

## تخمین مشخصه‌ها و تشکیل تصویر هدف متحرک زمینی در رادار

## روزنه مصنوعی دوپایه تک ایستان

سید محمد ذبیحی مداح<sup>۱</sup>، سیدعلیرضا سیدین<sup>۲\*</sup>

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

(دریافت: ۹۶/۰۲/۲۴؛ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۸)

## چکیده

در این مقاله روابط مربوط به سیگنال دریافتی از هدف متحرک زمینی با شتاب ثابت در یک حالت خاص از رادار روزنه مصنوعی دوپایه، به نام تک ایستان (one-stationary) در صفحه برد مایل استخراج شده است. در ساختار تک ایستان معمولاً به دلیل پهنای پرتو وسیع و با فرض حرکت شتابدار هدف (مانند اتومبیل)، انحنای برد بوجود آمده و ابهام داپلر بسیار بزرگ می‌باشد، بنابراین، روش‌هایی مانند تبدیل رادون (Radon) و تبدیل کی‌استون (Keystone) کارایی خود را برای تخمین مرکز داپلر و حذف مهاجرت برد از دست می‌دهند. در این مقاله الگوریتمی دومرحله‌ای برای تخمین مرکز داپلر که تلفیقی از تبدیل رادون و یک الگوریتم جستجو است ارائه می‌شود و سپس با استخراج یک دستگاه معادلات، تخمینی از سرعت و شتاب هدف حاصل می‌شود و در نهایت الگوریتم تشکیل تصویر هدف ارائه می‌گردد. شبیه‌سازی، دقت روابط و قدرت الگوریتم پیشنهادی را در حضور نویز و کلاتر در مقایسه با الگوریتم‌های مرسوم تأیید می‌کند.

## واژگان کلیدی

رادار دهانه مصنوعی دوپایه، هدف متحرک زمینی، تخمین مشخصه‌ها، تشکیل تصویر.

## ۱- مقدمه

که شامل سرعت و شتاب در جهت برد و سمت می‌باشد [۹-۸]. به‌علاوه در SAR تک‌پایه به دلیل استفاده از فرستنده و گیرنده بر روی یک سکو، آسیب‌پذیری آن در کاربردهای نظامی بسیار زیاد می‌باشد اما در SAR دوپایه<sup>۷</sup> (BSAR) که یکی از ساختارهای آن تک ایستان<sup>۸</sup> (OS-BSAR) است به دلیل جدا بودن فرستنده و گیرنده از هم که در آن معمولاً فرستنده ساکن و گیرنده بر روی سکوی متحرک قرار دارد امکان رهگیری و آسیب رساندن به گیرنده رادار، به دلیل غیرفعال بودن آن بسیار کاهش می‌یابد [۱۰-۱۲]. ویژگی دیگر این ساختار استفاده آن به صورت غیرفعال<sup>۹</sup> می‌باشد. در این صورت به جای فرستنده، می‌توان از سیگنال‌های موجود در محیط مانند<sup>۱۰</sup> DVB-T،<sup>۱۱</sup> DVB-S و ... استفاده نمود [۱۳]. بنابراین، سبب کاهش هزینه ساخت فرستنده می‌گردد. اما در این مقاله تخمین مشخصه‌های هدف متحرک و تصویرسازی آن با به‌کارگیری ساختار OS-BSAR فعال، ارائه می‌شود. چالش‌های عمده در این ساختار ایجاد انحنای برد بزرگ‌تر

رادار روزنه مصنوعی<sup>۱</sup> به منظور تصویربرداری از زمین و اهداف ساکن در شرایط آب و هوایی مختلف به وجود آمده است. برای استفاده از آن در کارهای نظامی، مانند آشکارسازی هدف متحرک زمینی<sup>۲</sup> (GMTI)، تصویرسازی، موقعیت‌یابی و تخمین مشخصه‌های هدف متحرک، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است [۱-۲]. در عمل حرکت هدف باعث تفاوت میان مشخصه‌های داپلری هدف و کلاتر (اهداف ساکن) می‌گردد که نتیجه آن محوشدگی<sup>۳</sup>، جابجایی مکانی (ابهام سمت<sup>۴</sup>)، عدم تقارن گلبرگ‌های<sup>۵</sup> فرعی و به وجود آمدن ابهام داپلر به‌ویژه برای اهداف سریع می‌باشد [۳-۴]. اگرچه الگوریتم‌های گوناگونی برای تصویرسازی اهداف متحرک در SAR تک‌پایه<sup>۶</sup> پیشنهاد شده‌اند [۵-۷]، اما در اغلب سناریوها برای به‌دست آوردن تصویر دقیق از هدف متحرک نیاز به محاسبه مشخصه‌های حرکتی هدف است

\* نویسنده مسئول: seyedin@um.ac.ir

7- Bistatic-SAR(BSAR)

8- One Stationary-BSAR (OS-BSAR)

9- Passive

10- Digital Video Broadcasting -Satellite

11- Digital Video Broadcasting -Satellite

1- Synthetic Aperture Radar (SAR)

2- Ground Moving Target Indication (GMTI)

3- Blurred

4- Azimuth Ambiguity

5- Lobe

6- Mono-Static

صرف نظر نیست نمی تواند تخمین دقیقی ارائه کند. همچنین افزایش دقت زاویه در تبدیل رادون زمان تخمین را بسیار افزایش می دهد [۱۸]. در [۱۸] با در نظر گرفتن هدف با سرعت ثابت روشی برای تخمین سرعت و تصویرسازی آن در هندسه OS-BSAR ارائه می شود. اما اثر نویز و کلاتر در این روش مورد بررسی قرار نمی گیرد و تنها به سرعت الگوریتم و دقت آن در تخمین مشخصه های هدف متحرک با سرعت ثابت اشاره می شود. در آن روش مقدار اولیه برای الگوریتم جستجو از روش تقریب منحنی<sup>۱۲</sup> مانند تقریب چندجمله ای<sup>۱۳</sup> به دست می آید که همان طور که بررسی خواهد شد این رویکرد، روش مناسبی در حضور کلاتر و نویز محسوب نمی شود.

در این مقاله یک روش جدید تخمین مشخصه ها و تصویرسازی برای هدف متحرک زمینی با شتاب ثابت که حداکثر سرعتی حدود  $30 \pm \text{m/s}$  و حداکثر شتابی در حدود  $1 \text{ m/s}^2 \pm$  دارد پیشنهاد شده است. ابتدا مدل برد مایل برای OS-BSAR ارائه می شود سپس با توجه عدم وجود اطلاع قبلی از مقدار سرعت و شتاب هدف و به کارگیری تبدیل رادون، تخمین اولیه ای برای مرکز داپلر به دست می آید. سپس با یک روش جستجو مبتنی بر معیار کنتراست به مرکز داپلر بهینه در حضور ابهام داپلر دست می یابد. در این روش از معیار کنتراست استفاده گردیده که از معیار آنتروپی<sup>۱۴</sup> که در [۲۰] استفاده شده است، رفتار بهتری از خود نشان می دهد و بدون به کارگیری روش های درون یابی مانند تبدیل کی استون<sup>۱۵</sup> [۱۹]، به سرعت و دقت بیشتری در تخمین مشخصه ها نسبت به [۲۰] دست می یابد. سپس با اصلاح مهاجرت سلولی برد<sup>۱۶</sup> (RCMC) و به کارگیری روش تبدیل فوریه چندجمله ای محلی<sup>۱۷</sup> (LPFT) مشخصه داپلر مرتبه دو و سه تخمین زده می شود. همچنین تصویرسازی هدف متحرک در SAR دوپایه ارائه می شود.

جهت ارائه موضوع پس از بخش مقدمه، در بخش دوم، مدل سیگنال دریافتی در حضور هدف متحرک زمینی برای OS-BSAR ارائه می شود. در بخش سوم الگوریتم تخمین مشخصه های داپلر ارائه می شود. در بخش چهارم شبیه سازی های مورد نیاز برای تأیید صحت روابط و دقت تخمین مشخصه های هدف متحرک ارائه می گردد. سپس نتیجه گیری در بخش پنجم خواهد آمد.

