

## ترکیب الگوریتم برد- داپلر با روش خودکانونی گرادیان فاز برای تشکیل تصویر مناسب در SAR با حرکت پرتابه‌ای

مرتضی کازرونی<sup>۱\*</sup>، رضا خدایی تهرانی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده برق- مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۳/۰۸/۱۴؛ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۲)

### چکیده

یکی از دغدغه‌های اساسی در الگوریتم‌های پردازشی مورداستفاده در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای، جبران‌سازی کلیه خطاهای فازی موجود در داده بازگشتی از هدف، برای دستیابی به یک تصویر واضح و بدون ابهام می‌باشد. در این مقاله با توجه به ویژگی‌های حرکتی رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای، با به‌کارگیری الگوریتم برد- داپلر و روش خودکانونی گرادیان فاز به اخذ تصویر در یک رادار روزنه مصنوعی با حرکت پرتابه‌ای پرداخته می‌شود؛ این فرایند، ترکیبی از الگوریتم پردازشی برد- داپلر و روش خودکانونی گرادیان فاز می‌باشد. ویژگی بارز این روش پردازشی آن است که برای جبران‌سازی حرکتی، اصلاح حرکت برد و کاهش انواع خطاهای فاز موجود، نیازی به اطلاعات حاصل از سامانه‌های ناوبری نداشته و خود الگوریتم قادر به تخمین شتاب و سرعت حرکت سکوی راداری بوده و خطای فاز موجود در داده بازگشتی را به سمت صفر میل می‌دهد. از نوآوری‌های صورت گرفته در این مقاله می‌توان به اصلاح و بهبود عملکرد روش خودکانونی گرادیان فاز اشاره نمود. بهبود و اصلاح صورت گرفته؛ مربوط به مرحله انتخاب پراکنده‌سازهای پر قدرت در این روش بوده که در این مقاله برای اولین بار، انتخاب پراکنده‌سازهای پر قدرت در الگوریتم خودکانونی گرادیان فاز به کمک عملگر همبستگی انجام گرفته و بدین ترتیب امکان اخذ تصویر از یک صحنه گسترده (هدف گسترده) فراهم شده است.

### واژگان کلیدی

SAR با حرکت پرتابه‌ای، الگوریتم برد- داپلر، الگوریتم خودکانونی گرادیان فاز

#### ۱. مقدمه

شتاب‌دار بوده لذا هندسه حرکت SAR با حرکت پرتابه‌ای متفاوت از حالت فضاپایه و هواپایه است [۵-۱۱]. در بسیاری از مقالات نظیر [۶-۴] با فرض دانستن دقیق مسیر، الگوریتم‌هایی را جهت تشکیل تصویر به صورت دقیق با لحاظ کردن تزویج<sup>۵</sup> بین برد و سمت پیشنهاد می‌دهد ولی به هر حال سیستم INS<sup>۶</sup> خود دارای خطای اندازه‌گیری است. از طرفی حساسیت نسبت به تغییرات سرعت در SAR جلونگر<sup>۷</sup> بیشتر است بنابراین، امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های تشکیل تصویر دقیق برای SAR با حرکت پرتابه‌ای که به ناحیه تصویربرداری نزدیک می‌شود عملاً وجود ندارد و از الگوریتم PGA برای شناسایی باقیمانده خطاهای حرکتی پس از اصلاح اولیه توسط اطلاعات INS و الگوریتم‌های تخمین فرکانس مرکزی داپلر استفاده می‌شود [۱]. از طرفی بعضی از خطاهای فرکانس بالاتر مربوط به خطاهای انتشار در

در حال حاضر تمایل برای به‌کارگیری فناوری رادار روزنه مصنوعی<sup>۱</sup> (SAR) به طور روزافزونی رو به افزایش است. علت این امر آن است که این فناوری وابستگی به شرایط آب و هوایی و وجود و یا عدم وجود نور کافی را برطرف کرده و مهم‌تر آن‌که قدرت تفکیک‌پذیری سمت<sup>۲</sup> بسیار بالاتری را در مقایسه با رادارهای مرسوم در اختیار قرار می‌دهد؛ اما در این بین به‌کارگیری SAR با حرکت پرتابه‌ای<sup>۳</sup> از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار است زیرا در این حالت SAR دارای زاویه‌ی لوجی<sup>۴</sup> بالا بوده و سرعت سکوی راداری نیز در مقایسه با حالت هواپایه و فضاپایه بسیار بالاتر است. هم‌چنین حرکت رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای، حرکتی غیریکنواخت و

\*ایانامه نویسنده پاسخگو: Kazerooni@mut.ac.ir

<sup>۵</sup>Coupling

<sup>۶</sup>Inertial Navigation System

<sup>۷</sup>Forward Looking

<sup>۱</sup>Synthetic Aperture Radar

<sup>۲</sup>Azimuth Resolution

<sup>۳</sup>SAR with a Ballistics Motion

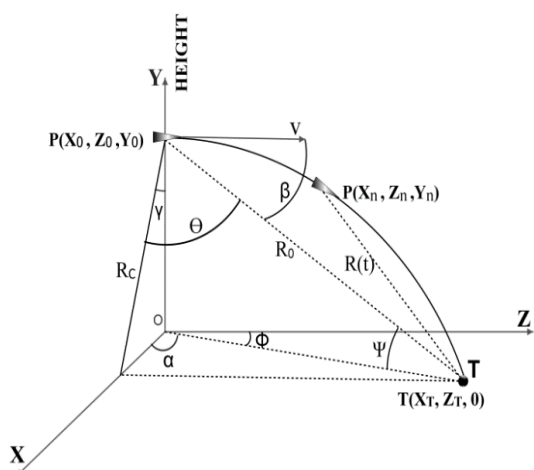
<sup>۴</sup>Squint Angle



شکل ۱. روند طی شده در این مقاله جهت اخذ تصویر از یک هدف گسترده

## ۲. هندسه حرکت رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای

هندسه حرکت سکوی راداری در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. هندسه حرکتی رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای

فرض بر این است که حرکت سکوی راداری به صورت یک حرکت پرتابه ای<sup>۹</sup> بوده و بر روی یک منحنی با شتاب ثابت در یک صفحه سه بعدی به سمت هدف حرکت می کند. زمان برد یا همان زمان سریع<sup>۱۰</sup> را با  $t_r$  و زمان سمت یا زمان کند<sup>۱۱</sup> را با  $t_a$  نشان می دهیم.  $P(X_0, Z_0, Y_0)$  مختصات رادار در لحظه ی شروع بازه تصویربرداری؛  $(t_a=0)$  و  $P(X_n, Z_n, Y_n)$  مختصات رادار در هر نقطه در طول مسیر طی شده تا هدف و  $P(X_T, Z_T, 0)$  مختصات هدف بر روی زمین است.

محیط می باشد. در این مقاله کوشش شده است تا خطاهای فاز مذکور به کمک روش خودکانونی گرادیان فاز (PGA)<sup>۱</sup> شناسایی شده و به سمت صفر میل داده شوند تا تصویری واضح و بدون ابهام از هدف به دست آید. در این مقاله برای اولین بار برای انتخاب پراکنده سازهای پرقدرت در اولین مرحله از روش PGA، از عملگر همبستگی<sup>۲</sup> استفاده شده است که این امر باعث می شود که بتوان به اخذ تصویر از یک هدف گسترده پرداخت.

بنابر آنچه ذکر گردید و با توجه به مشخصات حرکتی رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای؛ ابتدا یک هندسه فضایی بین نحوه شیرجه<sup>۳</sup> سکوی راداری به سمت هدف و میزان زاویه لوچی رادار ارائه شده سپس ویژگی های حرکتی رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای بررسی شده و پس از بررسی تحلیلی موارد ذکر شده به شرح و بیان الگوریتم ترکیبی پرداخته می شود. ویژگی بارز این الگوریتم ترکیبی آن است که برای جبران سازی حرکت<sup>۴</sup>، اصلاح مهاجرت سلول برد<sup>۵</sup> و کاهش انواع خطاهای فاز موجود نیازی به اطلاعات حاصل از سامانه های موقعیت یاب جهانی و ناوبری اینرسی نداشته و خود قادر به تخمین شتاب و سرعت سکوی راداری است. مزیت دیگر این الگوریتم آن است که خطای فاز موجود در داده بازگشتی را به سمت صفر میل می دهد. همچنین از دیگر مزایای این الگوریتم می توان به بهبود و ارتقای روش خودکانونی گرادیان فاز در مرحله انتخاب پراکنده سازهای پرقدرت به کمک عملگر همبستگی اشاره نمود که این ویژگی باعث می شود تا الگوریتم ترکیبی قادر به اخذ تصویر از صحنه ای گسترده<sup>۶</sup> از هدف باشد.

روند طی شده در این مقاله جهت اخذ تصویر از یک هدف گسترده در شکل ۱ آمده است. بر اساس شکل ۱، ابتدا به بررسی و تحلیل هندسه حرکتی SAR پرتابه ای، پرداخته می شود. سپس یک بررسی اجمالی الگوریتم برد-داپلر<sup>۷</sup> (RDA) صورت پذیرفته و در ادامه با بررسی لزوم به کارگیری روش های خودکانونی<sup>۸</sup>، روش PGA جهت حذف خطای فاز موجود در تصویر، انتخاب شده و در نهایت با ترکیب الگوریتم RDA با روش PGA؛ ضمن حذف خطای فاز موجود، به اخذ تصویر از یک هدف گسترده (با هشت پراکنده ساز قدرتمند) پرداخته می شود.

<sup>1</sup>Phase Gradient Auto-Fucos

<sup>2</sup>Correlation Operator

<sup>3</sup>Diving

<sup>4</sup>Motion Compensation

<sup>5</sup>Range Cell Migration Correction

<sup>6</sup>Extended Scene

<sup>7</sup>Range doppler algorithm

<sup>8</sup>Auto-Fucos

<sup>9</sup>Ballistic

<sup>10</sup>Fast Time

<sup>11</sup>Slow Time

سلول برد و عمل اصلاح انواع خطای فاز موجود توسط روش پردازشی خواهد شد. زیرا در عمل رادار پس از ارسال یک پالس و دریافت پالس بازگشتی با سرعت بالایی حرکت کرده و تأثیر این حرکت با سرعت بالا باید در پردازش جهت اخذ تصویر لحاظ شود. به همین دلیل در این مقاله، رابطه (۳) بر اساس  $t_r$  بیان می‌شود.

