDE) که می تواند در تخمین دقیق مرکز داپلر و اصلاح مهاجرت برد خطی در حضور ابهام داپلر کارایی بسیار خوبی داشته باشد. ۵- تعمیم روش تخمین زمان دهانه مصنوعی در حالت لوچ برای تفکیک پارامترهای هدف از یکدیگر و تخمین آن ها.

۴. روش پیشنهادی

۴-۱. اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو

بعد از فشرده سازی در برد، به دلیل مهاجرت سلولی برد^۱ (RCM) سیگنال بازگشتی از هدف متحرک چندین سلول برد را می پوشاند. به منظور بهبود توان و تخمین دقیق پارامترهای طیفی سیگنال، باید مهاجرت سلولی برد را به طور کامل جبران نمود. گرچه در حالت لوچ، به دلیل وجود مرکز داپلر زیاد، مهاجرت برد خطی بسیار بزرگ است، اما برای افزایش کارایی تبدیل رادون، بایستی ابتدا اصلاح انحناء برد انجام شود. البته برای اغلب موارد اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو نسبت به اهداف ساکن کافی است. به عنوان مثال برای همان پارامترهای راداری جدول ۲، مقدار پیمایش سلولی انحناء برد برای هدفی با $a_x = 0.3$ ، $a_y = 0.8$ ، $v_x = 10$ ، $v_y = 25$ عبارت است از $R_{Q0} - \Delta R_{Q0} = 0.188$ متر.

¹ Range Cell Migration (RCM)

$$p_m = \frac{|g(m)|}{\|g(m)\|}, \quad \|g(m)\| = \sum_{m=0}^{M-1} |g(m)| \quad (27)$$

چنانچه آنتروپی کمینه نشده باشد تغییر مقدار \hat{v}_c ادامه می‌یابد. سپس با $\hat{v}_{c-final}$ نهایی که آنتروپی را کمینه می‌کند مهاجرت برد اصلاح می‌شود. همچنین این مقدار برای تخمین پارامترها در نظر گرفته می‌شود. اصلاح مهاجرت برد که با این روش انجام می‌شود هم از لحاظ زمانی نسبت به تبدیل کی استون برتری دارد و هم اینکه در حضور ابهام داپلر که تبدیل کی استون کارایی ندارد می‌تواند به طور کامل و با دقت بسیار بالایی مهاجرت برد خطی را حذف کند. بعد از اصلاح این مهاجرت برد می‌توان اصلاح مربوطه را در حوزه زمان سمت نیز انجام داد تا مرکز داپلر طیف، در بازه $\left[-\frac{PRF}{2}, \frac{PRF}{2}\right]$ قرار گیرد.

۳-۴. تخمین نرخ چیرپ و پارامتر داپلر مرتبه سه با LPFT

به‌عنوان مثال برای سیگنال $x(n) = \exp(j\pi \sum_{m=1}^K a_m n^m)$ که از مرتبه K است. LPFT آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۵]:

$$X(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k) = \sum_n x(n) \exp(-j\pi \sum_{m=1}^k \alpha_m n^m) \quad (28)$$

در صفحه k بعدی، $X(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)$ به‌طور ایده آلی در موقعیت‌های متنظر با پارامترهای سیگنال $\alpha_i = a_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, k$) متمرکز خواهد شد. بنابراین پارامترهای $x(n)$ در موقعیتی که بیشینه LPFT رخ دهد تخمین زده می‌شود بدین‌صورت که [۲۵]:

$$(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \dots, \hat{\alpha}_k) = \arg \max_{(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)} |X(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)| \quad (29)$$

با تخمین $\alpha_2 = \hat{K}_a$ و $\alpha_3 = \frac{2\hat{\xi}}{3}$ و استفاده از روابط (۱۱ و ۱۲) می‌توان دو معادله زیر را ارائه کرد:

$$\begin{aligned} (v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq}))^2 \\ - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq}) = -\frac{\lambda \hat{\alpha}_2 R_c}{2} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} [a_r \sin(\theta_{sq}) + a_y \cos(\theta_{sq})][v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq})] \\ + \frac{v |v_{\perp}|^2}{R_c} = -\frac{\lambda \hat{\alpha}_3 R_c}{2} \end{aligned} \quad (31)$$

البته با به‌کارگیری این دو معادله و معادله مرکز داپلر (۲۴) با توجه به این که در مجموع سه معادله و چهار مجهول داریم همچنان این دستگاه معادلات قابل حل نمی‌باشد. لذا نیاز به یک معادله مستقل دیگر می‌باشد که این معادله را از تخمین پهنای باند داپلر به دست می‌آوریم.