و وجود ابهام داپلر نسبت به حالت تک پایه است. چون در این حالت امکان ردگیری گیرنده به راحتی وجود ندارد، می تواند سکوی پروازی در ارتفاعات کم پرواز کند و با داشتن پرتو وسیع خود سبب افزایش زمان پرتوگیری از هدف شده و در نتیجه انحناء برد را افزایش می دهد. با افزایش انحناء برد کارایی روش تبدیل رادون برای اصلاح مهاجرت برد خطی و تخمین مرکز داپلر از دست می رود. همچنین وجود ابهام داپلر با وجود مرکز داپلر غیر صفر در هندسه BSAR و در حضور هدف متحرک امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین، تخمین دقیق مرکز داپلر در هندسه OS-BSAR بسیار حائز اهمیت است. یکی از مهم ترین مشخصه ها که باید با دقت زیادی تخمین زده شود مرکز داپلر هدف متحرک می باشد. فرایند تخمین مرکز داپلر در حالت کلی به دو بخش تخمین مرکز داپلر باند پایه و تخمین عدد ابهام<sup>۱</sup> تقسیم می شود. مقداری خطا در تخمین مرکز داپلر باند پایه مجاز است اما در عدد ابهام هیچ خطایی پذیرفتنی نیست و باید با مقدار واقعی برابر باشد [۱۱-۱۰]. تاکنون روش های مختلفی در تخمین مرکز داپلر و تحلیل مساله ابهام داپلر ارائه شده است. از روش های تخمین مرکز داپلر باند پایه، متوسط ضریب همبستگی متقابل<sup>۲</sup> (ACCC) و الگوریتم چندگانگی طول موج<sup>۳</sup> (WDA) را می توان نام برد [۱۴]. همچنین روش های همبستگی متقابل چند نگاه<sup>۴</sup> (MLCC) و ضربان فرکانسی چند نگاه<sup>۵</sup> (MLBF) با تقسیم سیگنال اولیه به دو سیگنال فرعی با فرکانس های حامل متفاوت برای محاسبه ابهام داپلر ارائه شده اند [۱۵]. در میان الگوریتم های بیان شده MLCC برای صحنه با کنتراست کم و MLBF برای صحنه با کنتراست بالا مفید است. روش چندگانگی فرکانس تکرار پالس<sup>۶</sup> نیز با صرف نظر نمودن از ابهام داپلر بر اساس مجموعه ای از فرکانس ها مرکز داپلر را تخمین می زند که به دلیل پیچیدگی سخت افزاری تنها در شیوه SAR جارویی<sup>۸</sup> استفاده می شود [۱۶].

روش دیگر برای محاسبه مرکز داپلر، تبدیل رادون<sup>۹</sup> [۱۷] است که بر اساس ویژگی های خطی سیگنال فشرده سازی شده در برد عمل می کند. این روش برای صحنه ها با کنتراست متوسط و بالا با دقت مناسبی مرکز داپلر را تخمین می زند. البته تبدیل رادون نیز هنگامی که مهاجرت برد مرتبه دو<sup>۱۰</sup> (انحناء برد<sup>۱۱</sup>) قابل

- 1- Number - Ambiguity
- 2- Average Cross-Correlation Coefficient (ACCC)
- 3- Wavelength Diversity Algorithm (WDA)
- 4- Multilook Cross-Correlation (MLCC)
- 5- Multilook Beat Frequency (MLBF)
- 6- Contrast
- 7- Multiple PRF
- 8- Scan-SAR
- 9- Radon Transform
- 10- Quadratic Range Migration
- 11- Range Curvature

- 12- Curve Fitting
- 13- Polyfit
- 14- Entropy
- 15- Keystone Transform
- 16- Range Cell Migration Correction (RCM)
- 17- Local Polynomial Fourier Transform (LPFT)

آمدن خللی در محاسبات این زمان را  $\eta = \eta_c = 0$  در نظر می‌گیریم. با در نظر گرفتن زاویه نشیب  $\psi_t$  [۲۲]، روابط  $\cos(\psi_t) = \frac{x_0}{R_{0t}}$  و همچنین  $\cos(\theta_{sq}) \cos(\psi_t) = \frac{x_0}{R_{ct}}$  برقرار خواهد بود. برای گیرنده با در نظر گرفتن زاویه نشیب  $\psi_r$  رابطه  $\cos(\psi_r) = \frac{x_0 - x_r}{R_{0r}}$  برقرار خواهد بود. فرض کنید پالس ارسالی از فرستنده یک سیگنال LFM است، بنابراین سیگنال بازگشتی از یک هدف نقطه‌ای در باند پایه بعد از فشرده‌سازی در برد که توسط گیرنده دریافت خواهد شد به صورت زیر است [۱۵]:

$$s(\tau, \eta) = Aw_a(\eta - \eta_c) \text{sinc}[B_r(\tau - \frac{R(\eta)}{c})] \exp(-j2\pi R(\eta)/\lambda), \quad (1)$$

$$-T_1 < |\eta - \eta_c| < T_2$$

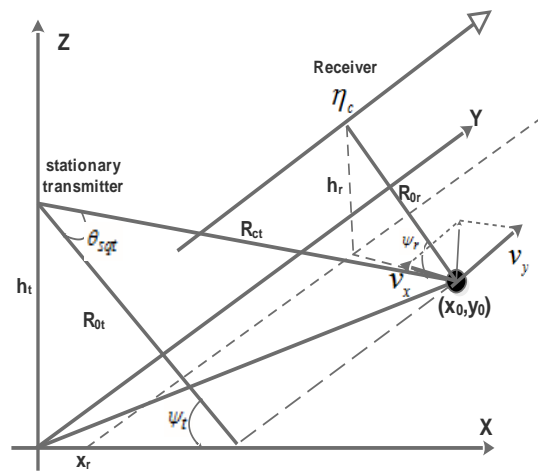
در این رابطه،  $\eta$  متغیر زمان سمت (زمان آهسته)،  $\tau$  متغیر زمان برد (زمان سریع)،  $R(\eta)$  فاصله هدف تا سکو برحسب زمان سمت،  $T_a = T_1 + T_2$  مدت زمانی که هدف ساکن در پرتو آنتن رادار قرار داشته است،  $c$  سرعت نور،  $\lambda$  طول موج سیگنال ارسالی و  $k_r$  نرخ چیرپ سیگنال ارسالی است.  $w_a(\eta)$  تابع الگوی آنتن گیرنده در جهت سمت می‌باشد.  $A$  ضریب پراکنش هدف می‌باشد که در اینجا ثابت در نظر گرفته می‌شود و از نوسانات هدف، اثرات قطبش امواج صرف نظر می‌شود.  $B_r$  پهنای باند سیگنال ارسالی است. همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود برای نوشتن  $R(\eta)$  برحسب زاویه لوچ فرستنده، در صفحه برد مایل گیرنده و فرستنده به ترتیب، برای سرعت در جهت برد مایل (در صفحه دویپر صفر)  $v_{nr} = v_x \cos(\psi_r)$  و  $v_{nt} = v_x \cos(\psi_t)$  و برای شتاب به ترتیب  $a_{nr} = a_x \cos(\psi_r)$  و  $a_{nt} = a_x \cos(\psi_t)$  فرض می‌شود. بنابراین، در صفحه برد مایل نسبت به فرستنده و گیرنده داریم:

$$R(\eta) = \sqrt{(R_{0r} - v_{nr}\eta - 0.5a_{nr}\eta^2)^2 + (v_{ny}\eta - 0.5a_{ny}\eta^2)^2} + \sqrt{(R_{0t} - v_{nt}\eta - 0.5a_{nt}\eta^2)^2 + (R_{0t} \tan(\theta_{sq}) + v_{ty}\eta + 0.5a_{ty}\eta^2)^2} \quad (2)$$

$v_y$  سرعت در جهت سمت می‌باشد. با انجام محاسبات ساده‌سازی و نوشتن بسط تیلور تا مرتبه سه برای این رابطه حول  $\eta = 0$  و بعد از انجام محاسبات ساده‌سازی می‌توان آن را به صورت رابطه (۳) نوشت:

## ۲- مدل SAR دویایه با ساختار تک ایستاد OS-BSAR

مدل هندسه OS-BSAR با یک هدف متحرک در شکل (۱) نشان داده شده است. فرض کنید فرستنده ثابت و گیرنده در جهت  $Y$  با سرعت  $v$  حرکت کرده و در مد نواری و در حالت کنارانگر کار می‌کند. هدف در لحظه  $\eta = 0$  ( $\eta$  متغیر زمان سمت است) در مختصات  $(x_0, y_0)$  و با سرعت  $v_x$  و شتاب  $a_x$  در جهت برد (عمود بر سمت)، سرعت  $v_y$  و شتاب  $a_y$  در راستای حرکت سکو (جهت سمت) بر روی سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌شود گیرنده در لحظه  $\eta = 0$  در مکان  $(x_r, y_0, h_r)$  و به فاصله  $R_{0r}$  از هدف قرار داشته باشد. کمترین فاصله هدف تا گیرنده،  $h_r$  ارتفاع سکوی گیرنده از سطح زمین می‌باشد. فرستنده در مرکز دستگاه مختصات فرض می‌شود.  $R_{0t}$  کمترین فاصله هدف تا فرستنده،  $h_t$  ارتفاع سکوی فرستنده از سطح زمین می‌باشد.  $\theta_{sq}$  زاویه لوچی آنتن فرستنده است.