## ۲-۱. بررسی ویژگی‌های SAR با حرکت پرتابه‌ای

رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای در مقایسه با SAR هواپایه و فضاپایه دارای مشخصات حرکتی خاص خود نظیر سرعت بالا، زاویه لوچی شدید و حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت و یا متغیر می‌باشد که تأثیر خاص خود را بر میزان مهاجرت سلول برد، جبران‌سازی حرکتی و مباحث مرتبط با پردازش‌های بلادرنگ<sup>۵</sup> می‌گذارد. به‌عنوان مثال حرکت غیریکنواخت با شتاب ثابت، واحد پردازش را ملزم به جبران‌سازی این حرکت غیرخطی کرده و بر پیچیدگی روش پردازشی می‌افزاید یا این‌که سرعت بالای سکوی راداری باعث می‌شود تا پدیده مهاجرت سلول برد در تعداد بیشتری سلول برد اتفاق بیفتد و از طرف دیگر به دلیل کاهش بازه تصویربرداری الگوریتم پردازشی باید از نظر سرعت تشکیل تصویر بلادرنگ باشد که این‌ها به‌نوبه خود بر میزان و پیچیدگی‌های واحد پردازش می‌افزاید [۶-۴]. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر مباحث فوق می‌بایست به تحلیل و بررسی تزویج موجود بین بعد سمت و برد در سیگنال بازگشتی پرداخته شود که برای این کار می‌بایست بسط سری تیلور رابطه برد مایل بین رادار و هدف در هر لحظه را بررسی و تحلیل نمود. به تأثیر تغییرات برد مایل بر سیگنال بازگشتی و نحوه‌ی تشکیل تصویر در SAR، اثر مهاجرت سلول برد<sup>۶</sup> (RCM) گویند [۸].

رابطه سیگنال بازگشتی در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای با فرض ارسال سیگنال چیرپ در رابطه (۳) آمده است. بر اساس رابطه (۳) در واقع علت تزویج موجود بین بعد سمت و برد در سیگنال بازگشتی رادار روزنه مصنوعی آن است که برد مایل لحظه‌ای<sup>۷</sup> بین رادار و هدف وابسته به زمان سمت ( $t_a$ ) است. نکته بسیار مهم دیگر آن است که رابطه سیگنال بازگشتی نه‌تنها به زمان سمت وابسته است بلکه به زمان برد ( $t_r$ ) نیز وابسته بوده و اگر این وابستگی به زمان برد در محاسبات لحاظ نشود آن‌گاه هدف چندین سلول از محل اصلی خود در تصویر تشکیل شده نهایی جابه‌جا می‌شود [۷].

$V$  بردار سرعت رادار و  $R_0$  برد مایل<sup>۱</sup> بین رادار تا هدف در لحظه شروع تصویربرداری است.  $\theta$  زاویه بین برد مایل رادار تا هدف در هر لحظه و صفحه  $X-Y$ ،  $\alpha$  زاویه لوچی،  $\Phi$  زاویه انحراف<sup>۲</sup> سکوی راداری از مسیر فرود مستقیم و  $\gamma$  زاویه نگاه کنار به نزدیک‌ترین نقطه گذر<sup>۳</sup> از خط افقی‌ای که موازی با مسیر پرواز بوده و از محل هدف نیز می‌گذرد. همچنین  $\beta$  نیز زاویه بین بردار سرعت و بردار برد مایل اولیه،  $(a_x, a_z, a_y)$  شتاب سکوی راداری،  $(v_x, v_z, v_y)$  سرعت سکوی راداری و  $(v_{x0}, v_{z0}, v_{y0})$  سرعت سکوی راداری در لحظه  $t_a=0$  می‌باشد [۲۱]. با توجه به تعاریف و مفروضات فوق می‌توان رابطه مسیر حرکت SAR پرتابه‌ای تا هدف را به‌صورت رابطه (۱) بیان کرد [۶-۵]:

$$\begin{aligned} X(t_a) &= \frac{1}{2} a_x t_a^2 + v_x t_a + X_0 \\ Z(t_a) &= \frac{1}{2} a_z t_a^2 + v_z t_a + Z_0 \\ Y(t_a) &= \frac{1}{2} a_y t_a^2 + v_y t_a - Y_0 \end{aligned} \quad (1)$$

بر این اساس رابطه برد مایل بین رادار و هدف به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود [۶-۵]:

$$R(t_a) = \sqrt{\left(\frac{1}{2} a_x t_a^2 + v_x t_a - Y_0\right)^2 + \left(\frac{1}{2} a_z t_a^2 + v_z t_a + X_0\right)^2 + \left(\frac{1}{2} a_y t_a^2 + v_y t_a + Z_0\right)^2} \quad (2)$$

حال می‌توان رابطه سیگنال بازگشتی را با فرض ارسال سیگنال چیرپ به‌صورت رابطه (۳) بیان کرد [۶-۵]:

$$\begin{aligned} S(t_r, t_a) &= \sigma a_r \left( t_r - \frac{2R(t_r)}{c} \right) a_a(t_a) \\ &\times \exp \left[ j\pi K_r \left( t_r - \frac{2R(t_r)}{c} \right)^2 \right] \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_r) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $\sigma$  بیان‌گر سطح مقطع راداری هدف،  $a_r(\bullet)$  پوش سیگنال ارسالی در بعد برد،  $a_a(\bullet)$  دامنه الگوی تشعشعی آنتن،  $t_r$  زمان برد،  $K_r$  نرخ سیگنال چیرپ ارسالی و  $\lambda$  طول موج سیگنال ارسالی است. نکته حائز اهمیت آن است که در رابطه (۳) دقیقاً همانند [۶-۵]، برای توصیف ماهیت حرکت رادار از مدل تقریبی ایست- حرکت<sup>۴</sup> [۷] استفاده شده و لذا رابطه (۳) تنها بر اساس  $t_a$  بیان شده است. در این مدل از ماهیت حرکت رادار بین ارسال یک پالس تا پالس بعدی چشم‌پوشی می‌گردد. این تقریب باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری سرعت و عمل اصلاح مهاجرت

<sup>۱</sup>Slant Range

<sup>۲</sup>Deviation Angle

<sup>۳</sup>Side Looking Angle To Closest Point of

<sup>۴</sup>Stop-Go

<sup>۵</sup>Realtime

<sup>۶</sup>Range Cell Migration

<sup>۷</sup>Instantaneous Slant Range

درجه ۱ و ۲، اثر مهاجرت برد گویند [۸]. در SAR هوا پایه که مسیر حرکت مستقیم و سرعت ثابت است جملات بسط سری تیلور در رابطه (۴) به سرعت همگرا می‌شوند اما در حالت سکوی راداری پایه که حرکت در طول یک مسیر انحنادار (حرکت پرتابه‌ای) می‌باشد؛ تحت شرایطی که معمولاً در حالت سکوی راداری پایه برقرار است [۸]، سری مذکور به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد و از این‌رو می‌بایست تأثیر جملات پر قدرت بررسی شود.

همان‌طور که اشاره شد رابطه (۴) با تأثیر در نمایه سیگنال بازگشتی و تأثیر در فاز ناشی از سمت در رابطه (۳)، بر نحوه پردازش و اخذ تصویر تأثیر به‌سزایی خواهد داشت. اگر  $p_r$  قدرت تفکیک‌پذیری هر درجه برد باشد آنگاه از نقطه‌نظر تأثیر بر نمایه سیگنال بازگشتی می‌توان گفت که هرگاه مقدار تغییرات هر جمله در رابطه (۵) برای دو پالس ارسالی متوالی کمتر از  $\rho_r/2$  باشد، می‌توان از تأثیر آن جمله بر نمایه سیگنال بازگشتی (ناشی از مهاجرت برد) صرف‌نظر کرد.

از نقطه‌نظر سمت اگر مقدار هر جمله رابطه (۴) برای دو پالس ارسالی متوالی کمتر از  $\lambda/8$  باشد آن‌گاه میزان تغییرات فاز ایجاد شده کمتر از  $\pi/4$  رادیان بوده و از تأثیر آن بر فاز سمت می‌توان چشم‌پوشی کرد [۸ و ۲۲]. از نقطه‌نظر پردازش سمت و با جایگذاری رابطه (۴) در قسمت نمایی رابطه (۳) می‌توان گفت که جمله با مرتبه یک بیان‌گر تغییر فرکانس داپلر بوده که رادار را قادر به جداسازی اهداف متفاوت از نظر سمت به کمک فیلترینگ داپلری می‌کند؛ بنابراین تأثیر جمله‌ی با مرتبه یک در رابطه (۳) بر نحوه پردازش رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- از نقطه‌نظر تأثیر بر نمایه سیگنال بازگشتی در بعد برد، باعث ایجاد پدیده حرکت برد شده و باید اصلاح شود.

۲- از نقطه‌نظر پردازش سمت، جمله با مرتبه یک بیان‌گر تغییرات فرکانس داپلر سمت بوده و رادار به کمک فیلترینگ داپلری قادر به جداسازی اهداف با داپلرهای متفاوت می‌باشد.

با استفاده از رابطه (۳)، عبارات موجود در رابطه (۴)، اثراتی را بر روی نمایه فشرده برد و فاز سمت خواهد گذاشت. حال فرض می‌نماییم که  $\rho_r$  مقدار قدرت تفکیک در برد می‌باشد، در کل، هنگامی که عبارات در رابطه (۴) کمتر از  $\frac{\rho_r}{2}$  باشد، می‌توان از محاسبه آن‌ها در مقدار اثرات RCM بر نمایه برد صرف‌نظر نمود و چنانچه عبارات رابطه (۴) کمتر از  $\frac{\lambda}{8}$  گردد، نشان‌دهنده این است که خطاهای فاز هر یک بیشتر از  $\frac{\pi}{4}$  نمی‌گردد و بدین‌جهت می‌توان از محاسبه آن در پردازش سمت نیز صرف‌نظر نمود.

## ۲-۲. بررسی و تحلیل بسط تیلور رابطه برد مایل لحظه‌ای رادار تا هدف

بررسی بسط سری تیلور رابطه برد مایل از آن جهت اهمیت می‌یابد که بین اطلاعات برد و اطلاعات سمت تزویج و درهم‌رفتگی وجود داشته و می‌بایست بسط سری تیلور رابطه برد مایل محاسبه و اثرات تک‌تک جملات آن بر فاز و شکل پالس بازگشتی بررسی شود؛ بنابراین یکی از مفیدترین روابط موجود در تصویربرداری راداری سکوی راداری، بسط سری تیلور رابطه برد می‌باشد [۸].

