

الگوریتم برد- داپلر در رادار روزنه مصنوعی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک

محمد نوری پرکستانی^{۱*}، مرتضی کازرونی^۲، حمید حیدر^۳

۱- کارشناس ارشد ۲- استادیار ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۳/۰۳/۰۵، پذیرش: ۹۳/۰۸/۰۳)

چکیده

در این مقاله، الگوریتم برد-داپلر (RDA) برای رادار روزنه مصنوعی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک ارائه شده است. حرکت شتابدار در سه جهت محور مختصات و مسیر پروازی غیر یکنواخت موجب عدم کارایی الگوریتم‌های تصویربرداری مرسوم گردیده است. بنابراین، الگوریتم RDA ارائه شده، باید با پارامترهای سرعت و شتاب بالا سازگار باشد. بر مبنای رابطه تحلیلی طیف سیگنال دریافتی، الگوریتم RDA با توجه به مسیر پروازی بالستیک پایه‌ریزی شد. جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی برای هدف تک‌نقطه‌ای، تصویر SAR با توجه به مسیر پروازی بالستیک شبیه‌سازی و پارامترهای کیفیت آن محاسبه گردید. جهت بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی برای اهداف بزرگ، با در نظر گرفتن هدف پنج‌نقطه‌ای و هفده‌نقطه‌ای، تصویر SAR استخراج شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، علی‌رغم مسیر پروازی بالستیک و شتاب در سه جهت محور مختصات، الگوریتم پیشنهادی، قادر به استخراج تصویر راداری است.

واژگان کلیدی

الگوریتم برد- داپلر (RDA)، رادار روزنه مصنوعی، شتاب در سه جهت، مسیر پروازی بالستیک، طیف سیگنال.

۱. مقدمه

در [۲]، طیف دوبعدی تحلیلی با استفاده از قضیه فاز ایستادن^۳ و با کمک تبدیل فوریه در راستای برد و سمت به‌دست آمده است. اما این روش، جامع نبوده و با توجه به تغییر برد مایل^۴، تغییر می‌کند. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی انجام شده در [۲]، تنها شتاب در جهت محور zها در نظر گرفته شده و استفاده از این روش برای مسیر پروازی بالستیک با شتاب در سه جهت محور مختصات به دلیل استفاده از تقریب، با خطای بسیار زیادی همراه است. در [۴] طیف دوبعدی استخراج و الگوریتم تصویربرداری بر مبنای آن پایه‌ریزی گردیده، اما این روش تنها برای هدف تک‌نقطه‌ای انجام شده است. در [۵] تغییرات برد مایل و الگوریتم تصویربرداری ارائه شده است.

در [۶]، الگوریتم برد- داپلر (RDA)^۵ و در [۷]، الگوریتم CSA^۶ ارائه شده، اما این الگوریتم‌ها نیازمند درون‌یابی هستند. همچنین در [۱۰]، الگوریتم تصویربرداری برای مسیر پروازی منحنی با سرعت و شتاب در سه جهت ارائه شده است که در این الگوریتم پس از انجام جبران‌سازی مسیر، طیف دوبعدی استخراج و سپس بر مبنای این طیف، الگوریتم تصویربرداری پایه‌ریزی گردیده است، اما این الگوریتم

امروزه رادارهای روزنه مصنوعی^۱ که بر روی مسیر پروازی غیر یکنواخت، مانند مسیرهای پروازی بالستیک و کروز حرکت می‌کنند، در شاخه فناوری روزنه مصنوعی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این رادارها دارای قابلیت‌هایی همچون برد بسیار زیاد، کاربرد در تمام شرایط آب و هوایی، محدوده پوشش وسیع، نفوذ به بعضی از انواع پناهگاه‌های استتار شده و قدرت تفکیک‌پذیری بسیار بالا هستند [۱، ۲، ۳]. با وجود مزایای اشاره شده، حرکت بسیار سریع و مسیر پروازی غیر یکنواخت سکوی راداری، استفاده از الگوریتم‌های مرسوم SAR را با مشکلات بسیار زیادی مواجه کرده است [۱، ۳]. از آنجایی که این رادارهای تصویربرداری، سرعت بالا و وضعیت حرکتی پیچیده‌ای دارند، بنابراین، الگوریتم تشکیل تصویر اختصاص داده شده، باید با پارامترهای سرعت و شتاب سکوی راداری سازگار باشد [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷].