شکل (۱): هندسه OS-BSAR با هدف متحرک

بنابراین، کمترین فاصله هدف تا گیرنده  $R_{0r} = \sqrt{(x_0 - x_r)^2 + h_r^2}$  و فرستنده  $R_{0t} = \sqrt{x_0^2 + h_t^2}$  است. فاصله فرستنده تا هدف در لحظه  $\eta = \eta_c$  به صورت  $R_{ct} = R_{0t} / \cos(\theta_{sq})$  قابل محاسبه است.  $\eta_c$  لحظه عبور مرکز پرتو از روی هدف می‌باشد. در این لحظه فرض می‌شود هدف در مرکز پرتو ترکیبی فرستنده و گیرنده می‌باشد. بدون به وجود

$$\begin{aligned}
 R(\eta) = & R_{ct} + R_{Or} - [v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}) + v_{rr}] \eta \\
 & + \left( \frac{[v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_{rt} R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{Or}}{2R_{Or}} \right) \eta^2 \\
 & + \left( \frac{v_{rt} a_{rt} \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_{rt} a_y + a_{rt} v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} \right. \\
 & \left. + \frac{(v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}))(v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) - v_y \cos(\theta_{sqt}))^2}{2R_{ct}^2} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{Or}} + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{Or}^2} \right) \eta^3
 \end{aligned} \tag{۳}$$

با تعریف سرعت هدف در جهت دیدمستقیم،  $v_l$  و عمود بر جهت دید  $v_{l\perp}$  خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 v_l &= v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}) \\
 v_{l\perp} &= v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) - v_y \cos(\theta_{sqt})
 \end{aligned} \tag{۴}$$

$s(\tau, \eta)$

$$\begin{aligned}
 &= A w_a (\eta - \eta_c) \text{sinc} [B_r (\tau - \frac{R_{ct} + R_{Or} + [v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}) + v_{rr}] \eta}{c}) \\
 & - \left( \frac{[v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_{rt} R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{2R_{ct} c} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{Or}}{2R_{Or} c} \right) \eta^2 \\
 & - \left( \frac{v_{rt} a_{rt} \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_{rt} a_y + a_{rt} v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct} c} \right. \\
 & \left. + \frac{(v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}))(v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) - v_y \cos(\theta_{sqt}))^2}{2R_{ct}^2 c} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{Or} c} + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{Or}^2 c} \right) \eta^3] \tag{۵} \\
 & \times \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{ct} + R_{Or})) \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} (v_l + v_{rr}) \eta) \\
 & \times \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{[v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_{rt} R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{Or}}{2R_{Or}} \right) \eta^2) \\
 & \times \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{v_{rt} a_{rt} \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_{rt} a_y + a_{rt} v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \right. \\
 & \left. \frac{v_l v_{l\perp}^2}{2R_{ct}^2} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{Or}} + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{Or}^2} \right) \eta^3)
 \end{aligned}$$

دلیل عرض پرتو وسیع یا ارتفاع کم سکوی گیرنده، نمی‌توان از انحناء برد صرف‌نظر نمود. بنابراین، تبدیل رادون به‌تنهایی نمی‌تواند تخمین مناسبی از مرکز داپلر ارائه کند. در رابطه (۵)، بعد از تابع سینک، جمله‌نمایی اول (ضریب  $\eta$ ) جابجایی مرکز داپلر را به خاطر سرعت هدف در جهت برد و سمت نشان می‌دهد. با توجه به زاویه کوچکی که برای آنتن فرستنده فرض می‌شود این جمله نشان می‌دهد مانند سامانه SAR تک پایه در حالت لوچ، هدف با وجود تنها سرعت در جهت سمت، در تصویر

در این رابطه، جمله اول که شامل تابع سینک است مکان تصویر هدف در جهت برد را نشان می‌دهد. جمله‌ای که در تابع سینک نسبت به  $\eta$  از مرتبه اول است مهاجرت برد خطی<sup>۱</sup> (جابجایی برد) را نشان می‌دهد و جمله‌ای که دارای ضریب  $\eta^2$  و  $\eta^3$  است به ترتیب مهاجرت برد مرتبه دو<sup>۲</sup> (انحناء برد) و مرتبه بالاتر را نشان می‌دهد. اگر مهاجرت برد خطی از انحناء برد خیلی بیشتر باشد می‌توان از انحناء برد صرف‌نظر نمود. اما در عمل به

- 
- 1- Linear Range Migration
  - 2- Range Walk
  - 3- Quadratic Range Migration
  - 4- Range Curvature

سپس برای تخمین مشخصه نرخ چیرپ از روش تبدیل فوری چندجمله‌ای محلی (LPFT) استفاده می‌شود که روش بسیار قدرتمندی برای تخمین مشخصه در حضور نویز می‌باشد [۲۳].

فاز دو جمله‌نمایی اول، دوم و سوم در رابطه (۵) که تابعی از زمان آهسته است فاز سمت هدف متحرک نامیده می‌شود و به‌صورت رابطه (۶) نشان داده می‌شود [۲۱]:

$$\varphi(\eta) = 2\pi(f_{dc}\eta + \frac{1}{2}K_a\eta^2 + \frac{1}{3}\xi\eta^3) \quad (6)$$

که در آن،  $f_{dc}$  مرکز داپلر،  $K_a$  نرخ چیرپ و  $\xi$  ضریب مرتبه سه و به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{dc} = \frac{v_l + v_r}{\lambda} \quad (7)$$

$$K_a = - \left( \frac{[v_n \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_n R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{R_{ct}} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{0r}}{R_{0r}} \right) / \lambda \quad (8)$$

$$\xi = -3 \left( \frac{v_n a_n \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_n a_y + a_n v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \frac{v_l v_l}{2R_{ct}^2} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{0r}} + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{0r}^2} \right) / \lambda \quad (9)$$

هدف مرکز داپلر می‌تواند عددی بزرگ بوده و مهاجرت برد خطی بسیار بزرگ باشد، اما برای افزایش کارایی تبدیل رادون، بایستی ابتدا اصلاح انحناء برد انجام شود. اگر مدت‌زمان پرتوگیری از هدف در بازه  $\left[-\frac{T_a}{2}, \frac{T_a}{2}\right]$  در نظر گرفته شود، در این صورت بیشینه مهاجرت برد مرتبه دو عبارت است از:

$$R_Q = \left( \frac{[v_n \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_n R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{0r}}{2R_{0r}} \right) \left( \frac{T_a}{2} \right)^2 \quad (10)$$

هدف است به‌دست آورده شود کافی است  $R_Q$  را از مقدار انحناء برد مربوط به اهداف ساکن،  $R_{Q0}$ ، کم شود. بنابراین، برای اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو نسبت به اهداف ساکن تابع زیر در حوزه فرکانس برد و زمان سمت در داده دریافتی ضرب می‌شود:

جابجا می‌شود. جمله‌نمایی دوم (ضریب  $\eta^2$ ) نرخ چیرپ هدف متحرک را نشان می‌دهد. جمله‌نمایی سوم ضریب مرتبه سه نامیده می‌شود. در [۱۸] که هدف تنها با سرعت ثابت در نظر گرفته شده از روش تقریب چندجمله‌ای برای تخمین مقدار اولیه نرخ چیرپ استفاده شده است. سپس مشخصه نرخ چیرپ را با استفاده از حذف جمله‌نمایی مربوط به مهاجرت برد مرتبه دو در داده دریافتی تخمین می‌زند و این کار را با به‌کارگیری الگوریتم جستجو بر اساس معیار کنتراست تصویر انجام می‌دهد. اما روش مذکور در حضور سیگنال به کلاتر (SCR) پایین روش مناسبی نخواهد بود. در این مقاله با ترکیب دو روش تبدیل رادون و تخمین گر مبتنی بر هندسه که بر یک روش جستجو استوار است و در SCR پایین قدرت مناسبی دارد [۲۰] تخمین مرکز داپلر بهبود قابل توجهی خواهد یافت.

### ۳- الگوریتم پیشنهادی تخمین مشخصه‌ها

بعد از فشرده‌سازی در برد، به دلیل مهاجرت سلولی برد (RCM) سیگنال بازگشتی از هدف متحرک چندین سلول برد را می‌پوشاند. به‌منظور بهبود توان و تخمین دقیق مشخصه‌های طیفی سیگنال، باید مهاجرت سلولی برد را به‌طور کامل جبران نمود. گرچه در حالت OS-BSAR، با توجه به مکان و سرعت

با توجه به این‌که رابطه (۱۰) تابعی از سرعت و شتاب هدف می‌باشد که از قبل مقدار آن معلوم نیست. بنابراین، اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو به‌طور کامل ممکن نیست. اما آن مقدار از انحناء برد که مربوط به اهداف ساکن است قابل اصلاح است. برای این‌که مقدار مهاجرت برد مرتبه دو را که فقط ناشی از حرکت

### ۱-۳- تخمین مرکز داپلر

در ساختار OS-BSAR وجود ابهام داپلر با توجه به جابجایی زیاد مرکز داپلر که به هندسه مساله وابسته است باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، روش‌هایی باید برای تخمین مرکز داپلر و یا اصلاح مهاجرت برد خطی استفاده شود که در حضور ابهام داپلر کارایی داشته باشد روش تبدیل کی استون در حضور ابهام داپلر برای اصلاح مهاجرت برد کارایی ندارد و در ضمن، تخمینی از مرکز داپلر ارائه نمی‌کند [۲۱]. در [۲۴] نیز از روش دامنه برای تخمین مرکز داپلر استفاده می‌کند که در حضور ابهام داپلر کارایی خود را از دست می‌دهد. بنابراین، در اینجا از روش تبدیل رادون استفاده خواهد شد که می‌تواند مرکز داپلر را در حضور ابهام داپلر تخمین بزند. روش تبدیل رادون مبتنی بر تخمین شیب خط در حوزه تصویر می‌باشد. 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 سلول‌های پیموده شده با استفاده از رابطه (۱۰) در این دو جهت خواهیم داشت:

$$\Delta x = \frac{(v_l + v_r)T_a}{c/2f_s} \quad \Delta y = PRF \cdot T_a \quad (12)$$