با توجه به این که در حالت لوچ مرکز داپلر عدد بزرگی است و تغییراتی که توسط سرعت هدف باعث تغییر آن می‌شود بسیار کوچک‌تر از داپلر به وجود آمده از حرکت سکو است، تبدیل رادون دقت خوبی در حالت لوچ ندارد. همان‌طور که در [۲۱] آمده است با افزایش زاویه لوچی میزان خطای تخمین نیز افزایش می‌یابد و این خود سبب افزایش خطای تخمین شده که بر تخمین پارامترهای دیگر هدف نیز اثرگذار است. در این مقاله روشی جدید پیشنهاد می‌شود که از تلفیق دو روش تبدیل رادون و تخمین گر مبتنی بر هندسه (GBD) [۲۲] به‌دست آمده است. روش تخمین گر مبتنی بر هندسه با فرض معلوم بودن هندسه پرواز (ارتفاع سکو و سرعت آن) و برای محاسبه مرکز داپلر اهداف ساکن در سامانه SAR دوپایه جلونگر^۱ ارائه شده است. این تخمین گر نسبت به رادون در برابر نویز، بسیار مقاوم‌تر می‌باشد زیرا از معیار آنتروپی برای بهبود پارامتر مورد تخمین استفاده می‌کند. در این مقاله برای تخمین بهتر مرکز داپلر و همگرایی سریع الگوریتم GBD و همچنین به دلیل معلوم نبودن پارامترهای حرکتی هدف، به‌عنوان مقدار اولیه از تبدیل رادون استفاده می‌کنیم سپس با توجه به تخمینی که از آن به دست می‌آید برای کمینه نمودن آنتروپی تصویر از الگوریتم GBD استفاده می‌شود. بدین‌صورت که با توجه به مقدار اولیه‌ای که تبدیل رادون برای \hat{v}_l می‌دهد مقدار جدیدی برای آن به‌اندازه گام $\Delta K = \frac{\lambda}{2} \Delta f_{dc}$ به‌صورت $\hat{v}_{l_{new}} = \hat{v}_l + \Delta K$ در نظر گرفته می‌شود. Δf_{dc} مقدار دقت مورد نیاز در تخمین مرکز داپلر است. سپس با توجه به مقدار جدید، اصلاح مهاجرت برد مطابق رابطه (۲۵) در حوزه فرکانس برد و زمان سمت انجام می‌شود.

$$y_2(\tau, \eta) = \text{ifft} \left\{ y_1(f_r, \eta) \exp(-j \frac{4\pi(\hat{v}_{l_{new}})}{c} \eta f_r) \right\} \quad (25)$$

بعد از آن انرژی هر سبب برد^۲ از داده تصحیح‌شده $y_2(\tau, \eta)$ ، محاسبه می‌شود و متوسط آن روی همه نمونه‌های برد، به‌صورت سیگنال $g(m)$ ($m = 0, 1, 2, \dots, M$) که M تعداد سبب برد است نشان داده می‌شود. اکنون برای تصمیم‌گیری بر کیفیت تصحیح مهاجرت برد از آنتروپی استفاده می‌کنیم. برای محاسبه آنتروپی سیگنال حاصل، $g(m)$ از روابط (۲۶-۲۷) استفاده می‌شود [۲۲]:

$$H(x) = -\sum_{m=0}^{M-1} p_m \log(p_m) \quad (26)$$

که در آن داریم [۲۲]:

¹ Bistatic Forward-Looking SAR(BFSAR)

² Range Bin

می‌توان با استفاده از تقریب چندجمله‌ای گوسی با دقت مناسب پهناهای باند داپلر را تخمین زد [۲۳]، در این صورت مدت‌زمان پرتوگیری از هدف T_{am} قابل محاسبه است [۲۳]:

$$T_{am} = \frac{\hat{B}_d}{\hat{K}_a + \hat{\xi} T_{am}} \quad (۳۳)$$

با محاسبه T_{am} و قرار دادن آن در رابطه (۳۲) به یک معادله مستقل دیگر برحسب v_y و a_y دست می‌یابیم که معادله چهارم را تشکیل می‌دهد. بنابراین با چهار معادله (۲۳)، (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) چهار مجهول v_x ، v_y ، a_x و a_y به دست می‌آید. دستگاه معادلات به صورت زیر است:

$$\begin{cases} v_r \cos(\theta_{sq}) + (v - v_y) \sin(\theta_{sq}) = \hat{v}_{l-final} \\ (v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq}))^2 - a_r R_c \cos(\theta_{sq}) + a_y R_c \sin(\theta_{sq}) = -\frac{\lambda \hat{K}_a R_c}{2} \\ [a_r \sin(\theta_{sq}) + a_y \cos(\theta_{sq})][v_r \sin(\theta_{sq}) - (v - v_y) \cos(\theta_{sq})] + \frac{v v_{l\perp}^2}{R_c} = -\frac{\lambda \hat{\xi} R_c}{3} \\ \frac{v T_a}{v - (v_y + 0.5 a_y T_{am})} = \hat{T}_{am} \end{cases} \quad (۳۴)$$

شکل ۸ را خواهیم داشت. در این شکل سامانه راداری مطابق جدول ۱ با فرکانس تکرار ۳۰۰ هرتز، $\theta_{sq} = 3^\circ$ درجه و هدف با مشخصات $v_x = 10 \frac{m}{s}$ ، $v_y = 40 \frac{m}{s}$ ، $a_x = 0.5 \frac{m}{s^2}$ ، $a_y = 1 \frac{m}{s^2}$ و در مکان سمت $y_0 = 104/8$ متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی کیفیت تصویر می‌توان به پارامترهای نسبت بزرگ‌ترین لوب فرعی به لوب اصلی $PSLR^2$ ، مجموع انرژی‌های موجود در لوب‌های کناری به لوب اصلی $ISLR^3$ و عرض لوب اصلی پاسخ ضربه در ۳ dB پایین‌تر از قله IRW^4 اشاره نمود.