با توجه به تعاریف ذکر شده در بخش‌های قبل می‌توان مختصات لحظه‌ای رادار را به‌صورت رابطه (۱) و برحسب توابعی درجه‌دو از زمان سمت بر روی سه محور  $Z, Y, X$  بیان کرد. بدین ترتیب رابطه برد مایل رادار تا هدف در هر لحظه به‌صورت رابطه (۲)، خواهد بود. با فرض ارسال پالس‌های چیرپ به سمت هدف توسط رادار، آن‌گاه سیگنال بازگشتی از هدف در رادار به‌صورت رابطه (۳) می‌باشد.

از رابطه (۳) می‌توان این‌چنین استنباط کرد که تغییرات لحظه‌ای برد مایل رادار تا هدف به دو صورت: ۱- تغییر در فاز سیگنال بازگشتی (جملات نمایی) ۲- تغییر در نمایه<sup>۱</sup> سیگنال بازگشتی در بعد برد (پوش سیگنال در بعد برد)، بر روی سیگنال بازگشتی اثر می‌گذارد [۸].

با توجه به رابطه (۳)، بسط سری تیلور حول  $t_r=0$  چنین خواهد بود:

$$R(t_r) = k_0 + k_1 t_r + k_2 t_r^2 + k_3 t_r^3 + \dots \quad (۴)$$

که در آن:

$$k_0 = R_0 \quad (۵)$$

$$k_1 = -\frac{v_z Z_T - Y_0 v_y + v_x X_T}{R_0}$$

$$k_2 = \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + Y_0 a_y - a_z Z_T - a_x X_T}{2R_0} - \frac{(v_z Z_T - Y_0 v_y + v_x X_T)^2}{2R_0^3}$$

$$k_3 = \frac{(a_x v_x + a_y v_y + a_z v_z)}{2R_0} + \dots$$

$$\frac{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + Y_0 a_y - a_z Z_T - a_x X_T)(v_z Z_T - Y_0 v_y + v_x X_T)}{2R_0^3} - \dots$$

$$\frac{(v_z Z_T - Y_0 v_y + v_x X_T)^3}{2R_0^5}$$

در رابطه (۴) جمله درجه ۱ و ۲ از  $\text{tr}$  به ترتیب گام زدن<sup>۲</sup> (RW) و خمیدگی<sup>۳</sup> برد نامیده می‌شوند. به تأثیر مجموع دو جمله

<sup>۱</sup> Profile

<sup>۲</sup> Range Walk

<sup>۳</sup> Range Curvature

در رابطه (۹)، اگر  $\vec{A} \neq 0$  باشد، تفاضل بردی که توسط انحناء برد حاصل می‌شود، عموماً کوچک است؛ بنابراین، انحناء برد عموماً مقداری میانه را دارا است و می‌توان در محاسبات نمایه فشرده‌سازی  $\vec{A}$  برد از آن صرف‌نظر نمود و بدین جهت RCM با RW یکی می‌باشد.

نتیجه بند فوق بسیار مهم است و می‌توان این‌چنین بیان نمود که فقط RW در محاسبات RCM بایستی در نظر گرفته و عملاً انحناء برد اثر چندانی در RCM ندارد.

در حالت کلی در رابطه (۴) می‌توان از مراتب چهار و سه به دلیل خاصیت کاهشی سری تیلور صرف‌نظر نمود ولی چنان‌چه سکو با شتاب جابجایی بالا در قیاس با  $\lambda/8$  باشد، نمی‌توان از اثرات شتاب در مراتب درجه چهار رابطه (۴) صرف‌نظر نمود و بایستی در تشکیل تصویر SAR با حرکت پرتابه‌ای مسامحه‌ای صورت گیرد و لازم به ذکر است که شرط مسامحه در شتاب موشک مقدار  $\lambda/8$  می‌باشد که بایستی شتاب با این مقدار قیاس شود. به روش مشابه، تحلیل مجدد مراتب درجه سه و چهار نشان می‌دهد که مرتبه درجه سه عموماً نیاز به این دارد که در پردازش سمت و به هنگامی که قدرت تفکیک در سمت بالایی مدنظر است به حساب آید، اگرچه می‌توان از اثر مرتبه چهار صرف‌نظر نمود.

همان‌گونه که ذکر گردید جمله با مرتبه دو در رابطه (۴) انحنای برد نام دارد و تفاوت در برد ناشی از انحنای برد را می‌توان به‌صورت رابطه (۹) نوشت [۸].

همانند بررسی تأثیرات جمله با مرتبه یک در رابطه (۴) بر روی سیگنال بازگشتی، در این مورد نیز از دونقطه نظر، می‌توان تأثیر جمله با مرتبه دو را به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- میزان تفاوت در برد ناشی از اثر خمیدگی برد کم‌تر از  $\rho_r/2$  خواهد بود و بنابراین می‌توان از تأثیر آن بر نمایه سیگنال بازگشتی در بعد برد در پردازش‌ها، چشم‌پوشی کرد.

۲- میزان تفاوت در برد ناشی از اثر انحنای برد از  $\lambda/8$  بزرگ‌تر بوده و بنابراین نمی‌توان از تأثیر آن بر فاز سمت سیگنال چشم‌پوشی کرد و اثر آن باید اصلاح شود.

میزان تغییرات در برد ناشی از اثر خمیدگی برد در رابطه (۱۰)، [۸] آمده است. در مورد تأثیر جملات با مرتبه سه و چهار در رابطه (۴) بر روی سیگنال بازگشتی در بعد برد می‌توان گفت که به‌طور کلی و با توجه به کاهش یکنواخت جملات در رابطه (۴) می‌توان از تأثیرات آن‌ها چشم‌پوشی کرد ولی در حالتی که سکوی

نتیجه بند فوق در برخی محاسبات و تحلیل‌ها در الگوریتم پردازش داده خام بسیار مهم است و بایستی همواره مدنظر قرار گرفته باشد، زیرا RCM و تصحیح فاز جز قسمت‌های کلیدی یک الگوریتم پردازشی SAR به شمار می‌رود.

مقدار قدرت تفکیک در سمت  $\rho_a$  همانند رابطه (۶) مشخص می‌باشد:

$$\rho_a = \lambda/2\omega\Delta T = \lambda/2\Delta\theta \quad (۶)$$

آن‌گاه مقدار زمان تشکیل روزنه مصنوعی توسط رابطه (۷) مشخص می‌شود:

$$T = \frac{\lambda R_0}{2|\vec{v}_0|\rho_a \sin \sigma_v} \quad (۷)$$

ماکزیمم مقدار جابجایی برد  $\Delta R_w(T)$  در زمان  $t = T$  رخ خواهد داد و بنابراین، تفاضل برد<sup>۱</sup> که ناشی از جابجایی برد می‌باشد به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$|\Delta R_w(T)| = |\vec{v}_0|T \cos \sigma_v = \frac{\lambda R_0 c \tan \sigma_v}{2\rho_a} \quad (۸)$$

در مورد جابجایی سلول برد و جابجایی برد بایستی بیان نمود که هر دو یک مفهوم را دارا هستند که همان جابجایی سکو است ولی به‌طور کلی جابجایی برد جزئی از جابجایی سلول برد می‌باشد زیرا مفهوم تغییرات بُرد در بازه زمانی مشاهده رادار است.

بنابراین، هنگامی که  $\rho_a \rho_r \leq \lambda R_0$  باشد که همواره در SAR با حرکت پرتابه‌ای صادق است [۸]، آن‌گاه،  $|\Delta R_w(T)| \geq \rho_r/2$  می‌گردد و بنابراین، تحت این شرایط بایستی جابجایی برد را در SAR با حرکت پرتابه‌ای تصحیح نمود.

برای پردازش سمت، اولین متغیر، شیفت داپلر است که این امکان را می‌دهد که اهداف در سمت توسط فیلتر داپلر جدا شوند.

ماکزیمم مقدار انحناء برد  $|\Delta R_c(T/2)|$  می‌باشد که در زمان  $t = T/2$  روی می‌دهد، لذا، تفاضل انحنای برد را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$|\Delta R_c(T/2)| = \frac{|-\vec{A}| \cos \sigma_A + R_0^{-1} |\vec{v}_0|^2 \sin^2 \sigma_v}{8} T^2 \quad (۹)$$

در رابطه (۹) اگر  $\vec{A} = 0$  باشد، آنگاه،  $16\rho_a^2 \rho_r \geq \lambda^2 R_0$  و  $4\rho_a^2 \leq \lambda R_0$  بوده که عموماً در تشکیل تصویر SAR با حرکت پرتابه‌ای صادق اند [۸] بنابراین، خواهیم داشت:

$$\lambda/8 \leq |\Delta R_c(T/2)| \leq \rho_r/2 \quad (۱۰)$$

<sup>۲</sup>Compression

<sup>۱</sup>Range Difference

تصویری مناسب در SAR با حرکت پرتابه‌ای استفاده شده است. چرا که هدف الگوریتم پیشنهادی در این مقاله تشکیل تصویری از صحنه هدف است که جهت اعمال فرامین کنترل و هدایت مناسب باشد و درحالی‌که هدف الگوریتم‌هایی مانند SAR هواپایه تشکیل تصویر و ارسال آن جهت بررسی و ارزیابی و مطالعات دیگر مانند زمین شناسی، نظامی است از این رو نیازمند کیفیت تصویر بسیار بالا هستند، اما در این مقاله هدف تشکیل تصویر جهت تشخیص هدف و اصلاح مسیر پروازی SAR با حرکت پرتابه‌ای می‌باشد و از این رو کیفیت‌های پایین‌تر تصویر ناشی از به‌کارگیری RDA تقریبی قابل قبول می‌باشد با این وجود در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله به کمک روش PGA از میزان خطای اعمالی ناشی از به‌کارگیری الگوریتم RDA تقریبی؛ تا حدود بسیار زیادی کاسته شده است.

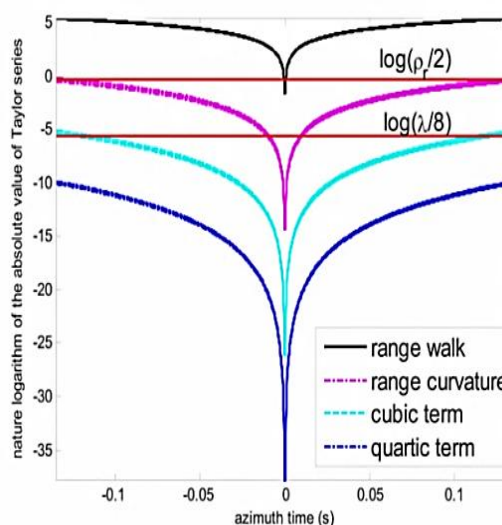
الگوریتم RDA استفاده شده [۱] که مانند الگوریتم<sup>۱</sup> CSA از جمله الگوریتم‌های دقیق تشکیل تصویر می‌باشد و برای RCMC داده‌های خام را پس از فشرده‌سازی دربرد با گرفتن تبدیل فوریه در سمت به حوزه برد- داپلر می‌برد و سپس با انجام درون‌یابی RCMC را انجام می‌دهد. عملیات درون‌یابی بسیار زمان‌بر است و برای سیستم‌های بلادرنگ کاربرد ندارد؛ بنابراین در این مقاله از روش تقریبی RDA استفاده می‌شود.