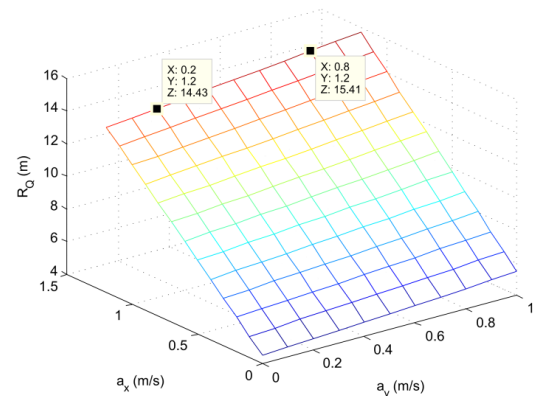
در این رابطه،  $f_s$  نرخ نمونه‌برداری برد،  $\Delta x$  و  $\Delta y$  به ترتیب سلول‌های پیموده شده در جهت برد و سمت می‌باشد اگر فرض شود داریم:

$$\tan(\theta) = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{v_d \times 2f_s}{PRF \times c} \quad (13)$$

در این رابطه،  $\theta$  زاویه میان خط و محور سمت است. با تخمین  $\theta$  با استفاده از تبدیل رادون، می‌توان به مقدار  $\hat{v}_d$  دست یافت. روش تبدیل رادون به علت وجود انحناء برد بزرگ دارای خطای زیادی در تخمین مرکز داپلر می‌باشد. برای روشن نمودن این موضوع خطای تبدیل رادون برای تخمین  $\hat{v}_d$  برحسب شتاب هدف در شکل (۳) رسم شده است. در ساختار OS-BSAR با هدف متحرک شتابدار، تنها استفاده از روش تبدیل رادون برای تخمین مرکز داپلر مناسب نمی‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود؛ خطای تخمین تبدیل رادون با افزایش شتاب در جهت برد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما شتاب هدف در جهت سمت، بر تبدیل رادون اثر ناچیزی دارد و دلیل آن هم عدم تغییر در انحناء برد است.

$$y_1(\tau, \eta) = \text{ifft} \left\{ s(f_r, \eta) \exp(j \frac{2\pi v^2}{cR_{0r}} f_r \eta^2) \right\} \quad (11)$$

در این رابطه،  $s(f_r, \eta)$  تبدیل فوریه حوزه برد از سیگنال فشرده‌سازی شده رابطه (۵) است.  $\text{ifft}(\cdot)$  عملگر عکس تبدیل فوریه است.  $y_1(\tau, \eta)$  سیگنالی است که انحناء برد مربوط به اهداف ساکن در آن حذف شده است. البته برای اغلب موارد اصلاح مهاجرت برد مرتبه دو نسبت به اهداف ساکن کافی نمی‌باشد. بنابراین، تخمین مرکز داپلر تنها بر اساس تبدیل رادون دقت کافی نخواهد داشت. شکل (۲) اثر شتاب برد و سمت هدف متحرک را بر انحناء برد مطابق رابطه (۱۰) نشان می‌دهد.



شکل (۲): تغییرات انحناء برد برحسب شتاب در جهت برد و سمت در ساختار OS-BSAR

در محاسبه رابطه (۱۰) از مشخصه‌های راداری جدول (۱) استفاده شده است. مکان هدف ( $x_0 = 8500m, y_0 = 600m$ ) و سرعت هدف در جهت برد و سمت به ترتیب  $10 \text{ m/s}$  و  $15 \text{ m/s}$  فرض می‌شود. در همه جای این مقاله واحد زاویه برحسب درجه و سرعت و شتاب به ترتیب  $m/s$  و  $m/s^2$  در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود تأثیر شتاب در جهت سمت بر انحناء برد ناچیز است اما اثر شتاب در جهت برد بر آن قابل توجه است. دلیل آن این است که مطابق رابطه (۱۰) چون شتاب در جهت سمت فقط با توجه به زاویه کوچکی فرستنده ظاهر می‌شود اثر آن نسبت به شتاب در جهت برد که هم درگیرنده و هم در فرستنده نقش دارد کمتر می‌باشد.

جدول (۱): مشخصه‌های رادار روزنه مصنوعی دهانه مصنوعی

واحد	مقدار	مشخصه
Km	(۰،۱)	مختصات فرستنده
Km	(۲،۷۷، ۴)	مختصات گیرنده
m/s	۱۰۰	سرعت سکوی گیرنده $v$
درجه	۱۰	پهنای پرتوی فرستنده
درجه	۴	پهنای پرتوی گیرنده
m	۰/۰۳	طول موج سیگنال ارسالی
Hz	۴۰۰	فرکانس تکرار پالس
MHz	۹۵	پهنای باند سیگنال ارسالی

می‌آید و به صورت سیگنال  $g(m)$  ( $m = 0, 1, 2, \dots, M$ ) نشان داده می‌شود که  $M$  تعداد سبب برد است. اکنون برای تصمیم‌گیری بر کیفیت تصحیح مهاجرت برد از معیار کنتراست تصویر استفاده می‌کنیم. برای محاسبه کنتراست سیگنال  $g(m)$ ، از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

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

$$C(M) = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \left[ P_m^2 - \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} P_m^2 \right]^2}}{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} P_m^2} \quad (15)$$

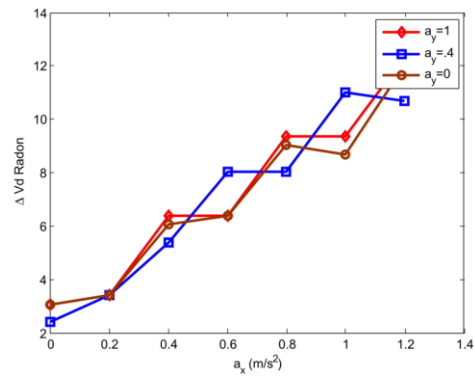
چنانچه کنتراست بیشینه نشده باشد تغییر مقدار  $\hat{v}_d$  ادامه می‌یابد. سپس با تخمین نهایی از  $\hat{v}_d$  ( $\hat{v}_{d-proposed}$ ) که کنتراست را بیشینه می‌کند مهاجرت برد اصلاح می‌شود. همچنین این مقدار برای تخمین مرکز داپلر مطابق رابطه  $\hat{f}_{dc} = \frac{\hat{v}_d}{\lambda}$  در نظر گرفته می‌شود. اصلاح مهاجرت برد که با این روش انجام می‌شود چون از درون‌یابی استفاده نمی‌کند از لحاظ زمانی نسبت به تبدیل کی استون که در [۲۱] استفاده شده است برتری دارد و همچنین بر روش تبدیل رادون که در [۲۷] مورد استفاده قرار گرفته است با توجه به اینکه حرکت هدف شتاب‌دار است و اثر انحناء برد در ساختار OS-BSAR قابل توجه است ارجحیت دارد. بعد از اصلاح مهاجرت برد خطی، می‌توان با ضرب نمودن سیگنال هر سبب برد در جمله  $\exp(-j2\pi\hat{f}_{dc}\eta)$  اصلاح جابجایی را در حوزه زمان سمت نیز انجام داد تا مرکز داپلر طیف، در بازه  $\left[ -\frac{PRF}{2}, \frac{PRF}{2} \right]$  قرار گیرد و ابهام داپلر رفع گردد. در ساختار OSBSAR با توجه به هندسه فرستنده، گیرنده و هدف، انحناء برد می‌تواند بسیار زیاد باشد بدین ترتیب برای بهبود روش بالا بعد از تخمین نرخ چیرپ و اصلاح انحناء برد می‌توان تنها یک‌بار دیگر این مرحله (تخمین مرکز داپلر) را اجرا نمود تا با دقت بالایی  $\hat{v}_d$  به دست آید. فلوچارت الگوریتم روش پیشنهادی در شکل (۴) به طور کامل ارائه شده است.