اساس پیچیدگی استفاده از الگوریتم‌های مرسوم، سختی محاسبه طیف تحلیلی دوبعدی پراکنده‌گر نقطه‌ای^۲ است [۲، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱].

³ Principal of Stationary Phase (POSP)

⁴ Slant Range

⁵ Range Doppler Algorithm (RDA)

⁶ Chirp Scaling Algorithm (CSA)

* رایانامه نویسنده پاسخگو: mohammad_nouri313@yahoo.com

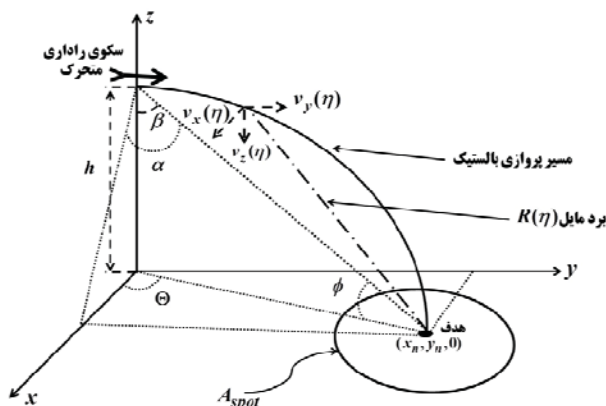
¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

² 2-D Analytical Signal Spectrum for a Point Scatter

$$R(\eta) =$$

$$\sqrt{\left(x_n - v_x \eta - \frac{1}{2} a_x \eta^2\right)^2 + \left(y_n - v_y \eta - \frac{1}{2} a_y \eta^2\right)^2 + \left(h - v_z \eta - \frac{1}{2} a_z \eta^2\right)^2} \quad (1)$$

$$s(\tau, \eta) = \rho_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c}\right) w_{az}(\eta) \times \exp\left(-j 4\pi \frac{R(\eta)}{\lambda}\right) \quad (2)$$



شکل ۱. هندسه SAR با سکوی راداری متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک با شتاب ثابت در سه جهت X, Y, Z

۳. الگوریتم برد- داپلر در رادار روزنه مصنوعی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک

الگوریتم‌های RDA مرسوم، به‌طور معمول هیچ پردازشی در حوزه دو بعدی فرکانس (حوزه فرکانس برد f_τ و فرکانس سمت f_η) ندارند. همچنین فشردسازی ثانویه برد^۱ (SRC) اغلب در حوزه زمان سمت و به عنوان قسمتی از عملیات فشردسازی برد انجام می‌شود [۱۸]. در این مقاله بر مبنای طیف دو بعدی استخراج‌شده (پیوست ۱) و مدل هندسی ارائه‌شده در بخش قبل، الگوریتم تصویربرداری ارائه می‌گردد. برای توسعه الگوریتم RDA با توجه به طیف دوبعدی هدف نقطه‌ای، به‌صورت زیر عمل می‌شود؛ گام اول، جایگذاری $1/(f_\eta + f_\tau)$ (فرکانس کار رادار) با کمک بسط سری توانی، مطابق روابط (۳)، (۴) و (۵) در رابطه (۲۴) است. این سری‌های توانی، سریعاً همگرا می‌شوند، چون در عمل، $f_0 \gg f_\tau$ است. بنابراین، عبارت تابع فاز در رابطه (۲۴) را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) تجزیه نمود که هرکدام از عبارت‌ها در زیر توضیح داده می‌شود [۸، ۹، ۱۱].