لازم به توضیح است ISLR در حالت ایده‌آل (عدم فیلتر کردن) در حدود ۱۰ dB، $PSLR$ حدود ۱۳/۳ dB و در حالت استفاده از تابع پنجره کیزر^۵ مقادیر پایین‌تری دارد [۲۷]. در جدول ۳ پارامترهای کیفیت تصویر برای همان هدف با استفاده از پنجره کیزر یکسان مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود استفاده از روابط [۲۳] سبب ابهام سمت می‌شود که توسط سرعت هدف در جهت سمت به وجود آمده است. همچنین شتاب سمت هدف در نرخ چیرپ ظاهر نمی‌شود و با به‌کارگیری روابط [۲۳] قابل اصلاح نیست اما به‌واقع سبب پهن‌شدگی تابع

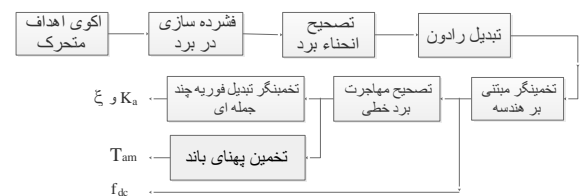
۴-۴. تخمین پهناهای باند داپلر

با توجه به این که سرعت هدف متحرک بر مقدار پهناهای باند داپلر مؤثر است می‌توان به یک رابطه مستقل دیگر دست یافت. از طرف دیگر اگر از تغییر زمان پرتوگیری هدف به خاطر سرعت هدف در جهت برد صرف‌نظر کنیم، می‌توانیم به رابطه زیر برای زمان دهانه مصنوعی هدف متحرک دست پیدا کنیم [۲۳]:

$$T_{am} = \frac{v T_a}{v - (v_y + 0.5 a_y T_{am})} \quad (۳۲)$$

با حل معادله درجه دوم بالا برحسب T_{am} یک معادله برحسب مجهولات v_y و a_y خواهیم داشت. چنانچه T_{am} قابل تخمین زدن باشد می‌توان یک معادله مستقل دیگر داشت. چون T_{am} مطابق رابطه (۳۰) به پهناهای باند داپلر و نرخ چیرپ وابسته است و

این دستگاه معادلات با استفاده از دستور solve در نرم‌افزار متلب قابل حل است و همواره دارای جواب می‌باشد. فلوجارت الگوریتم تخمین پارامترهای هدف متحرک در حالت لوچ با یک آنتن در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۷. فلوجارت الگوریتم تخمین پارامترهای هدف متحرک

۵. شبیه‌سازی

برای نمایش برتری روابط پیشنهادی این مقاله نسبت به مقالات دیگر آن را با دو مقاله یکی با مقالات جانب‌نگر که در روابط آن‌ها هدف شتابدار در نظر گرفته شده است [۲۳] و دیگری با مقالات در حالت لوچ که هدف با سرعت ثابت در نظر گرفته شده است [۱۲] مقایسه می‌کنیم. برای مقایسه منصفانه باحالت جانب‌نگر زاویه لوچی را بسیار کم به اندازه ۳ درجه در نظر می‌گیریم. با محاسبه تابع پخش نقطه هدف^۱ (PSF) در جهت سمت بعد از انجام جبران‌سازی‌های مربوط به حرکت مطابق روابط استخراجی،

¹ Point Spread Function (PSF)

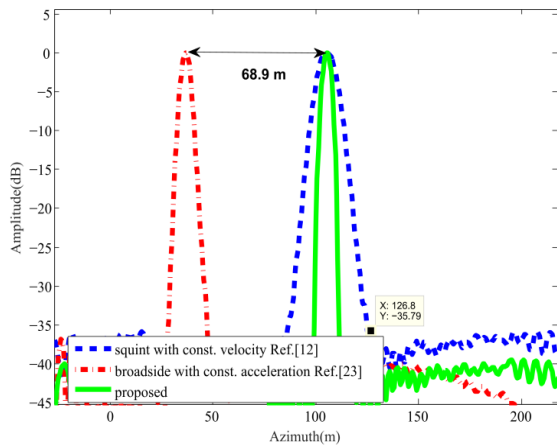
² Peak Side Lobe Ratio

³ Integrated Side Lobe Ratio

⁴ Impulse Response Width

⁵ Kaiser Window

کمینة خود دست یابد. چنانچه معیار آنتروپی کمینة نشود بایستی محدوده جستجو را تغییر داد.



شکل ۸. تابع PSF در جهت سمت یک هدف تحت زاویه لوچی سه درجه با استفاده از روابط پیشنهادی (خط توپر)، روابط جانب نگر (خط نقطه) و لوچ با سرعت ثابت (خط چین)

جدول ۴ دقت تخمین مرکز داپلر برای هدفی با مشخصات $v_x = 20 \frac{m}{s}$, $v_y = 30 \frac{m}{s}$, $a_x = 0 \frac{m}{s^2}$, $a_y = 0 \frac{m}{s^2}$ لوچ ۳۰، ۱۵ و صفر درجه ارائه شده است. این جدول و شکل ۹ نشان می‌دهد که در زوایای لوچ متفاوت، دقت تخمین تبدیل رادون متفاوت می‌باشد اما روش پیشنهادی به دلیل استفاده از معیار آنتروپی تصویر و یک روش جستجو با طول گام معین (خطای معین) می‌تواند جوابی بهتر از تبدیل رادون ارائه کند.