### ۳-۲- تخمین نرخ چیرپ

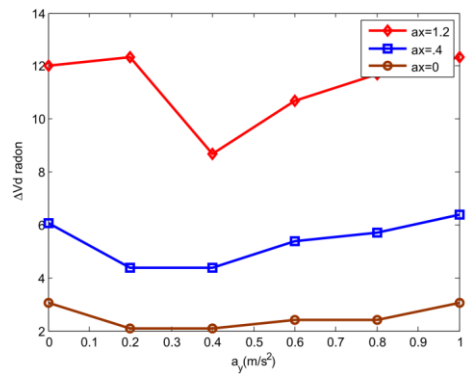
برای تخمین توام نرخ چیرپ و ضریب مرتبه سه از تبدیل فوریه چند جمله‌ای محلی استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای سیگنال  $x(n) = \exp(j\pi \sum_{m=1}^k a_m n^m)$  که از مرتبه  $K$  است. LPFT آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$X(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k) = \sum_n x(n) \exp(-j\pi \sum_{m=1}^k \alpha_m n^m) \quad (16)$$

در صفحه  $k$  بعدی،  $X(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)$  به طور ایده آلی در موقعیت‌های متناظر با مشخصه‌های سیگنال  $\alpha_i = a_i$



(الف)



(ب)

شکل (۳): خطای تخمین روش تبدیل رادون بر حسب شتاب هدف متحرک در ساختار OS-BSAR. (الف) شتاب در جهت برد، (ب) شتاب در جهت سمت

بنابراین، از روش جدیدی که از تلفیق روش تبدیل رادون و یک روش جستجو که مبتنی بر معیار کنتراست می‌باشد استفاده می‌شود. این روش از خروجی تبدیل رادون به عنوان مقدار اولیه برای مشخصه مورد تخمین استفاده می‌کند. سپس اصلاح مهاجرت برد خطی منطبق با این تخمین و در یک همسایگی از آن انجام می‌شود. این روش تخمین گر مبتنی بر هندسه نامیده می‌شود [۲۵]. برای تخمین بهتر مرکز داپلر و همگرایی سریع الگوریتم، از معیار کنتراست استفاده می‌شود که نسبت به معیار آنتروپی که در [۲۵] و [۲۰] ارائه شده است، رفتار بهتری دارد [۲۶]. مقدار اولیه‌ای که تبدیل رادون برای  $\hat{v}_d$  ارائه می‌کند به عنوان ورودی به الگوریتم جستجو ارائه می‌شود. با توجه به اندازه گام  $\Delta K = \lambda \Delta f_{dc}$  مقدار  $\hat{v}_d$  به صورت  $\hat{v}_{dnew} = \hat{v}_d + \Delta K$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار دقت مورد نیاز در تخمین مرکز داپلر است. بنابراین، با توجه به مقدار جدید، اصلاح مهاجرت برد مطابق رابطه (۱۴) در حوزه فرکانس برد و زمان سمت انجام می‌شود.

$$y_2(\tau, \eta) = \text{iffi} \left\{ y_1(f_r, \eta) \exp(-j \frac{2\pi(\hat{v}_{dnew})}{c} (f_r + f_c)\eta) \right\} \quad (14)$$

سپس انرژی هر سبب برد<sup>۱</sup> از داده تصحیح شده  $y_2(\tau, \eta)$ ، محاسبه می‌شود و متوسط آن روی همه نمونه‌های برد به دست

با تخمین  $\alpha_2 = \hat{K}_a$  و  $\alpha_3 = \frac{2\hat{\xi}}{3}$  می‌توان معادله زیر را ارائه کرد:

$$\left( \frac{[v_{nr} \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_{nr} R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{R_{ct}} + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{Or}}{R_{Or}} \right) = -\lambda \hat{\alpha}_2 \quad (18)$$

$$\left( \frac{v_{nr} a_{nr} \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_{nr} a_y + a_{nr} v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} + \frac{v_{rr} v_{rr}}{2R_{ct}^2} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{Or}} + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{Or}^2} \right) = -\frac{\lambda \hat{\alpha}_3}{2} \quad (19)$$

آنتن گیرنده کوچک‌تر از پهنای پرتو آنتن فرستنده است. در رابطه (۲۱)  $T_{am}$  زمان دهانه مصنوعی هدف متحرک است. چنانچه  $T_{am}$  قابل تخمین باشد با کمک این رابطه یک معادله مستقل برحسب مجهولات  $v_y$  و  $a_y$  خواهیم داشت. چون  $T_{am}$  مطابق رابطه (۲۲) به پهنای باند داپلر وابسته است و آن را می‌توان با استفاده از تقریب چندجمله‌ای گوسی با دقت مناسب تخمین زد [۲۱]، در این صورت مدت‌زمان پرتوگیری از هدف  $T_{am}$  مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

$$T_{am} = \frac{\hat{B}_d}{\hat{K}_a + \hat{\xi} T_{am}} \quad (23)$$

بنابراین، با تخمین پهنای باند داپلر می‌توان با حل یک معادله درجه دو  $T_{am}$  را به‌دست آورد. عدد  $0.25$  که در فلوچارت شکل (۴) با  $\hat{v}_d$  مقایسه می‌شود و می‌تواند تا مقدار  $0.5$  نیز افزایش یابد به‌دقت نهایی تخمین  $\hat{v}_d$  و دومرحله‌ای شدن الگوریتم مربوط می‌باشد و با توجه به طول گام،  $\Delta K$ ، تعیین می‌گردد. بنابراین، با حل دستگاه معادلات (۲۳) که شامل شش معادله و شش مجهول است می‌توان چهار مجهول مشخصه‌های هدف را به‌دست آورد.

$(i = 1, 2, 3, \dots, k)$  متمرکز خواهد شد. بنابراین مشخصه‌های  $x(n)$  در موقعیتی که بیشینه LPFT رخ دهد تخمین زده می‌شود بدین‌صورت که [۲۷]:

$$(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \dots, \hat{a}_k) = \arg \max_{(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)} X |(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k)| \quad (17)$$

البته با به‌کارگیری این دو معادله و معادله مرکز داپلر  $(\hat{v}_d = \lambda \hat{f}_{dc})$ ، در مجموع با سه معادله و شش مجهول  $a_{nr}, a_{rr}, v_{nr}, v_y, v_{rr}, a_y$  همچنان این دستگاه معادلات قابل‌حل نمی‌باشد. لذا نیاز به سه معادله مستقل دیگر می‌باشد که دو معادله آن را از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$v_x = \frac{v_{rr}}{\cos(\psi_r)} = \frac{v_{nr}}{\cos(\psi_r)} \quad (20)$$

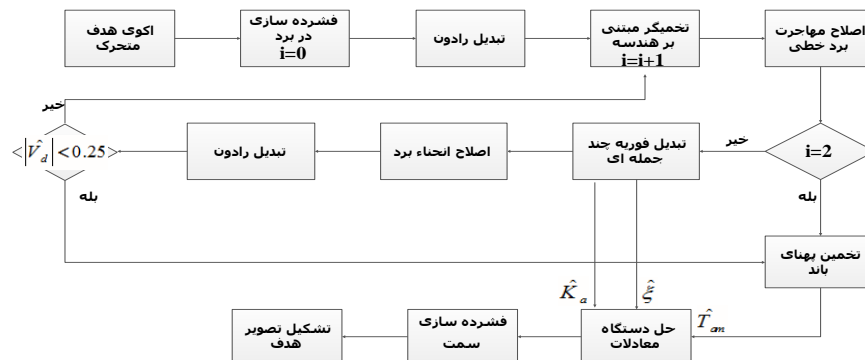
$$a_x = \frac{a_{rr}}{\cos(\psi_r)} = \frac{a_{nr}}{\cos(\psi_r)} \quad (21)$$

### ۳-۳- تخمین پهنای باند داپلر

با توجه به این‌که سرعت هدف متحرک بر مقدار پهنای باند داپلر مؤثر است می‌توان به یک رابطه مستقل دیگر دست‌یافت. اگر از تغییر زمان پرتوگیری هدف به‌خاطر سرعت هدف در جهت برد صرف‌نظر شود، می‌توان به رابطه زمان دهانه مصنوعی هدف متحرک دست‌یافت کرد [۲۱].

$$T_{am} = \frac{v T_a}{v - (v_y + 0.5 a_y T_{am})} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) فرض شده است همواره پهنای سمت پرتو



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم تخمین مشخصه‌های هدف متحرک



$$\left\{ \begin{aligned}
 & v_{rt} \cos(\theta_{sqt}) - v_y \sin(\theta_{sqt}) + v_{rr} = \hat{v}_d - final \\
 & \frac{[v_{rt} \sin(\theta_{sqt}) + (v_y) \cos(\theta_{sqt})]^2 - a_{rt} R_{ct} \cos(\theta_{sqt}) + a_y R_{ct} \sin(\theta_{sqt})}{R_{ct}} \\
 & + \frac{(v - v_y)^2 - a_{rr} R_{Or}}{R_{Or}} = -\lambda \hat{K}_a \\
 & \frac{v_{rt} a_{rt} \sin^2(\theta_{sqt}) + v_y a_y \cos^2(\theta_{sqt}) + (v_{rt} a_y + a_{rt} v_y) \sin(\theta_{sqt}) \cos(\theta_{sqt})}{2R_{ct}} \\
 & + \frac{v_{rt} v_{rt}^2}{2R_{ct}^2} - \frac{(v - v_y) a_y}{2R_{Or}} \\
 & + \frac{v_{rr} (v - v_y)^2}{2R_{Or}^2} = -\frac{\lambda \hat{\xi}}{3} \\
 & (v - v_y) - 0.5 a_y \hat{T}_{am} = \frac{v T_a}{\hat{T}_{am}} \\
 & \frac{v_{rr}}{\cos(\psi_r)} = \frac{v_{rt}}{\cos(\psi_t)} \\
 & \frac{a_{rr}}{\cos(\psi_r)} = \frac{a_{rt}}{\cos(\psi_t)}
 \end{aligned} \right. \quad (24)$$

منحنی فشرده‌سازی شده در برد به دست می‌آید. الگوریتم ارائه‌شده (در [۱۸]) بسیار حساس به مقدار اولیه است و عدم دقت در مقدار اولیه می‌تواند زمان پردازش و دقت آن را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. همچنین در آن مقاله تخمین مشخصه‌های هدف متحرک بدون در نظر گرفتن کلاتر (SCR) و نویز انجام شده است. به عبارت دیگر فرض بر آن است که SCR به اندازه کافی بالاست. اما در این مقاله، برای بهبود تخمین مقدار اولیه در حضور کلاتر و نویز از تبدیل رادون برای تخمین مقدار اولیه مرکز داپلر استفاده شده است. بدین منظور برای مقایسه میان این دو روش، دقت تبدیل رادون و تقریب منحنی در [۱۸]، در مشخصه مورد تخمین ( $v_d$ )، تحت بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) خطای تخمین  $v_d$  برحسب SCR رسم شده است. برای به دست آوردن این شکل کلاتر به صورت گوسی جمع شونده در نظر گرفته شده است.