بلوک دیاگرام RDA در شکل ۴ نمایش داده شده است. از ویژگی‌های بارز این الگوریتم می‌توان به پردازش مستقل در بعد برد و سمت و همچنین حجم محاسبات نسبتاً مناسب جهت اخذ تصویر اشاره کرد [۱ و ۹]. در بعد برد برای داشتن قدرت تفکیک‌پذیری بالا در جهت فاصله، معمولاً از پالس‌های مدوله‌شده فرکانس خطی<sup>۲</sup> (LFM) استفاده می‌شود. اولین بلوک گیرنده وظیفه فشرده‌سازی این پالس بازگشتی را بر عهده دارد. پس از فشرده‌سازی پالس، سیگنال فشرده‌شده در برد به‌صورت رابطه (۱۱) قابل‌نوشتن می‌باشد [۹]:

$$r_1(t_r, t_a) = A_1 p(t_r - 2R(t_r, t_a) / c) \exp(-j4\pi f_0 R(t_r, t_a) / c) \quad (11)$$

در این رابطه  $c$  سرعت نور،  $f_0$  فرکانس مرکزی رادار و  $A_1$  دامنه سیگنال دریافتی را مشخص می‌کند. همچنین تابع  $p(t)$  سینک بوده ولی برای سادگی می‌توان آن را تابع ضربه در نظر گرفت. به علت فاصله بین سکو و هدف، سیگنال دریافتی دارای فاز می‌باشد که در جمله آخر رابطه (۱۱) مشخص شده است.

راداری دارای شتاب و سرعت بالایی باشد از جمله با درجه سه نمی‌توان صرف‌نظر کرد. جمله با درجه سه همانند جمله با درجه دو فقط بر فاز سیگنال دریافتی تأثیر می‌گذارد و اثر آن باید توسط ضرب توابع فازی در سیگنال بازگشتی جبران شود؛ اما از تأثیر جملات با مرتبه چهار و بالاتر به‌طورکلی می‌توان صرف‌نظر کرد [۸]. به‌طور خلاصه می‌توان مقدار هرکدام از جملات موجود در رابطه (۵) را با مقادیر معیار  $\rho_f/2$  و  $\lambda/8$  در یک نمودار لگاریتمی که در شکل ۳ آمده است مقایسه کرد.



شکل ۳. نمودار لگاریتمی جملات رابطه (۵)، [۸]

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است اثر گام زدن و خمیدگی دربرد چه از نظر تأثیر در شکل و چه از نظر تأثیر در فاز سیگنال بازگشتی، باید لحاظ شود. جمله با مرتبه سه از لحاظ تأثیر بر فاز سیگنال بازگشتی مؤثر است و اثر آن باید لحاظ شود. از اثر جملات با مرتبه بالاتر از سه می‌توان به‌طورکلی صرف‌نظر کرد. اگر تأثیر جمله با مرتبه سه جبران نشود آن‌گاه قدرت تفکیک‌پذیری سمت تصویر کاهش می‌یابد و به‌طورکلی اگر اثر گام زدن برد و اثرات ناشی از سرعت و شتاب حرکت که نقش آن‌ها در بروز خطا از مجموعه روابط (۴) و (۵) مشخص است جبران نشود آن‌گاه تصویر اخذشده دارای ابهام خواهد بود. همچنین در رابطه با اثر سرعت حرکت سکوی راداری در سیگنال بازگشتی می‌توان گفت که طبق مجموعه روابط (۴) و (۵) هرچه اندازه‌ی سرعت اولیه سکوی راداری (سرعت سکوی راداری در  $t_a = 0$ ) بیشتر باشد اثر حرکت برد و خمیدگی برد افزایش یافته که این خود منجر به افزایش میزان خطاهای ذکر شده می‌شود.

### ۳. بررسی الگوریتم برد- داپلر

در سامانه‌های SAR، الگوریتم پردازشی پایه، RDA می‌باشد [۹] و در این مقاله نیز از الگوریتم RDA تقریبی برای دست‌یابی به

<sup>۱</sup>Chirp Scaling Algorithm

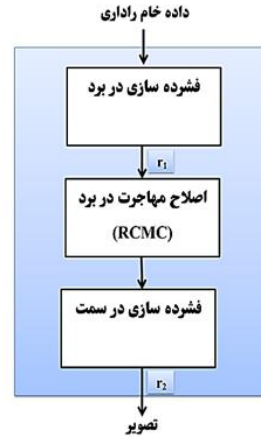
<sup>۲</sup>Linear Frequency Modulation

سرعت (۶) شتاب و مسافت توسط سنجنده‌هایی وضعیت و موقعیت رادار (۷) خطاهای ناشی از تقریب‌های مفروض در مرحله RCMC و درونیابی موجود در الگوریتم‌های پردازشی مرسوم نظیر PFA<sup>۱</sup>، ω-KA، CSA، RDA می‌باشد که هرکدام اثر خاص خود را بر روی کیفیت تصویر اخذشده خواهند گذاشت [۱۰] [۱۱]. به‌عنوان نمونه، اگر خطای فاز ناشی از حرکات غیرخطی و ناخواسته در سمت جبران نشود تبعاتی هم‌چون کاهش صحت و دقت هندسه حرکت رادار را به دنبال داشته و باعث کاهش کیفیت تصاویر SAR خواهد شد. از طرف دیگر مشخصات خاص رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای نظیر حرکت غیرخطی با سرعت متغیر (شتاب ثابت)، سرعت‌بالای سکوی راداری و زاویه لوچی بالا باعث تشدید خطاهای فاز مذکور می‌شوند. به‌عنوان مثال سرعت بالای سکوی راداری باعث تشدید خطای فاز ناشی از تغییر مرکز فاز آنتن شده و زاویه لوچی بالا موجب افزایش میزان مهاجرت دربرد و به‌تبع آن موجب تشدید خطای فاز مذکور می‌شود. متأسفانه هیچ‌کدام از الگوریتم‌های پردازشی مرسوم نظیر PFA، CSA، RDA، ω-KA قادر به تشکیل تصویر مطلوب جهت استفاده در سکوی راداری نمی‌باشند. زیرا در کاربردهای سکوی راداری پایه نیاز به تصویری واضح از هدف بوده تا به‌وسیله آن سکوی راداری قادر به واردکردن بیشترین صدمه به هدف باشد. استفاده از روش‌های خودکانونی، خطاهای فاز ناشی از موارد ذکرشده را به کم‌ترین میزان خود رسانده و بدین‌ترتیب کیفیت بالاتر تصاویر SAR را به دنبال خواهد داشت [۱۰-۱۳]. در ادامه ضمن تحلیل خطای فاز و تأثیر آن بر تصویربرداری، به بررسی انواع روش‌های خودکانونی پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱. تحلیل خطای فاز و تأثیر آن بر تصویربرداری

در پیشینه سیگنال‌های SAR پهلونگر، بازگشتی‌های سمت (از نقطه‌نظر زمان سمت) از یک هدف نقطه‌ای در حالت ایده‌آل، شکل یک سیگنال LFM استاندارد را دارند که در این‌صورت همانند آن‌چه در بعد برد در سیگنال بازگشتی اتفاق می‌افتد در بعد سمت نیز به کمک روش فشرده‌سازی در سمت به یک قدرت تفکیک‌پذیری بالا در بعد سمت دست خواهیم یافت؛ اما در عمل در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای سیگنال بازگشتی در سمت به دلیل هندسه حرکتی خاص سکوی راداری و وجود زاویه لوچی بالا یک سیگنال LFM استاندارد نیست. در این مقاله عنوان خطای فاز، بر فاز اضافی موجود سیگنال LFM بازگشتی نسبت به سیگنال LFM در بعد سمت استاندارد اطلاق می‌شود.

رابطه (۱۱) یک سیگنال دوبعدی شامل سینک‌هایی در نقطه  $A_1 \exp(-j2\pi 2f_0 R(t_r, t_a)/c)$  با دامنه مختلط  $t = 2R(t_a + t_r)/c$  را نشان می‌دهد.



شکل ۴. بلوک دیاگرام الگوریتم برد- داپلر مرسوم

دومین بلوک گیرنده اصلاح مهاجرت برد را (بلوک RCMC) در حوزه برد- داپلر انجام می‌دهد. اهداف در زاویه‌های سمت مختلف به‌صورت مرتب‌شده در این حوزه کنار هم چیده می‌شوند و این موضوع پردازش‌های بعدی را ساده‌تر می‌کند. بلوک RCMC وظیفه جبران‌سازی حرکت مطلوب را بر عهده دارد. سومین بلوک گیرنده وظیفه فشرده‌سازی سیگنال در جهت سمت را بر عهده دارد. اگر توابع موجود در رابطه (۹) از محل مناسب برداشته‌شده و در فاز مناسب یعنی  $\exp(j2\pi 2f_0 R(t_r, t_a)/c)$  ضرب و سپس جمع شوند، پردازش SAR انجام‌شده است [۱، ۲ و ۵]. سیگنال خروجی بلوک RCMC وقتی که متغیر آن  $F_{t_a}$  باشد، همانند یک سیگنال LFM است. سیگنال پس از فشرده‌سازی و در خروجی سومین بلوک گیرنده به‌صورت (۱۲) [۹] خواهد شد:

$$r_2(t, F_{t_a}) = A_2 p(t - 2R_0/c) \exp(-j4\pi f_0 R_0/c) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) سیگنال  $r_2(t, F_{t_a})$  یک نقطه در فضای دوبعدی برد- داپلر را متناظر با مکان هدف مشخص می‌کند. در انتها باید گفت که پردازش SAR همان پردازش آرایه‌ای و جمع هم‌فاز سیگنال‌های دریافتی از یک‌جهت خاص می‌باشد و RDA هم دقیقاً همین کار را به‌صورت ساده انجام می‌دهد.