جدول ۳. پارامترهای مرتبط با شکل ۸

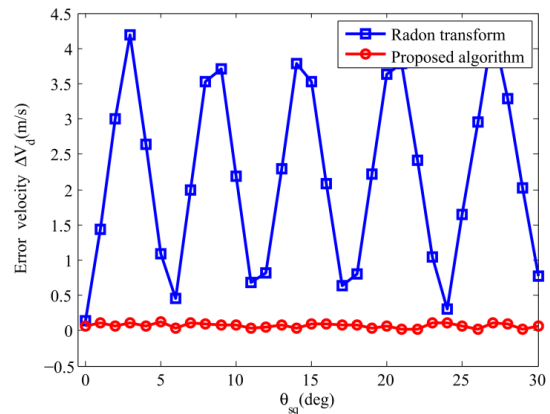
پارامتر	ISLR (dB)	IRW (sample)	PSLR (dB)
حالت جانب نگر با شتاب ثابت [۲۳]	-۲۵/۴۴	۱/۳۳	-۳۷/۶۴
حالت لوچ با سرعت ثابت [۱۲]	-۲۴/۵۲	۲/۸۲	-۳۵/۷۹
روش پیشنهادی	-۲۹/۶۴	۱/۱۶	-۳۷/۵۰

جدول ۴. تخمین مرکز داپلر در SAR لوچ توسط الگوریتم پیشنهادی و تبدیل رادون برای هدف متحرک $v_x = 20 \frac{m}{s}$, $v_y = 30 \frac{m}{s}$, $a_x = 0 \frac{m}{s^2}$, $a_y = 0 \frac{m}{s^2}$

$f_{dc} (Hz)$	$\theta_{sq} = 30^\circ$			$\theta_{sq} = 15^\circ$			$\theta_{sq} = 0^\circ$		
	مقدار واقعی	تبدیل رادون	روش پیشنهادی	مقدار واقعی	تبدیل رادون	روش پیشنهادی	مقدار واقعی	تبدیل رادون	روش پیشنهادی
	۴۰۴/۰۸۳۳	۴۰۹/۲۸۱۹	۴۰۴/۷۵۰۰	۲۶۸/۰۶۵۳	۲۹۱/۶۲۸۹	۲۶۸/۷۳۲۰	۱۱۵/۴۷۰۱	۱۳۱/۰۱۹۴	۱۱۶/۱۳۶۷

PSF می‌شود که در شکل ۸ با نمودار خط-نقطه مشخص شده است. استفاده از روابط [۱۲] که در حالت لوچ و با سرعت ثابت در نظر گرفته شده است گرچه مکان هدف را به‌طور صحیح تعیین می‌کنند اما سبب پهن‌شدگی تابع PSF می‌شود که در شکل ۸ با نمودار خط‌چین مشخص گردیده است. در ادامه برای بررسی قدرت روش پیشنهادی در محاسبه مرکز داپلر، تخمین $\hat{v}_d = \hat{v}_l - v \sin(\theta_{sq})$ با دو روش پیشنهادی و روش رادون محاسبه می‌شود. سپس تفاضل آن با مقدار واقعی (که از روی رابطه تئوری به دست می‌آید) برای هر روش محاسبه می‌گردد بدین ترتیب خطای تبدیل رادون از رابطه $\Delta V_d = \hat{v}_d|_{radon} - \hat{v}_d|_{theory}$ و خطای روش پیشنهادی از رابطه $\Delta V_d = \hat{v}_d|_{proposed} - \hat{v}_d|_{theory}$ منحنی خطای دو روش در شکل ۹ برحسب زاویه لوچی رسم شده است. پارامترهای راداری جدول ۱ و هدف نقطه‌ای با سرعت ۱۰ و ۸ متر بر ثانیه به ترتیب در جهت برد و سمت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه لوچی خطای تخمین با استفاده از تبدیل رادون افزایش می‌یابد اما به‌طور قابل توجهی روش پیشنهادی نتیجه بهتری ارائه می‌کند. برای رسیدن به دقت ۰/۰۹ در سرعت، در طول موج ۰/۳ متر طول گام $\Delta K = 0/1$ در نظر گرفته شده است که سرعت همگرایی مناسبی نیز دارد. نکته مهم در روش پیشنهادی آن است که محدوده جستجو طوری حول مقدار اولیه که از روش رادون به دست می‌آید انتخاب شود تا در این محدوده منحنی محدب آنتروپی، به