نتایج با به کارگیری روش مونت کارلو با ۵۰ تکرار به دست آمده است. همان‌طور که از شکل (۵-الف) به دست می‌آید روش تبدیل رادون با دقت زاویه ۰/۰۲ درجه بسیار بهتر از روش [۱۸] عمل می‌کند. اما با توجه به زمان پردازش طولانی نسبت به روش پیشنهادی مقرون به صرفه نمی‌باشد [۱۸]. همان‌طور که در شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود تبدیل رادون با دقت زاویه ۰/۲ درجه تا ۴۰dB SCR بهتر از روش [۱۸] عمل می‌کند و همچنین زمان پردازش کوتاه‌تری نیز دارد. اما در SCRهای خیلی بالا (بالا تر از ۲۰ dB) روش [۱۸] در تخمین مقدار اولیه  $v_d$ ، مقدار ناچیزی بهتر از تبدیل رادون خواهد بود.

#### ۴- تصویرسازی هدف متحرک

بعد از حذف انحناء برد نسبت به اهداف ساکن، که مطابق رابطه (۱۱) تنها توسط حرکت سکو به وجود می‌آید، بایستی با تخمین  $v_d$  مهاجرت برد خطی را در حوزه فرکانس برد و زمان سمت مطابق رابطه (۱۴) حذف نمود. سپس با تخمین مشخصه نرخ چیرپ، انحناء برد ناشی از هدف متحرک را مطابق رابطه (۲۵) اصلاح نمود تا انرژی هدف در یک سبد برد متمرکز گردد.

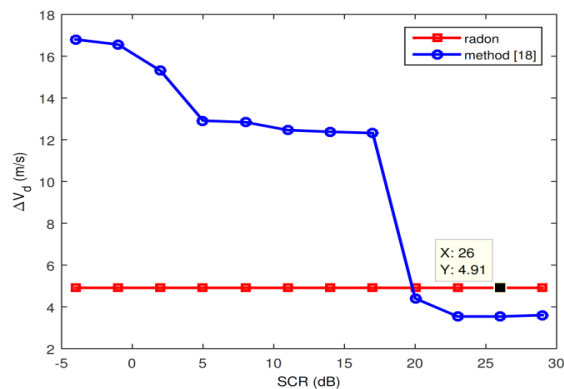
$$y_3(\tau, \eta) = \text{iff}t \left\{ y_2(f_r, \eta) \exp(j \frac{\pi \hat{\beta}}{c} (f_r + f_c) \eta^2) \right\} \hat{\beta} = -\lambda \frac{\hat{K}_a}{2} \quad (25)$$

حال برای فشرده‌سازی در سمت کافی است با محاسبه تبدیل فوریه از سیگنال  $y_3(\tau, \eta)$  در جهت سمت، سیگنال  $Y_3(\tau, f_\eta)$  به دست آورده شود. سپس مزدوج تبدیل فوریه سیگنال با ضرایب مرتبه دو و سه تخمین زده شده را در این سیگنال ضرب می‌نماییم. در نهایت با انجام عملیات *iff*t بر روی سمت، تصویر نهایی هدف به دست خواهد آمد.

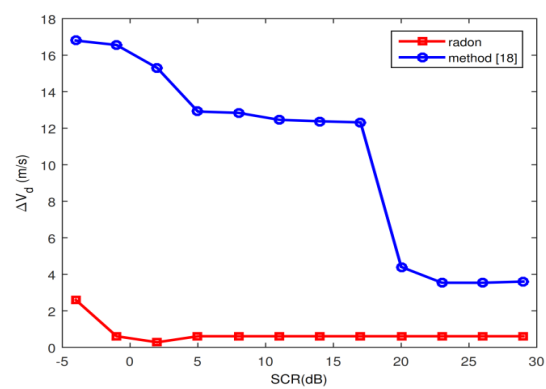
$$y_4(\tau, \eta) = \text{iff}t_\eta \left\{ Y_3(\tau, f_\eta) \times \text{fft}_\eta(\exp(-j \frac{\pi}{2} \hat{K}_a \eta^2 - j \frac{2\pi}{3} \hat{\xi} \eta^3)) \right\} \quad (26)$$

#### ۵- شبیه‌سازی

در [۱۸] الگوریتمی برای تخمین مشخصه‌ها بیان می‌شود که برای اهداف با سرعت ثابت است و با استفاده از روش تقریب چندجمله‌ای تخمین مقدار اولیه مرکز داپلر و نرخ چیرپ از روی



(ب)



(الف)

شکل (۵): خطای تخمین مشخصه  $v_d$  بر حسب SCR با دو روش تقریب چندجمله‌ای و تبدیل رادون

مهاجرت برد انجام شده است اما همچنان در هدف T2 و T4 انحناء برد و مهاجرت برد خطی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود انحناء برد اهداف T1 و T3 به ترتیب  $2/81$  m و  $0/05$  m می‌باشد و مقدار کوچکی است به طوری که الگوریتم در یک مرحله تصحیح مهاجرت برد خطی را انجام داده است. اما برای اهداف T2 و T4 که انحناء برد به ترتیب  $4/54$  و  $5/34$  می‌باشد در یک مرحله خطای تخمین  $v_d$  به دست آمده، زیاد است و الگوریتم در دو مرحله خود را به خطای قابل قبول می‌رساند. برای اصلاح کامل مهاجرت برد، مطابق فلوجارت شکل (۴)، ابتدا بردار داده مربوط به سید برد با انرژی بزرگ‌تر به الگوریتم تبدیل فوریه چندجمله‌ای ارائه می‌شود تا نرخ چیرپ و مشخصه داپلر مرتبه سوم تخمین زده شود. همچنین این بردار به الگوریتم تخمین پهنای باند داده می‌شود تا بعد از هموارسازی<sup>۱</sup> مناسب و به کارگیری تقریب چندجمله‌ای گوسی<sup>۲</sup>، پهنای باند به دست آید. سپس بعد از اصلاح انحناء برد، یک مرحله دیگر الگوریتم به تخمین گر مبتنی بر هندسه داده می‌شود تا مهاجرت برد خطی به طور کامل اصلاح شود.

بنابراین، می‌توان گفت در SCRهای پایین تا متوسط، روش پیشنهادی که از ترکیب تبدیل رادون و یک روش جستجو بر اساس معیار کنتراست استوار است در زمان کمتر و به نتیجه بهتری نسبت به [۱۸] در تخمین مرکز داپلر دست خواهد یافت.

در [۱۸] برای تخمین نرخ چیرپ با توجه به عدم وجود کلاتر و نویز از همان روش جستجو استفاده شده است اما در روش پیشنهادی در این مقاله برای بهبود تخمین مشخصه‌ها و تخمین شتاب هدف متحرک از روش تبدیل فوریه چندجمله‌ای استفاده شده است که بسیار مقاوم‌تر در برابر نویز و کلاتر می‌باشد [۲۳]. همچنین علاوه بر تخمین نرخ چیرپ، قابلیت تخمین مشخصه داپلر مرتبه سوم را داراست.

برای بررسی بهتر الگوریتم ارائه شده، چهار هدف متحرک T1، T2، T3 و T4 با زمان دهانه مصنوعی و انحناء بردهای متفاوت در نظر می‌گیریم. مشخصه‌های سامانه راداری مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند. مختصات این اهداف به همراه مشخصات آن‌ها در سامانه راداری در جدول (۲) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تخمین مرکز داپلر با استفاده از روش پیشنهادی اصلاح

جدول (۲): مشخصه‌های چهار هدف در سامانه راداری

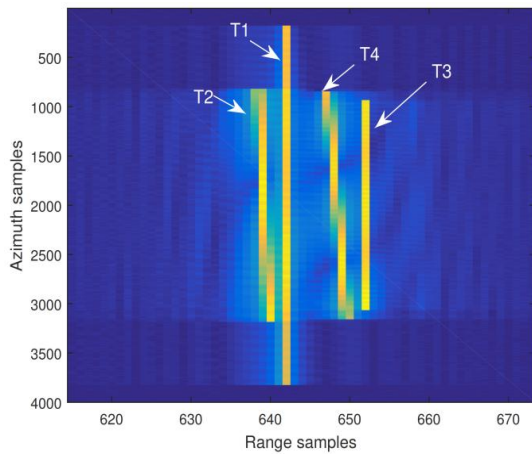
$(x_0, y_0, z_0)$	$v_x$	$v_y$	$a_x$	$a_y$	$R_0$	$v_d$	$f_{dc}$	$K_a$	$\xi$	$B_d$	$T_{am}$
T1(۱۲۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۰)	۱۰	۱۵	۰/۳۰	۰/۶	۲/۸۱	-۱۵/۳۲۸۴	۵۱۰/۹۵	-۹/۰۱	۰/۱۶۲۸	۶۸/۷۶	۹/۱۴
T2(۸۰۰۰، ۲۲۰۰۰، ۰)	۱۰	۱۵	۰	۰	۴/۵۴	-۱۳/۹۴۴۵	۴۶۴/۸۲	-۳۴/۵۶	-۰/۰۵۸۴	۲۰۲/۶۵	۵/۹۲
T3(۷۵۰۰، ۳۰۰۰۰، ۰)	۱۸	۱۰	۰/۸	۰/۴	۰/۰۵	-۲۷/۴۵۷۴	۹۱۵/۲۵	۰/۴۹	۰/۰۷۲۴	۴/۶۸	۵/۳
T4(۱۲۰۰۰، ۳۰۰۰۰، ۰)	۱۰	-۳۰	۰/۲	۰/۱	۵/۳۴	-۲۶/۲۰	۸۷۳/۵۶	-۴۲/۳۸	۰/۰۰۲۹	۲۴۵/۸	۵/۷۹

مشاهده می‌شود. در شکل (۶-ب) تصویر سیگنال با مهاجرت برد خطی اصلاح شده مشاهده می‌شود.