$$\frac{1}{(f_0 + f_\tau)} = \frac{1}{f_0} \left[1 - \frac{f_\tau}{f_0} + \left(\frac{f_\tau}{f_0}\right)^2 - \left(\frac{f_\tau}{f_0}\right)^3 + \dots \right] \quad (3)$$

¹⁰ Secondary Range Compression (SRC)

صرف‌نظر از کیفیت بالای تصویر، نیازمند تصحیح هندسی^۱ است. علاوه بر موارد ذکرشده، نکته مشترک این مراجع، عدم بررسی شتاب و سرعت در سه جهت محور مختصات و در نظر نگرفتن مسیر پروازی بالستیک است.

در این مقاله، الگوریتم تصویربرداری راداری برای سکوی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک با در نظر گرفتن شتاب و سرعت در سه جهت محور مختصات ارائه می‌شود. ابتدا مدل هندسی SAR با سکوی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک ارائه می‌گردد. سپس با توجه به مدل هندسی و بر مبنای روش ارائه‌شده در [۸] و [۹]، طیف تحلیلی دوبعدی پراکنده‌گر نقطه‌ای استخراج می‌گردد. در ادامه، الگوریتم RDA پیشنهادی با توجه به طیف دوبعدی و استفاده از سری‌های توانی بیان می‌شود. سپس تصویر هدف تک‌نقطه‌ای و پارامترهای آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ارائه‌شده در مرجع [۱۰] مقایسه می‌گردد. در پایان با در نظر گرفتن هدف متشکل از چند پراکنده‌گر^۲، تصویر SAR با توجه به مسیر پروازی بالستیک و پارامترهای راداری ارائه می‌شود.

۲. مدل هندسی SAR با مسیر پروازی بالستیک

هندسه SAR با سکوی راداری متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک با حرکت شتاب ثابت در سه جهت X, Y, Z در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به طرح هندسی ارائه‌شده در شکل ۱ برد مایل به‌صورت رابطه (۱) است. مطابق شکل (۱) (v_x, v_y, v_z) سرعت در سه راستای محور مختصات، زاویه کوچکی^۳ و زاویه برخورد^۴ است [۲، ۱۰، ۱۱]. با توجه به این شکل، سکوی راداری ابتدا در ارتفاع h از سطح زمین و با سرعت اولیه (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z}) و شتاب ثابت (a_x, a_y, a_z) بر روی مسیر پروازی بالستیک در حال حرکت است. آنتن رادار، محدوده A_{spot} را با توجه به زاویه نشیب^۵ و پهنای پرتو آنتن روشن کرده است. با توجه به برد مایل $R(\eta)$ و تئوری رادار روزنه مصنوعی، سیگنال بازگشتی هدف نقطه‌ای $(x_n, y_n, 0)$ در باند پایه به‌صورت رابطه (۲) است، که در آن τ زمان سریع (زمان برد)^۶، η زمان کند (زمان سمت)^۷، λ طول موج رادار، $\rho_r(\cdot)$ پوش سیگنال بازگشتی در حوزه برد^۸ و $w_{az}(\cdot)$ پوش سیگنال بازگشتی در حوزه سمت^۹ می‌باشد که متناسب با الگوی آنتن است [۸، ۹، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶].

¹ Geometry correction

² Scatterer

³ Squint

⁴ Incidence

⁵ Grazing angle

⁶ Fast time (Range time)

⁷ Slow time (Azimuth time)

⁸ Range

⁹ Secondary Range Compression (SRC)

عبارت چهارم فاز، بیانگر تزویج برد- سمت است. این عبارت فاز مطابق رابطه (۱۰) به فرکانس برد و سمت وابسته بوده و زمانی که زاویه لوچی بالاتر، تفکیک پذیری بهتر و طول موج بزرگتر نیاز باشد، بسیار مهم و با اهمیت است. اگر این تزویج برد- سمت جبران سازی نشود، موجب از دست رفتن تفکیک پذیری به ویژه در جهت برد خواهد شد.