پارامترهای مرتبه دو و سه و زمان دهانه مصنوعی، دستگاه معادلات (۳۴) حل می‌شود. شکل ۱۰ طیف سمت همان هدف را با تقریب گوسی مرتبه ۸ برای محاسبه پهنای باند داپلر هدف مربوطه نشان می‌دهد. شکل ۱۰-الف و ب به ترتیب طیف سمت هدف را به ازای $SCNR=10$ dB و $SCNR=20$ dB نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پهنای باند با دقت مناسبی از این روش به دست می‌آید. جدول ۵ تخمین پارامترهای هدف متحرک مزبور را به ازای این دو $SCNR$ نشان می‌دهد. این جدول با به کارگیری روش مونت کارلو با ۵۰ تکرار به دست آمده است. برای بررسی دقت الگوریتم پیشنهادی در تخمین پارامترهای هدف متحرک، از تعیین خطای نسبی برحسب درصد استفاده شده است. خطای نسبی مثلاً برای سرعت در جهت برد از رابطه $\frac{|v_x - \hat{v}_x|}{v_x} \times 100\%$ به دست می‌آید. همان‌طور که جدول ۵ نشان می‌دهد خطای تخمین در $SCNR=10$ dB نیز می‌تواند با دقت مناسبی پارامترهای هدف را تعیین کند. البته این به دلیل استفاده از روش‌های تخمین مناسب مانند LPFT و روش پیشنهادی در تخمین مرکز داپلر است. این روش‌ها در برابر نویز و کلاتر نسبت به روش‌هایی مانند تقریب چندجمله‌ای که در [۲۳] ارائه شده است بسیار مقاوم‌تر است. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در $SCNR$ های پایین بسیار بهتر از الگوریتم ارائه شده [۲۳] عمل کند. در شکل ۱۱ خطای نسبی تخمین پارامترهای هدف را برحسب $SCNR$ نشان می‌دهد که خطای نسبی پارامتر سرعت در جهت برد، سرعت در جهت سمت، شتاب در جهت برد و شتاب در جهت سمت به ترتیب در الف، ب، ج و د، به ازای حالت جانب‌نگر و لوچ با زاویه ۳۰ درجه رسم شده است.

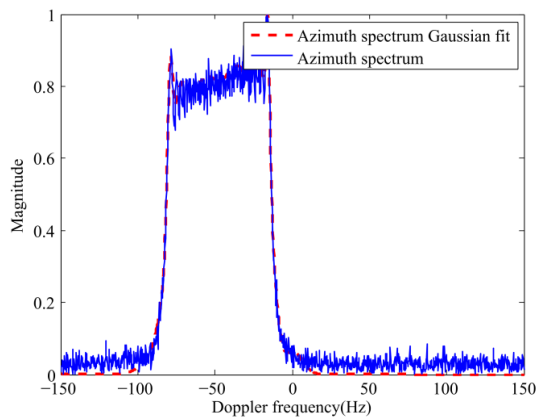


شکل ۹. منحنی خطای تخمین سرعت برحسب الگوریتم رادون و الگوریتم پیشنهادی

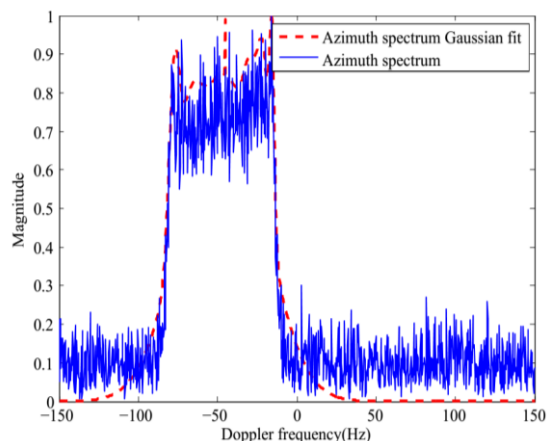
مطابق رابطه $\Delta f_{dc} = \frac{2}{\lambda} \Delta K$ می‌توان به دقت در محاسبه مرکز داپلر با به کارگیری روش پیشنهادی دست یافت که مستقل از زاویه لوچی می‌باشد و با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده حدوداً ۰/۶۶۷ هرتز می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثر نویز و کلاتر بر تخمین پارامترهای هدف، سامانه راداری مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود. داده خام هدف نقطه‌ای با شتاب ثابت با پارامتر $v_x = 20 \frac{m}{s}$, $v_y = 30 \frac{m}{s}$, $a_x = 0.8 \frac{m}{s^2}$, $a_y = 0.4 \frac{m}{s^2}$ به ازای زاویه لوچی ۳۰، ۱۵ و صفر درجه شبیه‌سازی می‌شود. سپس کلاتر و نویز گوسی به داده خام دریافتی از هدف متحرک متناسب با $SCNR=10$ dB و $SCNR=20$ dB اضافه می‌گردد. سیگنال به نویز (SNR) $SNR=25$ dB در نظر گرفته می‌شود. مطابق الگوریتم شکل ۷ عملیات فشرده‌سازی در برد و حذف مهاجرت برد مرتبه ۲ نسبت به اهداف ساکن انجام می‌گیرد. بعداز آن با استفاده از روش پیشنهادی تخمین \hat{v}_i انجام می‌شود و مهاجرت برد خطی به‌طور کامل حذف می‌شود. با تخمین