در شکل (۶-الف) سیگنال فشرده‌سازی شده در برد برای چهار هدف متحرک T1، T2، T3 و T4 در ساختار OS-BSAR

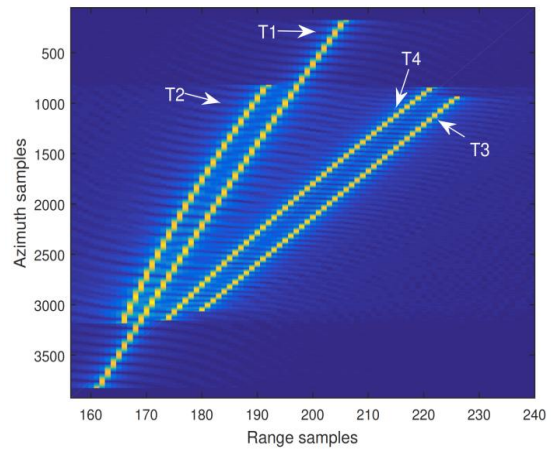
- 1- Smoothing
- 2- Goaussian fit

برای بررسی بهتر شکل (۸-الف و ب) بترتیب تصویر نهایی اهداف T1 و T2 را در حالت کانتور نشان می‌دهد.



(ب)

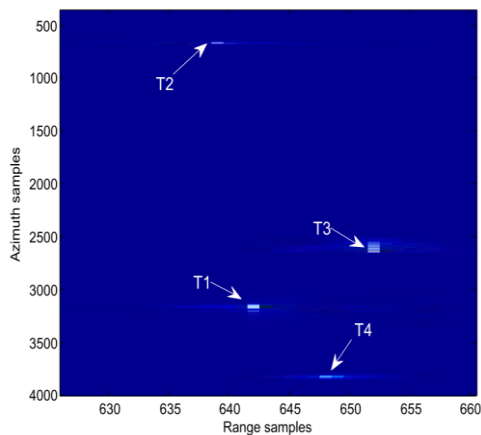
شکل (۷-الف) اصلاح نهایی مهاجرت برد را نشان می‌دهد. عملیات فشرده‌سازی سمت مطابق رابطه (۲۶) انجام می‌شود و شکل (۷-ب) تصاویر اهداف فوکوس شده را نمایش می‌دهد.



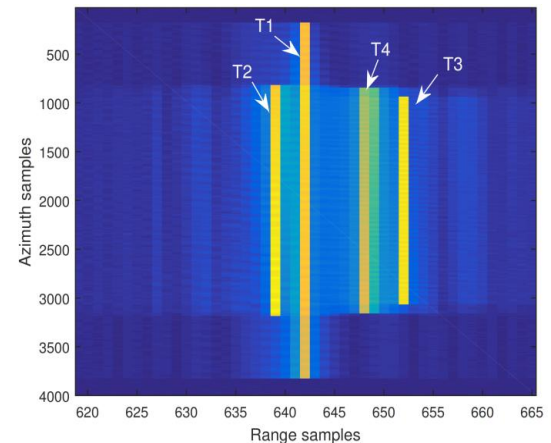
(الف)

شکل (۶): تصویر اهداف متحرک T4 و T3, T2, T1

الف- تصویر اهداف بعد از فشرده‌سازی در برد، ب- تصویر اهداف بعد از اصلاح مهاجرت برد مرحله اول



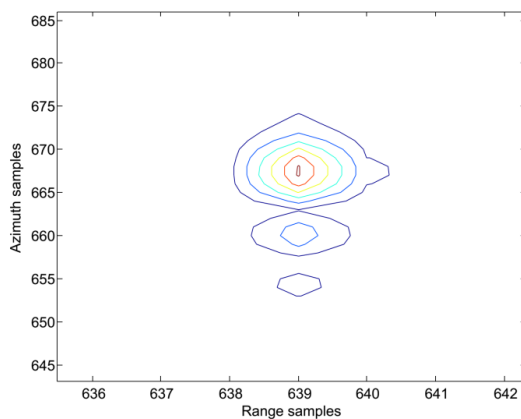
(ب)



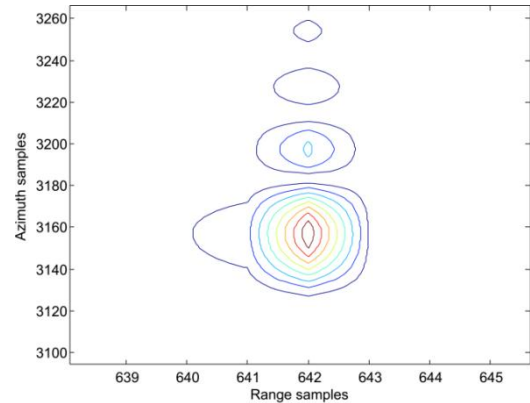
(الف)

شکل (۷): اصلاح مهاجرت برد هدف متحرک به‌طور کامل در ساختار OS-BSAR و تصویر نهایی

الف- اصلاح مهاجرت برد کامل اهداف، ب- تصویر نهایی بعد از فشرده‌سازی سمت



(ب)



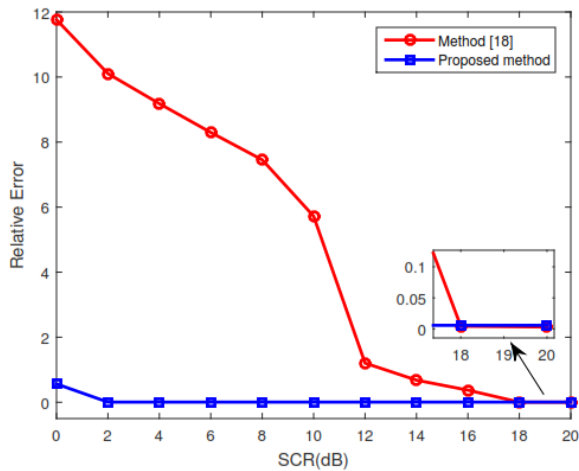
(الف)

شکل (۸): تصویر نهایی دو هدف متحرک T1 و T2 به‌صورت کانتور الف- تصویر هدف، ب- تصویر هدف T2

با حل دستگاه معادلات رابطه (۲۴) مشخصه‌های هدف متحرک قابل محاسبه است. در جدول (۳) مشخصه‌های تخمین زده شده، آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود مشخصه‌های حرکتی هدف با دقت مناسبی تخمین زده شده است.

جدول (۳): تخمین مشخصه‌ها با روش پیشنهادی

	$\hat{v}_x$	$\hat{v}_y$	$\hat{a}_x$	$\hat{a}_y$	$\hat{v}_d(i=1)$	$\hat{v}_d(i=2)$	$\hat{f}_{dc}(i=1)$	$\hat{f}_{dc}(i=2)$	$\hat{K}_a$	$\hat{\xi}$	$\hat{T}_{am}$
T1	۹/۹۵	۱۴/۹۵	۰/۳۰	۰/۶۱	-۱۵/۲۳۸۲	---	۵۰۷/۹۳	---	-۸/۹۹	۰/۱۶۷۱	۹/۲۵
T2	۹/۹۶	۱۵/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۸	-۱۵/۳۳۸۲	-۱۳/۷۴۷۴	۵۱۱/۲۲۷	۴۵۸/۲۵	-۳۴/۴۶	-۰/۴۷۷	۵/۹۹
T3	۱۷/۹۶	۱۰/۱۲	۰/۷۹	۰/۳۶	-۲۷/۳۴۸۵	---	۹۱۱/۶۲	---	۰/۴۹	۰/۰۹۰۷	۵/۲۰
T4	۹/۸۹	-۳۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۱۶	-۲۸/۸۴	-۲۶/۰۵	۹۶۱/۶۱	۸۶۸/۵۹	-۴۲/۳۷	۰/۰۴۷۷	۵/۸۹



شکل (۹): خطای نسبی تخمین مرکز داپلر برای هدف T1 بر حسب SCR با دو روش پیشنهادی و روش [۱۸]

برای بررسی بهتر میان روش پیشنهادی و روش [۱۸] مشخصه مرکز داپلر را از نظر زمان محاسبه و دقت مقدار تخمین، مقایسه می‌کنیم. این مقایسه برای هدف T1 به ازای دو SCR مختلف ۱۰ dB و ۲۰ dB در جدول (۴) و شکل (۹) مشاهده می‌شود. طول گام جستجو و شعاع همسایگی یکسان انتخاب شده است. این جدول با به‌کارگیری روش مونت کارلو با ۵۰ تکرار به دست آمده است. این جدول و شکل (۹) به خوبی برتری الگوریتم پیشنهادی را در SCRهای پایین در تخمین مرکز داپلر نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود گرچه در SCR بالا روش [۱۸] مقدار دقیق تری را تخمین زده است اما در زمان بیشتر و تنها برای SCRهای بالا پاسخ مناسبی دارد. برای بررسی بهتر دقت الگوریتم پیشنهادی در تخمین مشخصه‌های هدف متحرک شکل (۱۰) و جدول (۵) بر حسب SCR ارائه شده است.