#### ۴. لزوم به‌کارگیری روش‌های خودکانونی

از دغدغه‌های اساسی در پردازش رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای جبران‌سازی خطاهای ناشی از (۱) حرکت غیرخطی سکوی راداری (۲) تغییرات مرکز فاز آنتن فرستنده (۳) گیرنده (۴) محیط انتشار سیگنال‌های راداری (۵) اندازه‌گیری

<sup>۱</sup>Polar Format Algorithm

#### ۴-۲. بررسی انواع روش‌های خودکانونی

روش‌های خودکانونی پرکاربرد در پردازش‌های SAR عبارت‌اند از: رانش نگاشت<sup>۳</sup> (MD)، بهینه‌سازی کنتراست<sup>۴</sup> (CO)، رتبه خطای فاز<sup>۵</sup> (ROPE)، پردازش نقطه برجسته<sup>۶</sup> (PPP) و خودکانونی گرادیان فاز (PGA).

الگوریتم‌های CO و MD با وجود آن‌که از لحاظ حجم محاسبات بسیار مناسب بوده و از قوی‌ترین الگوریتم‌ها در تخمین و حذف خطاهای فاز موجود از مرتبه دو می‌باشند اما به دلیل آن‌که با افزایش مرتبه خطاهای فاز موجود توانایی آن‌ها در تخمین و حذف این خطاها کاهش می‌یابد و از طرفی خطاهای فاز موجود در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای دارای مرتبه‌هایی بالاتر از مرتبه دو بوده لذا الگوریتم CO برای پردازش در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای مناسب نمی‌باشند. الگوریتم MD نیز قادر به تشخیص بخش خطی خطا نیست بنابراین برای رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای که عمده خطای آن خطی است کاربرد ندارد [۱۹-۱۸].

الگوریتم ROPE قادر به تخمین خطاهای فاز تا هر مرتبه‌ای می‌باشد اما به دلیل آن‌که حذف خطا در آن وابسته به مدل سیگنال و تنها برای یک پراکنده‌ساز در هر سلول برد می‌باشد. لذا این الگوریتم نیز برای پردازش در حالت رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای که در آن هدف گسترش یافته است، مناسب نیست [۱۸].

الگوریتم PPP قادر به تخمین خطاهای فاز موجود تا هر درجه‌ای بوده و روش کار آن به این صورت است که به محاسبه تغییرات برد و فاز در هر پالس و برای چندین هدف پر قدرت می‌پردازد و سپس اقدام به حذف خطای فاز تخمینی می‌کند. هم‌چنین این روش قادر به اندازه‌گیری خطاهای فاز ناشی از حرکت‌های چرخشی<sup>۷</sup> در SAR است؛ اما عیب این روش آن است که به وجود چندین هدف پر قدرت در صحنه تحت پوشش رادار وابسته است که شاید بتوان به‌طور خاص و برای اهدافی مشخص، از این الگوریتم استفاده کرد ولی به‌طور کلی این روش نیز برای پردازش رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای مناسب نیست زیرا در عمل تضمینی برای این‌که هدف دارای چندین پراکنده‌ساز پر قدرت باشد وجود ندارد [۱۸].

روش خودکانونی گرادیان فاز یکی از پرکاربردترین و

بر این اساس سه نوع خطای فاز وجود دارد که به ترتیب عبارت‌اند از خطای فاز فرکانس پایین، خطای فاز سینوسی شکل فرکانس بالا، خطای فاز پهن باند که در جدول ۱ تأثیر هر کدام از این خطاها آمده است [۱۹ و ۱۱-۱۰].

جدول ۱. انواع خطاهای فاز و تأثیر آن‌ها

تأثیر بر تصویر	نوع خطای فاز
اعوجاج هندسه حرکت	فرکانس پایین
کاهش قدرت تفکیک‌پذیری	
کاهش کنتراست	فرکانس بالا (سینوسی شکل)
ابهام در تصویر	
کاهش کنتراست و SNR	پهن باند

خطای فاز سینوسی فرکانس بالا توسط لرزش‌های سریع جبران نشده‌ی مرکز فاز آنتن رادار به وجود می‌آید. خطای فاز پهن باند به‌وسیله خطاهای ناشی از اندازه‌گیری حرکات ناخواسته سکوی حامل رادار به وجود می‌آید. به‌طور کلی دو خطای فوق جزء خطاهای فاز فرکانس بالا می‌باشند. در سامانه‌های SAR عمده خطای فاز موجود در تصویر، خطای فاز فرکانس پایین می‌باشد [۱۹ و ۱۲-۱۰].

در سامانه‌های SAR نوین، به کمک ترکیبی از سیستم اندازه‌گیری اینرسی (INS) و سیستم موقعیت‌یاب جهانی<sup>۱</sup> (GPS) می‌توان به اندازه‌گیری دقیق ساختار حرکتی و دیگر تحرکات فرکانس بالای مرکز فاز آنتن پرداخت و لذا در خلال عملیات جبران‌سازی حرکتی، خطاهای فاز فرکانس بالا به‌راحتی جبران می‌شوند اما از آن‌جا که در رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای این امکان وجود دارد که بر روی سیستم موقعیت‌یاب جهانی اخلاص<sup>۲</sup> صورت گیرد و هم‌چنین واحد اندازه‌گیری اینرسی نیز ذاتاً دارای مقداری خطا در اندازه‌گیری‌های خود می‌باشد لذا بخشی از خطاهای فاز فرکانس بالا هم‌چنان در سیگنال بازگشتی وجود خواهد داشت که موجب کاهش کیفیت تصویر هدف می‌شود [۱۳ و ۱۹].

با توجه به مباحث ذکر شده استفاده از روش‌های خودکانونی جهت تصحیح خطای فاز (به‌خصوص خطای فاز فرکانس پایین) لازم به نظر می‌رسد.

<sup>۳</sup>Map Drift

<sup>۴</sup>Contrast Optimization

<sup>۵</sup>Rank OF Phase Error

<sup>۶</sup>Prominent Point Processing

<sup>۷</sup>Rotation

<sup>۱</sup>Global Positioning System

<sup>۲</sup>Jamming



نویز کمک می‌کند؛ اما عمل فوق هنگامی که در هر دریچه برد بیش از یک پراکنده‌ساز پر قدرت با شدت برابر وجود داشته باشد با مشکل مواجه شده و کارایی خود را از دست خواهد داد. اگر عمل یافتن پراکنده‌سازهای پر قدرت در هر دریچه برد را به کمک عملگر همبستگی انجام دهیم آن‌گاه مشکل مذکور برطرف شده و الگوریتم ترکیبی قادر به تشکیل تصویر از هدف گسترده نیز خواهد بود.

### ۵-۲. انتخاب روش پنجره‌گذاری

در این مرحله، در دو سمت نقطه مرکز، دونقطه‌ای را که دامنه آن‌ها به اندازه ۱۰dB پایین‌تر از نقطه ماکزیمم قوی‌ترین پراکنده‌سازی که اکنون در مرکز قرار دارد، پیدا کرده و فاصله بین این دو نقطه را به‌عنوان عرض پنجره در نظر گرفته و بدین ترتیب تابع پنجره‌گذاری تشکیل می‌شود که مرکز آن دقیقاً بر مرکز تصویر منطبق است [۱۷-۲۰].

### ۵-۳. تخمین گرادیان خطای فاز

بعد از جابه‌جایی و پنجره‌گذاری آنگاه می‌توان سیگنال بازگشتی در هر دریچه برد را در حوزه برد- داپلر به‌صورت رابطه (۱۳) بیان کرد. در این رابطه S بیان‌گر فرکانس سمت می‌باشد.

$$G_n(s) = |G_n(s)| \exp(j(\phi_e(s) + \theta_n(s))) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $\theta_n(s)$  فاز وابسته‌ی یک سلول برد بوده که توسط ویژگی‌های پراکنده‌سازها تعیین می‌شود و دارای امید ریاضی صفر است.  $\Phi_e(s)$  خطای فاز ناشی از منابع گوناگون ذکر شده می‌باشد. اگر از دو طرف رابطه (۱۳) مشتق گرفته شود آن‌گاه خواهیم داشت:

$$G'_n(s) = \left( |G'_n(s)| + j(\phi'_e(s) + \theta'_n(s)) |G_n(s)| \right) \times \exp(j(\phi_e(s) + \theta_n(s))) \quad (14)$$

حال اگر از دو طرف رابطه (۱۳) عمل مزدوج‌گیری<sup>۸</sup> را انجام دهیم آن‌گاه خواهیم داشت:

$$G_n^*(s) = |G_n(s)| \exp(-j(\phi_e(s) + \theta_n(s))) \quad (15)$$

حال با ضرب (۱۴) در (۱۵) خواهیم داشت:

$$G_n(s)G_n^*(s) = |G_n(s)|^2 \exp(j(\phi_e(s) + \theta_n(s)) - j(\phi_e(s) + \theta_n(s))) \quad (16)$$

<sup>۸</sup>Conjugate

قوی‌ترین روش‌ها در تخمین و حذف انواع خطاهای فاز موجود بوده و قادر به تخمین خطاهای فاز تا هر درجه‌ای می‌باشد. نکته لازم به ذکر آن است که این روش همراه با الگوریتم‌های مرسوم تشکیل تصویر و در حوزه برد- داپلر به‌کار گرفته می‌شود. این روش از آن جهت به این نام خوانده می‌شود که از طریق تخمین گرادیان خطای فاز موجود در اطلاعات تصویر در حوزه برد- داپلر و سپس انتگرال‌گیری از آن خطای فاز را تخمین می‌زند؛ لذا با توجه به مباحث ذکر شده به نظر می‌رسد هم به لحاظ حجم محاسبات و هم به لحاظ سادگی و توانایی روش، این روش برای پردازش SAR با حرکت پرتابه‌ای مناسب است. در ادامه نحوه کاربرد و سیر مراحل آن بیان خواهد شد [۱۷-۱۸].

### ۵. روش خودکانونی گرادیان فاز

روش PGA قادر به تخمین خطاهای فاز تا هر درجه‌ای می‌باشد. این روش برخلاف روش‌های خودکانونی که وابسته به یک مدل مشخص‌اند، به‌صورت هوشمند و با استفاده از افزودنی<sup>۱</sup> موجود در اطلاعات که در تصویر تنزل یافته از نظر کیفیت وجود دارد به تخمین و حذف کلیه خطاهای فاز موجود می‌پردازد. یکی از بارزترین ویژگی‌های این روش عدم وابستگی کیفیت تصویر حاصله در آن به صحنه تصویربرداری مدنظر می‌باشد.