جدول ۵. تخمین پارامترهای هدف متحرک در SAR لوچ توسط الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	مقدار واقعی	SCNR=۲۰ dB				SCNR=۱۰ dB			
		$\theta_{sq} = 30$	خطای نسبی %	$\theta_{sq} = 0$	خطای نسبی %	$\theta_{sq} = 30$	خطای نسبی %	$\theta_{sq} = 0$	خطای نسبی %
$v_x (\frac{m}{s})$	۲۰	۲۰/۵۸۷۲	۲/۹۳	۲۰/۵۶۵۰	۲/۸۳	۲۰/۶۲۲۴	۳/۱۱	۲۰/۸۲۴۱	۴/۱۲
$v_y (\frac{m}{s})$	۳۰	۳۱/۳۱۶۱	۴/۳۸	۳۱/۲۲۸۹	۴/۰۹	۳۱/۶۶۸۵	۵/۵۶	۳۱/۶۲۸۸	۵/۴۳
$a_x (\frac{m}{s^2})$	۰/۸	۰/۷۳۴۵	۸/۱۹	۰/۷۳۷۷	۷/۷۸	۰/۷۱۴۹	۱۰/۶۴	۰/۷۳۳۸	۸/۲۸
$a_y (\frac{m}{s^2})$	۰/۴	۰/۴۰۴۰	۰/۹۹	۰/۴۰۳۱	۰/۷۶	۰/۳۵۴۴	۱۱/۳۹	۰/۳۶۹۵	۷/۶۱

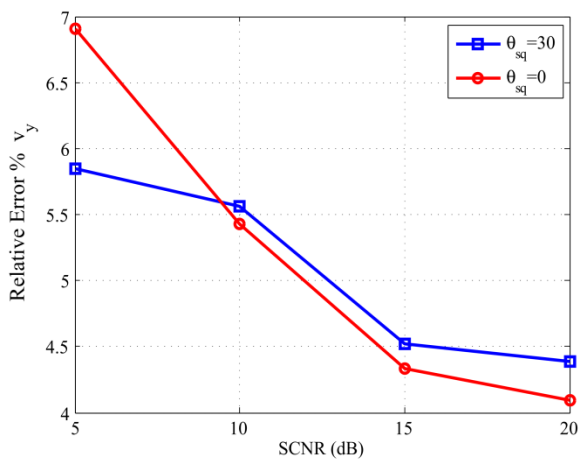


(ب)

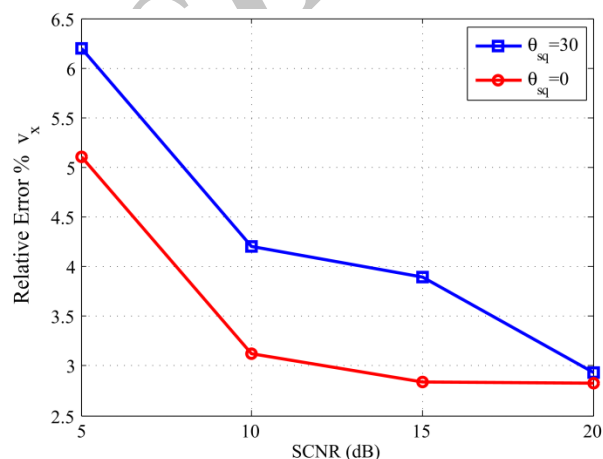


(الف)

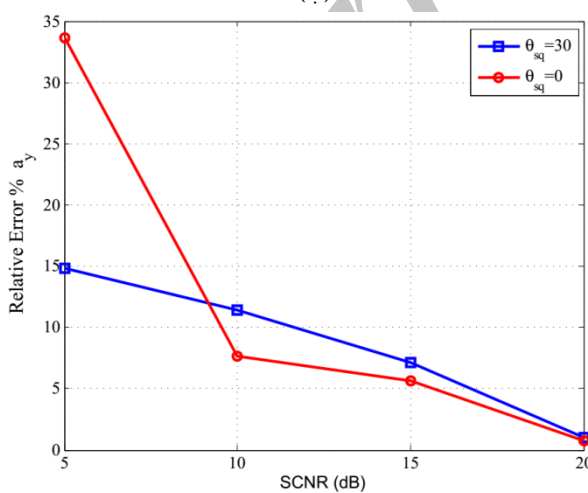
شکل ۱۰. طیف سمت هدف متحرک و تابع تقریب گوسی (الف) $SCNR=10$ dB (ب) $SCNR=20$ dB



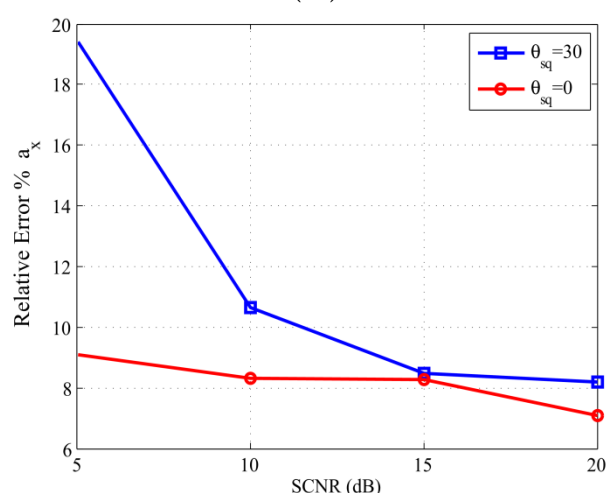
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱. منحنی خطای نسبی برحسب SCNR به ازای زوایای لوچ ۳۰ درجه و صفر درجه الف - سرعت در جهت برد ب- سرعت در جهت سمت ج- شتاب در جهت برد د- شتاب در جهت سمت