جدول (۴): مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم [۱۸] در تعیین مرکز داپلر

		روش پیشنهادی در تعیین مرکز داپلر				روش [۱۸]				
		SCR=10dB		SCR=20 dB		SCR=10dB		SCR=20dB		
		مقدار واقعی	مقدار تخمینی	زمان محاسبه	زمان تخمینی	مقدار تخمینی	زمان محاسبه	مقدار تخمینی	زمان محاسبه	
T1	$f_{dc}(Hz)$	۵۱۰/۹۵	۵۰۷/۹۳	۱۱۵/۶۷	۵۰۷/۹۳	۱۱۲/۵۳	۳۴۳۳/۸۱	۱۵۳/۳۹	۵۰۹/۰۳	۱۳۷/۶۱

جدول (۵): دقت روش پیشنهادی در تخمین مشخصه‌های حرکتی هدف بر حسب SCR

مشخصه	مقدار واقعی	SCR=0 dB		SCR=5 dB		SCR=10dB		SCR=20dB		
		مقدار تخمینی	خطای نسبی %	مقدار تخمینی	خطای نسبی %	مقدار تخمینی	خطای نسبی %	مقدار تخمینی	خطای نسبی %	
		T1	$f_{dc}(Hz)$	۱۰	۲۳/۳۸۹۴	۱۳۳/۸۹	۷/۱۸۸۰	۲۸/۱۲۰۴	۱۵/۱۳۴۰	۰/۳۰۵۵
		۱۵	۱۶/۹۹۹۴	۱۳/۳۳	۱۶/۸۲۸۴	۱۲/۱۸۹۲	۹/۹۶۹۵	۰/۸۹۳۱	۹/۹۶۹۵	۰/۸۹۳۱
		۰/۳	۰/۵۱۱۹	۷۰/۶۳	۰/۳۳۸۲	۱۲/۷۲۵۳	۰/۲۹۵۴	۱/۵۲۶۸	۰/۲۹۵۴	۱/۵۲۶۸
		۰/۶	۰/۱۶۲۵	۷۲/۹۱	۰/۲۰۰۰	۶۶/۶۷۴۰	۰/۵۷۰۷	۴/۸۸۵۰	۰/۵۷۰۷	۴/۸۸۵۰

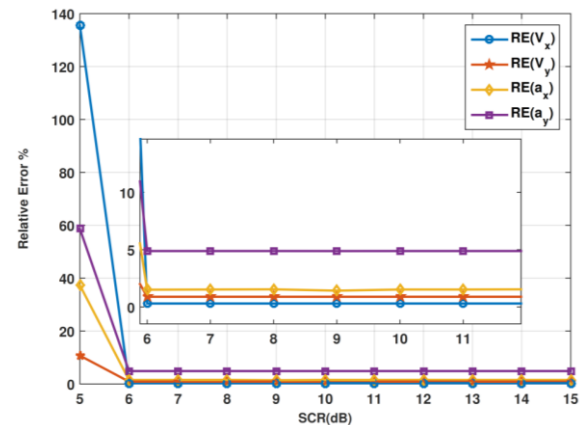
- [4] J. K. Jao, "Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, pp. 1984-1992, 2001.
- [5] Soumekh, "Moving target detection and imaging using an X band along-track monopulse SAR," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 38, pp. 315-333, 2002.
- [6] 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. Nayebi, "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, pp. 835-840, 2015.
- [8] W.-Q. Wang, "Multi-antenna synthetic aperture radar," CRC Press, 2013.
- [9] V. C. Chen and H. Ling, "Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis," Artech House, 2002.
- [10] M. Cherniakov, "Bistatic radars: Emerging technology," John Wiley & Sons, 2008.
- [11] M. Antoniou, M. Cherniakov, and C. Hu, "Space-surface bistatic SAR image formation algorithms," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, pp. 1827-1843, 2009.
- [12] X. Qiu, C. Ding, and D. Hu, "Bistatic SAR data processing algorithms," John Wiley & Sons, 2013.
- [13] M. Cherniakov, "Bistatic radar: principles and practice," Wiley [Imprint], 2007.
- [14] R. Bamler and H. Runge, "PRF-ambiguity resolving by wavelength diversity," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 29, pp. 997-1003, 1991.
- [15] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation," Artech House, 2005.
- [16] C. Cafforio, P. Guccione, and A. M. Guarnieri, "Doppler centroid estimation for ScanSAR data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, pp. 14-23, 2004.
- [17] 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.
- [18] Y. Li, P. Huang, Z. Yang, and C. Lin, "Parameter estimation and imaging of moving targets in bistatic synthetic aperture radar," Journal of Applied Remote Sensing, vol. 10, pp. 015018-015018, 2016.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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

برای تعیین دقت الگوریتم در شکل (۹ و ۱۰) از خطای نسبی استفاده شده است. خطای نسبی (RE) به‌عنوان مثال برای

$$RE(v_x) = \frac{|v_x - \hat{v}_x|}{v_x} \times 100\%$$

سرعت در جهت برد از رابطه

حساب درصد به‌دست می‌آید.



شکل (۱۰): خطای نسبی تخمین مشخصه‌ها برحسب SCR برای هدف

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تخمین مشخصه‌ها و تشکیل تصویر هدف متحرک در ساختار رادار روزنه مصنوعی دوپایه (تک ایستاد) با حد تفکیک بالا مورد بررسی قرار گرفت. در ساختار OS-BSAR عموماً به علت کاهش سرعت سکو و یا ارتفاع آن با افزایش مهاجرت برد روبرو خواهیم بود. انحناء برد برای اهداف متحرک شتابدار بیشتر نیز خواهد شد که سبب می‌شود روش‌های موجود مانند تبدیل رادون و کی‌استون کارایی خود را در اصلاح مهاجرت برد از دست بدهند. در این مقاله ضمن ارائه روابط هدف متحرک در ساختار تک ایستاد روشی برای تخمین دقیق مرکز داپلر پیشنهاد شده است که در حضور کلاتر و نویز مقاوم است همچنین با به‌کارگیری روش LPFT در تخمین نرخ چیرپ و ضریب داپلر مرتبه سه و به‌کارگیری تقریب گوسی برای تخمین پهنای باند، همه مشخصه‌های هدف متحرک اعم از شتاب و سرعت در دو جهت برد و سمت تخمین زده شده‌اند.

## 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.

- [25] S. M. Zabihi-Maddah and S. A. Seyedin, "Estimation of Ground Moving Target Parameters in Squint Single-Antenna Synthetic Aperture Radar," Radar vol. 13, pp. 49-63, 2017(In Persian).
- [26] V. C. Chen and M. Martorella, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms and Applications," Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [27] 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.
- [22] R. Klemm, "Applications of space-time adaptive processing," IET, vol. 14, 2004.
- [23] X. Li, G. Bi, S. Stankovic, and A. M. Zoubir, "Local polynomial Fourier transform: A review on recent developments and applications," Signal Processing, vol. 91, pp. 1370-1393, 2011.
- [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.

## Parameters Estimation and Imaging of Ground Moving Target in a One-stationary Bi-static SAR

S. M. Zabihi Maddah, S. A. Seyedin\*

Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 14/05/2017, Accepted: 28/01/2018)

### Abstract

In this paper, the equation of the received signal of a moving target with constant acceleration in a special case of Bi-static SAR, named one-stationary, is derived in a slant range plane. In the one-stationary geometry, usually range curvature and Doppler ambiguity is very large due to wide beam-width and assumption of accelerating movement of the target. Hence, transforms such as Radon and Keystone have little accuracy for both estimating Doppler centroid and removing range cell migration. In this paper, a two-step algorithm is proposed for estimation of Doppler centroid. That is a combination of radon transform and a search algorithm. Then, by extraction of a system of equations, an estimation of target's velocity and acceleration is obtained and finally, an image formation algorithm is presented. Compared to usual algorithms, the accuracy of the derived equations and the strength of the proposed algorithm in the presence of noise and clutter are confirmed by simulations.

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar (SAR), Bistatic SAR, Ground Moving Target, Parameter Estimation, Imaging

---

\* Corresponding author E-mail: seyedin@um.ac.ir