این روش شامل چهار مرحله بوده که به ترتیب عبارت‌اند از جابه‌جایی دایره<sup>۲</sup>، پنجره‌گذاری<sup>۳</sup>، تخمین گرادیان فاز<sup>۴</sup> و تصحیح مکرر<sup>۵</sup> که در ادامه به توضیح هرکدام از مراحل فوق پرداخته می‌شود [۱۷-۱۸].

### ۵-۱. انتخاب پراکنده‌سازهای پر قدرت توسط عملگر

#### همبستگی

در روش خودکانونی گرادیان فاز مرسوم، در هر دریچه برد<sup>۶</sup> قوی‌ترین پراکنده‌ساز<sup>۷</sup> انتخاب‌شده و به مرکز تصویر منتقل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر جابه‌جایی دایره می‌شود. مفهوم جابه‌جایی دایره آن است که به کمک این عمل، مهاجرت سلول‌های برد صحنه حذف می‌شود. از طرف دیگر این عمل به تعیین دقیق عرض پنجره برای استفاده در مرحله بعد و افزایش سیگنال به

<sup>۱</sup> Redundancy

<sup>۲</sup> Circular Shifting

<sup>۳</sup> Windowing

<sup>۴</sup> Phase Gradient Estimation

<sup>۵</sup> Iterative Correction

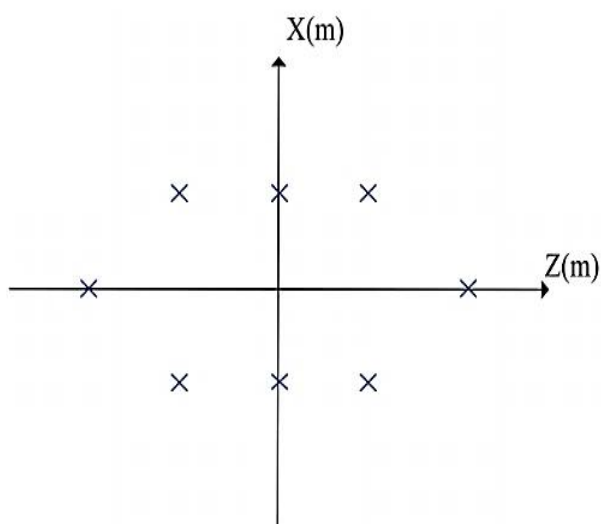
<sup>۶</sup> Range Bin

<sup>۷</sup> Prominent Scattering

فشرده- داپلر سمت انجام می‌گیرد) به کمک ضرب آن‌ها در یک ضریب فازی  $\exp(-j\hat{\phi}_e(s))$  و سپس با تبدیل فوری معکوس در سمت، می‌توان به تصویر جدید دست‌یافت. برای آن‌که مقدار خطای فاز تخمینی از مقدار استاندارد پیش‌فرض کمتر شود می‌باید مراحل بالا را تا چندین مرتبه تکرار کرد. مقدار استاندارد پیش‌فرض در این مقاله برای حد بالای خطای فاز موجود  $\phi \leq \frac{\pi}{4}$  بوده و حد پایین آن  $\phi \approx 0$  می‌باشد؛ بنابراین با اعمال این حدود در این مرحله می‌توان به تعداد تکرار بهینه لازم برای اصلاح خطای فاز موجود رسید. در این مقاله با ۴ تکرار، خطای فاز موجود به سمت صفر میل می‌کند. حال پس از طی مراحل ذکرشده بالا می‌توان به کمک تبدیلات فوری (فیلتر منطبق سمت) تصویر نهایی را اخذ کرد [۷ و ۱۸-۱۷].

## ۶. بررسی نحوه عملکرد الگوریتم ترکیبی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی

شبیه‌سازی به منظور اخذ تصویر از هدفی با هشت پراکنده‌ساز غالب انجام شده است. شکل ۵ نحوه توزیع هشت پراکنده‌ساز غالب را در هدف مدنظر نشان می‌دهد. البته الگوریتم ترکیبی مذکور قادر به اخذ تصویر از هر تعداد پراکنده‌ساز غالب بوده و از این لحاظ هیچ محدودیتی ندارد.



شکل ۵. نحوه توزیع هشت پراکنده‌ساز غالب در هدف مدنظر

شمای کلی الگوریتم ترکیبی در شکل ۶، پارامترهای رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای با فرض ارسال پالس‌های چیرپ در جدول ۲ و مشخصات سیستمی کامپیوتر مورد استفاده جهت شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است.

در رابطه (۱۴) فقط قسمت موهومی شامل خطای فاز  $\Phi_e(s)$  می‌باشد و لذا بخش موهومی آن را جدا کرده و داریم:

$$\text{Im}\{G_n(s)G_n^*(s)\} = (\varphi_e(s) + \theta_n(s))' |G_n(s)|^2 \quad (17)$$

حال رابطه (۱۷) را که برای یک دریاچه برد صادق است به کل تصویر به‌تمامی سلول‌های برد تعمیم می‌دهیم و نتایج حاصل را با هم جمع کرده و داریم:

$$\sum_n \text{Im}\{G_n(s)G_n^*(s)\} = \sum_n (\varphi_e(s) + \theta_n(s))' |G_n(s)|^2 \quad (18)$$

$$\sum_n \text{Im}\{G_n(s)G_n^*(s)\} = \varphi_e'(s) \sum_n |G_n(s)|^2 + \sum_n \theta_n'(s) |G_n(s)|^2$$

و بنابراین، از رابطه (۱۸)، گرادیان فاز تخمینی را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\hat{\phi}_e'(s) = \frac{\sum_n \text{Im}\{G_n(s)G_n^*(s)\}}{\sum_n |G_n(s)|^2} \quad (19)$$

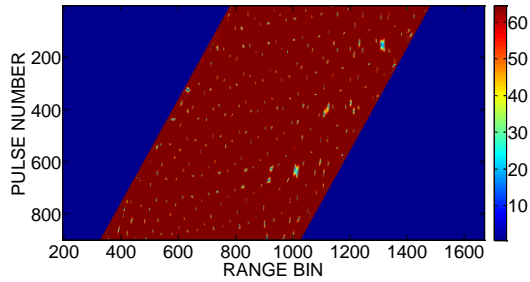
$$\hat{\phi}_e'(s) = \phi_e'(s) + \frac{\sum_n \theta_n'(s) |G_n(s)|^2}{\sum_n |G_n(s)|^2}$$

نام‌گذاری این روش به نام گرادیان فاز از همین موضوع نشأت می‌گیرد چراکه این روش طبق رابطه (۱۹) به تخمین گرادیان خطای فاز می‌پردازد و  $\phi_e'(s)$  همان گرادیان خطای فاز تخمینی است. با استفاده از رابطه (۱۸) و (۱۹) می‌توان گفت که اگر بتوان در هر دریاچه برد گرادیان سیگنال‌های بازگشتی در آن دریاچه را در مزدوج همان سیگنال‌ها ضرب کرد و سپس قسمت موهومی نتیجه ضرب را جدا کرد و این عمل را برای  $n$  دریاچه برد تکرار کرد و نتایج حاصل در هر دریاچه برد باهم جمع کرد (عملیات مجموع‌گیری). سپس با تقسیم نتیجه حاصله بر مجموع توان سیگنال‌های بازگشتی هر دریاچه برد (این سیگنال‌ها در حوزه برد- داپلر قرار دارند)، می‌توان به یک تخمین از گرادیان خطای فاز موجود در مجموع سیگنال‌های بازگشتی دست‌یافت. هم‌چنین همان‌طور که ذکر شد امید ریاضی متغیر تصادفی  $\Theta_n(s)$  اگر  $n$  به‌اندازه کافی بزرگ باشد، صفر خواهد بود که در حالت سکوی راداری پایه این‌چنین است [۱۵] و بنابراین جمله دوم رابطه (۱۷) صفر خواهد شد و تخمین دقیقی از گرادیان خطای فاز موجود حاصل می‌شود. با یک انتگرال‌گیری از دو طرف رابطه (۱۹) می‌توان به تخمین دقیقی از خطای فاز موجود دست یافت [۱۸-۱۷].

## ۴-۵. اصلاح مکرر

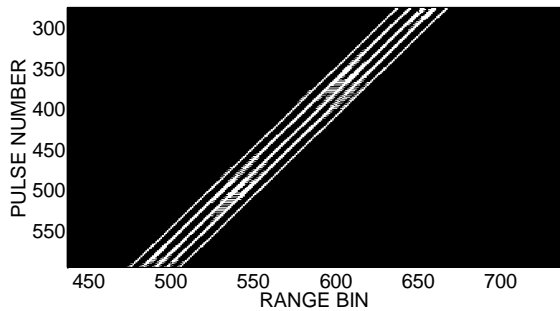
آخرین مرحله از روش خودکانونی گرادیان فاز حذف خطای فاز تخمین زده‌شده از اطلاعات تصویر (این جبران‌سازی در حوزه برد

نقطه‌ای، بر اساس پارامترهای جدول ۲ برای یک رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای با فرض مسیر حرکت پرتابه‌ای بدون انحراف و شکل ۸ داده بازگشتی فشرده شده در بعد برد برای هشت پراکنده‌ساز نقطه‌ای از هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۷. داده‌های خام بازگشتی برای هشت نقطه‌ای

کشیدگی تصویر ناشی از مهاجرت در برد در شکل‌های ۷ و ۸ به‌وضوح مشخص است. پس از تولید داده خام بازگشتی، این اطلاعات توسط یک فیلتر منطبق یک‌بعدی در بعد فشرده می‌شود. شکل ۸ هشت پراکنده‌ساز نقطه‌ای از هدف را پس از فشرده‌سازی در بعد برد نشان می‌دهد. در این مرحله با توجه به فرکانس تکرار پالس رادار و تعداد پالس‌های دریافتی و این‌که طول هر سلول برد  $\frac{c}{2BW}$  می‌باشد با توجه به مقدار مهاجرت سلول برد نسبت به پالس اول می‌توان به تخمین دقیقی از سرعت و شتاب رادار دست‌یافت.  $BW$  پهنای باند سیگنال ارسالی می‌باشد.