$$\begin{aligned} \phi_{src}(f_\tau, f_\eta) \approx & 2\pi \left\{ \frac{c}{4k_2 f_0} \left[\left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right] f_\eta^2 \right. \\ & + \frac{k_3}{8k_2^3} \left[3k_1 \left(\frac{c}{f_0} \right) \left(\left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right) f_\eta^2 \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{c}{f_0} \right)^2 \left(3 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - 4 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right) f_\eta^3 \right] \right. \\ & + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64} \left[6k_1^2 \left(\frac{c}{f_0} \right) \left(\left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right) f_\eta^3 \right. \\ & + 4k_1 \left(\frac{c}{f_0} \right)^2 \left(3 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - 4 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right) f_\eta^3 \\ & \left. \left. + \left(\frac{c}{f_0} \right)^3 \left(6 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - 10 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 \right) f_\eta^4 \right] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

عبارت آخر، بیانگر فاز باقیمانده بوده و مطابق رابطه (۱۱) است. این عبارت به فرکانس برد و سمت وابستگی ندارد و در قسمت پایانی انجام می شود.

$$\begin{aligned} \phi_{res} \approx & 2\pi \left\{ -\frac{f_0 R_{cen}}{c} + \frac{1}{4k_2} \left[\frac{k_1^2}{c} f_0 \right] + \frac{k_3}{8k_2^3} \left[\frac{k_1^3}{c} f_0 \right] \right. \\ & \left. + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[\frac{k_1^4}{c} f_0 \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

اکنون بر مبنای موارد اشاره شده و بسط طیف دوبعدی سیگنال بازگشتی، الگوریتم RDA ارائه می گردد. شکل ۲ الگوریتم برد- داپلر (RDA) را در رادار تصویربردار با سکوی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک نشان می دهد که در آن از چهار تبدیل فوریه^۱ (FT) استفاده شده است. مراحل پردازشی مشابه RDA مرسوم است با این تفاوت که SRC در حوزه دوبعدی فرکانس اعمال می شود. علاوه بر آن، عملیات های SRC، تصحیح انحنای سلول برد^۲ (RCMC) و فشرده سازی برد^۳ و سمت^۴ با توجه به طیف سیگنال جدید محاسبه و

$$\frac{1}{(f_0 + f_\tau)^2} = \frac{1}{f_0^2} \left[1 - \frac{2f_\tau}{f_0} + 3 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - 4 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{(f_0 + f_\tau)^3} = \frac{1}{f_0^3} \left[1 - \frac{3f_\tau}{f_0} + 6 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^2 - 10 \left(\frac{f_\tau}{f_0} \right)^3 + \dots \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \phi(f_\tau, f_\eta) \approx & \phi_{rg}(f_\tau) + \phi_{az}(f_\eta) \\ & + \phi_{rcm}(f_\tau, f_\eta) + \phi_{src}(f_\tau, f_\eta) + \phi_{res} \end{aligned} \quad (6)$$

عبارت اول فاز، بیانگر مدولاسیون برد است. این عبارت تنها به فرکانس برد وابسته است. بنابراین، این عبارت می تواند از عبارت های دیگر جدا شود. فشرده سازی برد بعد از تبدیل فوریه در حوزه برد انجام می شود. این عبارت فاز مطابق رابطه (۷) است.

$$\phi_{rg}(f_\tau) = -\frac{\pi f_\tau^2}{K_r} \quad (7)$$

عبارت دوم فاز، بیانگر مدولاسیون سمت بوده که مطابق رابطه (۸) این عبارت تنها به فرکانس سمت وابسته است و برای حذف آن از فیلتر منطبق سمت استفاده می گردد. فشرده سازی سمت در حوزه برد- داپلر انجام می شود. (Rcen, k1, k2, k3, k4 ضرایب سری تیلور برد مایل و سرعت نور می باشند).