تبدیل رادون در تخمین مرکز داپلر، در حالت لوچ کاهش می‌یابد. بنابراین، به دست آوردن تغییر مرکز داپلر ناشی از سرعت هدف با دقت مناسب بسیار پیچیده می‌شود. بدین منظور در این مقاله روشی جدید پیشنهاد شد که می‌تواند دقت تخمین پارامترهای هدف را بسیار بهبود دهد. سپس با به‌کارگیری روش تقریب تبدیل فوریه چندجمله‌ای پارامترهای داپلری مرتبه دو سه با دقت بسیار خوب در حضور نویز و کلاتر تخمین زده می‌شود و با استفاده از تخمین زمان دهانه مصنوعی هدف متحرک، وابستگی معادلات به یکدیگر از میان می‌رود و با به‌وجود آمدن دستگاه معادلات مستقل امکان تخمین همه پارامترهای هدف متحرک میسر می‌شود. شبیه‌سازی‌ها دقت و سرعت الگوریتم پیشنهادی را در حضور نویز و کلاتر تحت زوایای لوچ متفاوت به‌خوبی نشان می‌دهد.

۷. مراجع

- [1] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, H. M. Jones, and E. C. Poggio, "Developments in radar imaging," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 4, pp. 363-400, 1984.
- [2] M. Soumekh, Synthetic aperture radar signal processing: New York: Wiley, 1999.
- [3] R. K. Raney, "Synthetic aperture imaging radar and moving targets," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 499-505, 1971.
- [4] J. K. Jao, "Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, pp. 1984-1992, 2001.
- [5] M. Soumekh, "Moving target detection and imaging using an X band along-track monopulse SAR," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, pp. 315-333, 2002.
- [6] J. Wang and X. Liu, "Velocity estimation of moving targets in SAR imaging," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 50, pp. 1543-1549, 2014.
- [7] S. R. S. Hashemi, S. Bayat, and M. M. Nayebe, "Ground-based moving target imaging in a circular strip-map synthetic aperture radar," in Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on, 2015, pp. 835-840.
- [8] W.-Q. Wang, Multi-antenna synthetic aperture radar: CRC Press, 2013.
- [9] J. W. Winkler, W. Christiansen, and B. D. Jeffs, "An investigation into ground moving target indication (gmt) using a single-channel synthetic aperture radar (sar)," 2013.
- [10] Z. Su, G. Wang, and R. Wu, "Moving target imaging via the high squint SAR," in Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on, 2011, pp. 1-4.
- [11] H. Shi, X. Guo, Z. Hou, and Y. Zhou, "Study on the signature of ground moving target for airborne squint SAR imaging," Journal of Electronics (China), vol. 29, pp. 477-484, 2012.
- [12] Z. Sun, J. Wu, Y. Huang, Z. Li, H. Yang, and J. Yang, "Ground moving target detection in squint SAR imagery based on Extended Azimuth NLCS and Deramp

۵-۱. بررسی پیچیدگی محاسباتی الگوریتم

برای بررسی میزان پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی، آن را از منظر زمان محاسباتی با الگوریتم ارائه‌شده در [۲۵] که در حالت جانب‌نگر ارائه شده است و از شتاب هدف در جهت سمت صرف نظر نموده است مقایسه می‌کنیم. در [۲۵] با توجه به حذف یک متغیر (شتاب سمت) از دسته معادلات، نیازی به محاسبه پهنای باند داپلر نمی‌باشد. همچنین برای محاسبه مرکز داپلر در حالت جانب‌نگر تنها از روش تبدیل رادون استفاده می‌کند. اما در این مقاله همان‌طور که بیان شد، دو بخش تخمین گر GBD و تخمین پهنای باند به مجموع بلاک‌های ارائه‌شده در [۲۵] اضافه گردیده است. زمان محاسباتی این دو بخش برای حالت لوچ با زاویه ۶۰ درجه، با همان پارامترهای جدول ۵ به ترتیب ۳/۳۱۹۳ و ۳/۲۲۷۳ ثانیه می‌باشد و برای حالت جانب‌نگر این زمان محاسباتی برای دو بخش برحسب ثانیه به ترتیب عبارتند از: ۱/۶۶۶۵ و ۲/۶۴۰۱. لازم به ذکر است این عملیات توسط یک رایانه شخصی با پردازشگر اینتل Core i5 فرکانس پالس ۲/۵ گیگاهرتز و حافظه ۴ گیگابایت انجام شده است. در جدول ۶ زمان محاسباتی هر عملیات تخمین به تفکیک و زمان سپری شده برای حل دستگاه معادلات برحسب ثانیه ارائه شده است.