شکل ۸. داده‌های بازگشتی فشرده شده در بعد برد

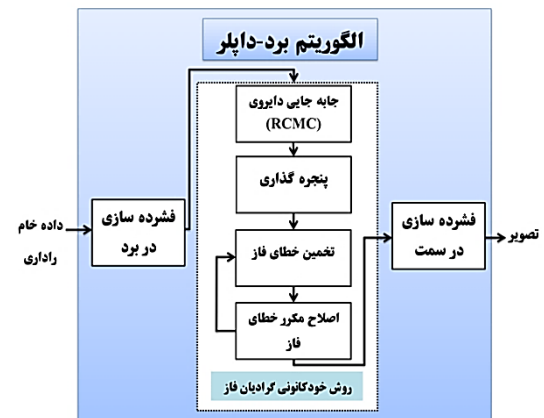
سپس اطلاعات فشرده شده در بعد برد به واحد خودکانونی گرادیان فاز ارسال می‌شود. اولین بلوک در این واحد کلیدی‌ترین نقش را در الگوریتم ترکیبی ایفا می‌کند چرا که عملیات اصلاح مهاجرت در برد و تعیین دقیق پراکنده‌سازهای پر قدرت برای اعمال جابه‌جایی دایره در این بلوک انجام می‌شود. روند پردازشی در این بلوک به این صورت است که ابتدا اولین پالس ارسالی به‌عنوان پالس مرجع انتخاب می‌شود و سپس همبستگی پالس‌ها بعدی نسبت به پالس مرجع محاسبه و محل نقطه ماکزیمم همبستگی‌ها ذخیره می‌شود. با دانستن محل نقطه ماکزیمم

جدول ۲. پارامترهای رادار روزنه مصنوعی مفروض در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
طول موج رادار ( $\lambda$ )	۳Cm
فرکانس حامل	۱۰ GHz
عرض پالس ارسالی ( $T_s$ )	۲۰ $\mu$ s
فرکانس تکرار پالس ( $prf$ )	۱۲۰۰ Hz
قدرت تفکیک‌پذیری ( $P$ )	۱۰ M
سرعت سکوی راداری ( $v_r$ )	۲۷۰ $\frac{m}{s}$
زاویه لوچی معادل رادار ( $\alpha$ )	۸۴°
ارتفاع شروع تصویربرداری ( $H_0$ )	۴۰ Km

جدول ۳. مشخصات سیستمی کامپیوتر مورد استفاده برای شبیه‌سازی

عنوان	نوع و مقدار
CPU	Intel corei7-2.2 GHz
RAM	8GB
سیستم‌عامل	ویندوز ۷-۶۴ بیتی



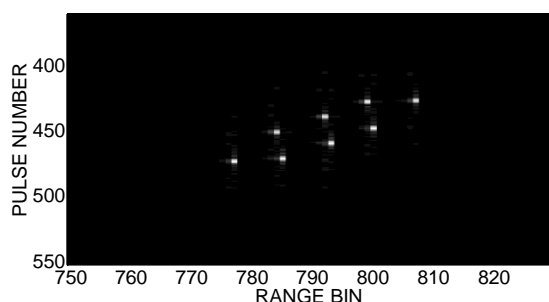
شکل ۶. بلوک دیاگرام الگوریتم ترکیبی

روند پردازش سیگنال‌های بازگشتی جهت اخذ تصویر توسط الگوریتم ترکیبی به این صورت است که ابتدا باید داده خام بازگشتی برای یک رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای تولید شود چراکه در عمل امکان دسترسی به داده خام بازگشتی برای یک رادار روزنه مصنوعی سکوی راداری پایه وجود ندارد. پس از آن که داده خام بازگشتی برای رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای بر اساس پارامترهای جدول ۲ تولید شد آن‌گاه این اطلاعات به کمک فیلتر منطبق<sup>۱</sup> در بعد برد بر اساس الگوریتم برد- داپلر فشرده شده و سپس جهت اصلاح مهاجرت برد و اعمال روش PGA به مرحله بعدی ارسال می‌شود.

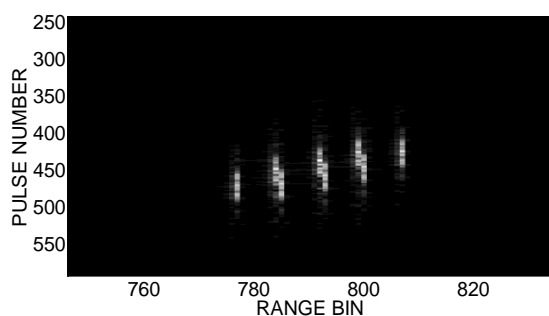
شکل ۷ داده خام بازگشتی تولید شده را برای هشت هدف

<sup>۱</sup>Matched Filter

بعد سمت نشان می‌دهد. در صورتی که جهت اخذ تصویر از هدف مذکور، تنها از الگوریتم برد-داپلر مرسوم استفاده شود آن‌گاه تصویر حاصل از هدف دارای ابهام بوده و دارای خود کانونی نمی‌باشد. شکل ۱۲ تصویر حاصل از هدف مذکور که تنها با استفاده از الگوریتم برد-داپلر مرسوم به دست آمده را نشان می‌دهد.

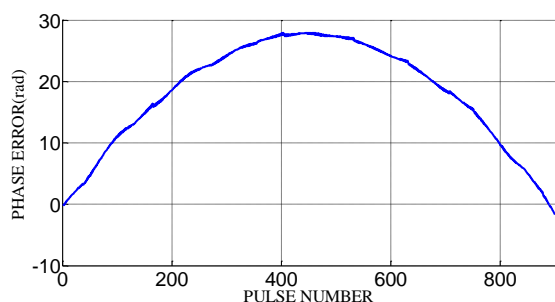


شکل ۱۱. تصویر نهایی حاصل از الگوریتم ترکیبی بعد از فشردگی در بعد سمت



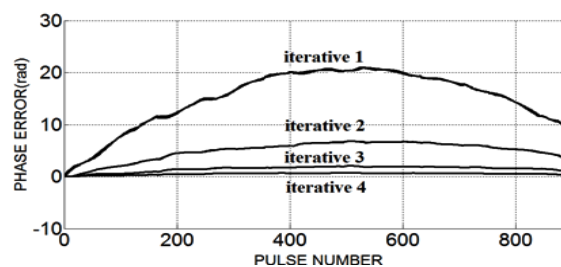
شکل ۱۲. تصویر نهایی حاصل از الگوریتم برد-داپلر بعد از فشردگی در بعد سمت (بدون ترکیب با روش PGA)

هدف دارای هشت پراکنده‌ساز پرقدرت متمایز بوده و سطح مقطع راداری هر کدام نیز متمایز است. شکل ۱۳ کل خطای فاز موجود در تصویر حاصل از الگوریتم برد-داپلر (بدون ترکیب الگوریتم PGA با RDA) را نشان می‌دهد. این میزان خطا با به‌کارگیری الگوریتم ترکیبی و با چهار تکرار به سمت صفر میل داده می‌شود.



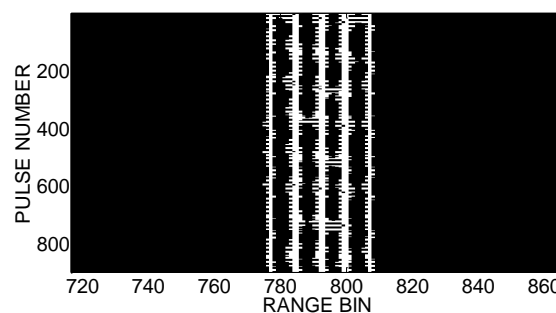
شکل ۱۳. خطای فاز کلی موجود در تصویر حاصل از الگوریتم برد-داپلر (بدون ترکیب با روش PGA)

همبستگی‌ها، میزان جابه‌جایی مورد نیاز برای انجام صحیح مرحله جابه‌جایی دایروی که در بخش ۵ به آن اشاره شده، حاصل می‌شود. حال به کمک تابع fit یک چند جمله‌ای درجه دو که از محل نقطه ماکزیمم‌های به دست آمده عبور می‌کند، به دست می‌آید و به کمک این چند جمله‌ای تغییر فاز به وجود آمده در اطلاعات تصویر ناشی از اعمال جابه‌جایی دایروی جبران می‌شود. استفاده از عملگر همبستگی برای تعیین محل دقیق پراکنده‌سازهای پرقدرت این امکان را به الگوریتم ترکیبی می‌دهد تا از صحنه‌ای گسترده از هدف تصویربرداری کند. سپس مراحل بعدی روش PGA به ترتیب ذکر شده در بخش (۶)، به تصویر اعمال می‌شود. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است با چهار تکرار، خطای فاز موجود در تصویر به سمت صفر میل خواهد کرد. نکته حائز اهمیت آن است که اطلاعات خطای فاز در هر تکرار می‌بایست ذخیره شود چراکه در مرحله بعدی برای طراحی فیلتر منطبق مناسب برای فشردگی در بعد سمت به اطلاعات خطای فاز در هر تکرار نیاز می‌باشد.



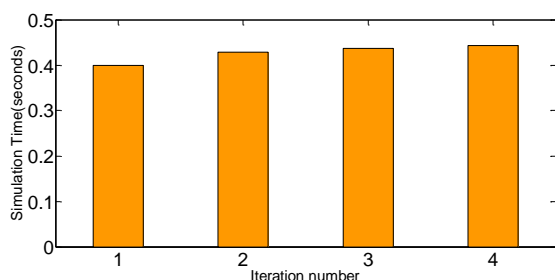
شکل ۹. مراحل اصلاح خطای فاز در چهار تکرار

شکل ۱۰ تصویر هدف با هشت پراکنده‌ساز پرقدرت به صورت داده‌های بازگشتی فشردگی در بعد برد را (در حوزه برد-داپلر) بعد از اعمال RCMC و اصلاح خطای فاز موجود توسط چهار تکرار، نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تصویر بعد از اعمال RCMC و اصلاح خطای فاز

حال اطلاعات تصویر به واحد فشردگی در بعد سمت ارسال می‌شود. در این واحد به کمک اطلاعات خطای فاز ذخیره شده در مرحله قبل، فیلتر منطبق مناسب برای فشردگی در بعد سمت طراحی شده و سپس به کمک آن تصویر در جهت سمت فشردگی می‌شود. شکل ۱۱ تصویر نهایی هدف را بعد از فشردگی در



شکل ۱۶. زمان اجرای الگوریتم در هر تکرار

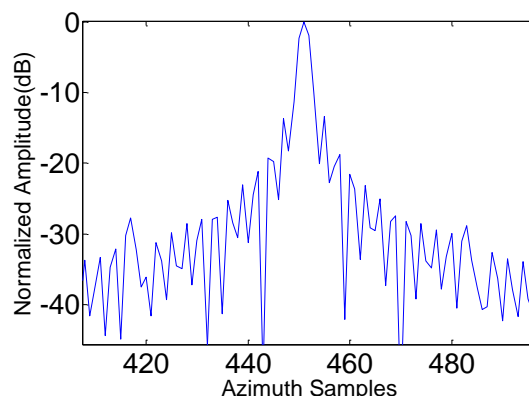
به عنوان نمونه اختلاف زمان اجرا الگوریتم بین تکرار ۱ و ۲ چیزی حدود ۰/۰۵ ثانیه بوده که بسیار ناچیز است. این اختلاف بین تکرارهای ۲ و ۳ و ۳ و ۴ تقریباً برابر صفر می باشد. این بدان معنی است که استفاده از الگوریتم خود کانونی مشتق فاز با چهار تکرار، مشکلی از لحاظ الزامات پردازش بلادرنگ ایجاد نخواهد کرد.

## ۷. نتیجه گیری

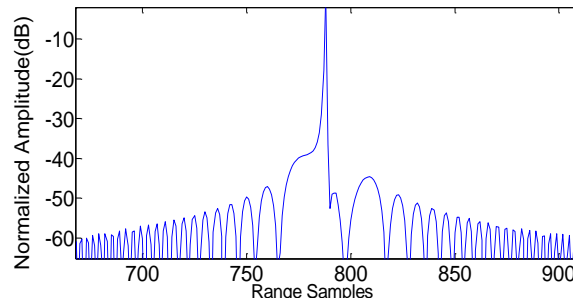
در بسیاری از مقالات با فرض دانستن دقیق مسیر الگوریتم‌هایی را جهت تشکیل تصویر به صورت دقیق با لحاظ کردن توزیع بین برد و سمت ملاحظه می کنیم ولی سیستم INS خود دارای خطای اندازه گیری است. از طرفی حساسیت نسبت به تغییرات سرعت در SAR جلونگر بیشتر است بنابراین امکان پیاده سازی الگوریتم‌های تشکیل تصویر دقیق برای SAR با حرکت پرتابه ای که به ناحیه تصویربرداری نزدیک می شود عملاً وجود ندارد و از روش PGA برای شناسایی باقیمانده خطاهای حرکتی پس از اصلاح اولیه توسط اطلاعات INS و الگوریتم‌های تخمین فرکانس مرکزی داپلر [۱] استفاده می شود. از طرفی بعضی از خطاهای فرکانس بالاتر مربوط به خطاهای انتشار در محیط می باشد که روش PGA آن‌ها را شناسایی و حذف می کند.

در این مقاله با توجه به ویژگی‌های حرکتی رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای، با به کارگیری الگوریتم RDA و روش PGA به اخذ تصویر در یک رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه ای پرداخته شد. فرایند مذکور ترکیب الگوریتم پردازشی RDA با روش PGA می باشد. ویژگی بارز این روش پردازشی آن است که برای جبران سازی حرکت، اصلاح حرکت برد و کاهش انواع خطاهای فاز موجود نیازی به اطلاعات حاصل از سامانه های ناوبری نداشته و خود قادر به تخمین شتاب و سرعت حرکت سکوی راداری بوده و خطای فاز موجود در داده بازگشتی را به سمت صفر میل می دهد. مزیت دیگر این الگوریتم، بهبود و ارتقای روش PGA در مرحله انتخاب پراکنده سازهای پر قدرت به کمک عملگر همبستگی می باشد. ویژگی اخیر امکان

همان طور که ملاحظه می شود با تصحیح خطای فاز، تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی بسیار واضح تر و با کیفیت تر از تصویر حاصل از الگوریتم برد- داپلر بوده که این موضوع کارایی الگوریتم ترکیبی را ثابت می کند. نمودار لگاریتمی<sup>۱</sup> PSLR تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی به ترتیب در بعد سمت و برد برای یک هدف نقطه ای در شکل (۱۵- ۱۴) و مقادیر لگاریتمی آن در جدول ۴ آمده است.



شکل ۱۴. PSLR تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی در بعد سمت برای یک هدف نقطه ای



شکل ۱۵. PSLR تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی در بعد برد برای یک هدف نقطه ای

جدول ۴. مقادیر PSLR تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی در بعد سمت و برد برای یک هدف نقطه ای

نوع هدف	PSLR در بعد سمت (dB)	PSLR در بعد برد (dB)
نقطه ای	-۱۳/۳	-۳۰

در پایان زمان اجرای الگوریتم ترکیبی به ازای هر تکرار در شکل ۱۶ آمده است. همان طور که ملاحظه می شود زمان اجرا از یک تکرار تا تکرار بعدی ناچیز است.

<sup>۱</sup>Peak Side Lobe Ratio

- [13] D. Blacknell and S. Quegan, "SAR Motion Compensation Using Autofocus," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no. 2, pp. 253-275, 1991.
- [14] P. Samczynski and K. Krzysztof, "Concept of the Coherent Autofocus Map-Drift Technique," *IEEE International Radar Symposium (IRS)*, 2006.
- [15] D. Blacknell, A. Blake, C. Oliver, and R. White, "A Comparison of SAR Multilook Registration and Contrast Optimisation Autofocus Algorithms Applied to Real SAR Data," *International Conference Radar*, pp. 363-366, 1992.
- [16] C. A. Snarski, "Rank one Phase Error Estimation for Range-Doppler Imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 676-688, 1996.
- [17] D. Wahl, P. Eichel, D. Ghiglia, and C. Jakowatz Jr, "Phase Gradient Autofocus-a Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, 1994.
- [18] T. Qinyan and Y. Song, "An Auto-Focus Algorithm for Missile-Borne SAR," *IEEE Microwave Conference, China-Japan Joint*, pp. 253-257, 2008.
- [19] X. Mao, D. Zhu, and Z. Zhu, "Autofocus Correction of Azimuth Phase Error and Residual Range Cell Migration in Spotlight SAR Polar Format Imagery," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, issue 4, pp. 2693-2706, 2013.
- [20] F. Tuo, M. Gao, and Y. He, "An Improved Scatter Selection Method for Phase Gradient Autofocus Algorithm in SAR/ISAR Autofocus," *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, pp. 1054-1057, 2003.
- [21] M. Nouri Parkestanti, M. Kazerooni, H. Heidar, "The Range Doppler Algorithm for Synthetic Aperture Radar moving on a Ballistic Trajectory," *Journal of Radar*, vol. 2, no. 3, pp. 37-48, 2014. (in Persian).
- [22] M. Hajipour, M. Modarres-Hashemi, "Improving Motion Compensation in Synthetic Aperture Radar Using Differential Error," *Journal of Radar*, vol. 1, no. 1, pp. 1-13, 2013. (in Persian).

اخذ تصویر از یک صحنه گسترده از هدف را به سهولت فراهم می‌آورد. انتخاب پراکنده سازهای پر قدرت به کمک عملگر همبستگی در مرحله اول روش PGA برای اولین بار برای تشکیل تصویر در یک رادار روزنه مصنوعی SAR با حرکت پرتابه‌ای به کار گرفته شد و ملاحظه گردید که الگوریتم ترکیبی ارائه شده قادر به تصحیح خطای فاز موجود در تصویر اولیه بوده و هم چنین با استفاده از عملگر همبستگی می‌تواند از هدفی گسترده تصویربرداری نماید.

مقادیر PSLR تصویر حاصل از الگوریتم ترکیبی در بعد سمت و برد برای یک هدف نقطه‌ای، در جدول ۴ آمده است.

## ۸. مراجع

- [1] I. G. Cumming and F. H.-C. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation," Artech House, 2005.
- [2] J. C. Curlander and R. N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar," John Wiley & Sons, 1991.
- [3] C. V. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, "Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: a Signal Processing Approach," Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, 1996.
- [4] P. Zhou, Y. Xu, Y. Li, and M. Xing, "Design of the Simulation and Assessment Software of Missile-Borne SAR Imaging System," *International Conference on Multimedia Technology (ICMT)*, IEEE, 2010.
- [5] Z. Liu and Y. Lv, "Research on Imaging Algorithm for Diving Missile-Borne SAR Based on a Curve Trajectory," *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, pp. 255-259, 2012.
- [6] W. Zhen, H. Xiaodong, and T. Bin, "Imaging Algorithm of Missile-borne SAR in Diving and Squint Mode," *Journal of Data Acquisition & Processing*, vol. 4, pp. 328-332, 2013.
- [7] Y. Liu, M. Xing, G. Sun, X. Lv, Z. Bao, W. Hong, and Y. Wu, "Echo Model Analyses and Imaging Algorithm for High-Resolution SAR on High-Speed Platform," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 3, pp. 933-950, 2012.
- [8] X. Huaying, Z. Hongzhong, and F. Qiang, "Taylor Expansion and Its Application in Missile-Borne SAR Imaging," *2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, pp. 426-430, 2009.
- [9] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing," Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [10] D. C. Griffith, "Phase Error Compensation Technique for Improved Synthetic Aperture Radar Performance," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 18, no. 3, pp. 358-364, 1997.
- [11] K. V. Chet, T. S. Lim, and H. T. Chuah, "A Comparison of Autofocus Algorithms for SAR Imagery," *Proc. of the Progress In Electromagnetics Research Symp. (PIERS)* pp. 16-19, 2005.
- [12] A. W. Doerry, "Autofocus Correction of Excessive Migration in Synthetic Aperture Radar Images," *United States, Department of Energy*, 2004.

---

## **Combination of RDA with PGA Method to Appropriate Image Formation on SAR with Ballistic Motion**

**M. Kazerooni\*, M. Khodaei**

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 05/11/2014, Accepted: 12/09/2016)

### **Abstract**

One of the main concerns of processing algorithms used in synthetic aperture radar (SAR) with a ballistic motion is the compensation of all phase errors in the data received from the target to achieve a clear picture of the target. In this article, by using Range Doppler Algorithm and Phase-Gradient Auto focus algorithm, imagery in one SAR with a ballistic motion is considered according to the geometry of SAR with a ballistic motion. This process is a combination of Range-Doppler processing algorithm and phase-gradient auto focus algorithm. The significant characteristic of this method is that it does not need to collect information from navigation systems for motion compensation and any kind of phase error decreasing. Furthermore, this algorithm can estimate speed and acceleration of SAR motion, and, thus, the phase error existing in received data will be tending to zero. The innovation made in this article is to improve phase-gradient auto focus Algorithm in choosing the prominent scatterer stage by the correlation operator. Recent characteristic provides the possibility of imagery from a wide scene from the target.

**Keywords:** Range Doppler Algorithm, Phase-Gradient Auto Focus Algorithm, Ballistic SAR

---

\* Corresponding author E-mail: Kazerooni@mut.ac.ir