جدول ۶. زمان انجام محاسبات هر بخش به‌زای هدف با مشخصات

جدول ۵ و $\theta_{sq} = 30$

زمان مجموع	زمان حل دستگاه معادلات	زمان تخمین LPFT	زمان تخمین پهنای باند	زمان تخمین تبدیل رادون	زمان مجموع
۲۲/۵۷۶۰	۰/۳۶۰۳	۱۵/۶۷۶۶	۲/۳۷۵۱	۳/۲۷۴۶	۰/۷۷۷۱

۶. جمع‌بندی

در این مقاله روابط هدف متحرک با شتاب ثابت در حالت لوچ برای سامانه SAR تک آنتنی در شیوه نواری ارائه شده است. تخمین پارامترهای هدف متحرک یعنی سرعت و شتاب در جهت برد و سمت به‌دست آمده است. به دلیل وجود اتصال برد و سمت در حالت لوچ، پارامترهای سرعت در جهت برد و سمت در محاسبه مرکز داپلر و همه پارامترهای سرعت و شتاب هدف متحرک در پارامتر نرخ چیرپ حضور دارند. بنابراین، سبب پیچیدگی و وابستگی شدید معادلات تخمین پارامترهای هدف به یکدیگر می‌گردد. مرکز داپلر که در حالت لوچ معمولاً بسیار بزرگ است سبب به وجود آمدن مهاجرت برد خطی و ابهام داپلر می‌شود. روش مرسوم تبدیل کی استون باوجود ابهام داپلر در حالت لوچ کارایی خود را از دست می‌دهد. همچنین دقت روش

- [21] Y.-K. Kong, B.-L. Cho, and Y.-S. Kim, "Ambiguity-free Doppler centroid estimation technique for airborne SAR using the Radon transform," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 43, pp. 715-721, 2005.
- [22] W. Li, J. Yang, Y. Huang, and J. Wu, "A Geometry-Based Doppler Centroid Estimator for Bistatic Forward-Looking SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, pp. 388-392, 2012.
- [23] S. Zhu, G. Liao, H. Tao, and Z. Yang, "Estimating ambiguity-free motion parameters of ground moving targets from dual-channel SAR sensors," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, pp. 3328-3349, 2014.
- [24] Y. Jungang, H. Xiaotao, J. Tian, J. Thompson, and Z. Zhimin, "New approach for SAR imaging of ground moving targets based on a keystone transform," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, pp. 829-833, 2011.
- [25] J. Yang, C. Liu, and Y. Wang, "Imaging and parameter estimation of fast-moving targets with single-antenna SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, pp. 529-533, 2014.
- [26] R. Klemm, *Applications of space-time adaptive processing* vol. 14: IET, 2004.
- [27] I. G. Cumming and F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*: Artech House, 2005.
- [28] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*: Artech House, 1995.
- [29] R. P. Perry, R. C. DiPietro, and R. L. Fante, "SAR imaging of moving targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, pp. 188-200, 1999.
- processing," in 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014, pp. 600-603.
- [13] M. Y. Jin, "Optimal Doppler centroid estimation for SAR data from a quasi-homogeneous source," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 1022-1025, 1986.
- [14] V. Pascazio, G. Schirinzi, and A. Farina, "Moving target detection by along-track interferometry," in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001, pp. VII: 3024-3026.
- [15] S. Barbarossa and A. Farina, "Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. 2. Joint time-frequency analysis by Wigner-Ville distribution," in *IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing*, 1992, pp. 89-97.
- [16] V. C. Chen and H. Ling, *Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis*: Artech House, 2002.
- [17] H.-B. Sun, G.-S. Liu, H. Gu, and W.-M. Su, "Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, pp. 1416-1424, 2002.
- [18] J. R. Fienup, "Detecting moving targets in SAR imagery by focusing," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, pp. 794-809, 2001.
- [19] J. R. Fienup and A. Kowalczyk, "Detecting moving targets in SAR imagery by using a phase-error correction algorithm," in *SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics*, 1995, pp. 337-343.
- [20] J. J. Sharma, C. H. Gierull, and M. J. Collins, "The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, pp. 134-147, 2006.

Estimation of Ground Moving Target Parameters in Squint Single-Antenna Synthetic Aperture Radar

S. M. Zabihi Maddah, S. A. Seyedein*

Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 20/10/2016, Accepted: 22/01/2017)

Abstract

In this paper, by considering a squint angle for synthetic aperture radar in the strip-map mode, a method is proposed for estimating parameters of a fixed acceleration moving target. Non-zero Doppler centroid and range-azimuth coupling in the squint mode add complexity to estimation equations of moving target parameters and cause Doppler ambiguity. This, in turn, causes to lose the efficiency of using the keystone transform. Furthermore, Radon transform in the squint mode will not give accurate results in determining the unambiguous Doppler centroid. Hence, in this paper, by using a Geometry-based Doppler centroid estimator, an approach is proposed to improve the precision of Radon transform which is capable to correct linear range migration. Finally, by employing local polynomial Fourier transform, Doppler parameters of order two and three are obtained. By estimating Doppler bandwidth, the target synthetic aperture time is then obtained. The accuracy of our derived equations is examined and verified by simulation just using a single antenna.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), Squinted SAR, Ground Moving Target, Parameter Estimation.