$$\begin{aligned} \phi_{az}(f_\eta) \approx & 2\pi \left\{ \frac{1}{4k_2} \left[2k_1 f_\eta + \frac{c}{f_0} f_\eta^2 \right] \right. \\ & + \frac{k_3}{8k_2^3} \left[3k_1^2 f_\eta + \frac{3k_1 c}{f_0} f_\eta^2 + \frac{c^2}{f_0^2} f_\eta^3 \right] \\ & \left. + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[4k_1^3 f_\eta + \frac{6k_1^2 c}{f_0} f_\eta^2 + \frac{4k_1 c^2}{f_0^2} f_\eta^3 + \frac{c^3}{f_0^3} f_\eta^4 \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

عبارت سوم فاز، به طور خطی وابسته به فرکانس برد بوده و بیانگر عبارت انحنای سلول برد است که مطابق رابطه (۹) ارائه می شود. دقت کنید که عبارت داخل پرانتز بزرگ، بیانگر جابجایی انحنای برد است. چون ضرایب سری تیلور به برد مایل وابسته اند، این جبران سازی در حوزه برد- داپلر جبران سازی می شود.

$$\begin{aligned} \phi_{rcm}(f_\tau, f_\eta) \approx & 2\pi f_\tau \left\{ -\frac{R_{cen}}{c} + \frac{1}{4k_2} \left[\frac{k_1^2}{c} - \frac{c}{f_0} f_\eta^2 \right] \right. \\ & + \frac{k_3}{8k_2^3} \left[\frac{k_1^3}{c} - \frac{3k_1 c}{f_0^2} f_\eta^2 - \frac{2c^2}{f_0^3} f_\eta^3 \right] \\ & \left. + \frac{9k_3^2 - 4k_2 k_4}{64k_2^5} \left[\frac{k_1^4}{c} - \frac{6k_1^2 c}{f_0^2} f_\eta^2 - \frac{8k_1 c^2}{f_0^3} f_\eta^3 - \frac{3c^3}{f_0^4} f_\eta^4 \right] \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

¹ Fourier Transform (FT)

² Range Cell Migration Correction (RCMC)

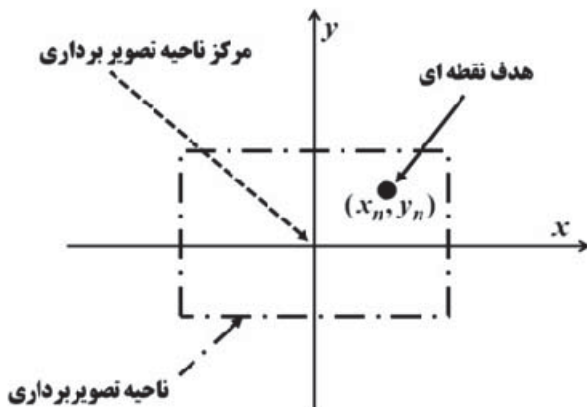
³ Range Compression

⁴ Azimuth Compression

راداری جدول ۱ محاسبه می‌گردد. همچنین در جدول ۱ منظور از عبارت CPI^۱ زمان مشاهده^۲ است.

جدول ۱. پارامترهای رادار تصویربردار با مسیر پروازی بالستیک شتابدار

پارامترهای سامانه راداری			
طول آنتن	$0.5m$	v_{0x}	$1500 m/s$
فرکانس حامل	$10 GHz$	v_{0y}	$60 m/s$
پهنای باند	$30 MHz$	v_{0z}	$-2500 m/s$
پهنای پالس	$20 \mu s$	a_x	$-5 m/s^2$
نرخ تکرار پالس	$1400 Hz$	a_y	$1 m/s^2$
فرکانس نمونه‌برداری	$100 MHz$	a_z	$-10 m/s^2$
ارتفاع در $t=0$ (h)	$4 \Delta km$	CPI	$1 sec$



شکل ۳. محل هدف نقطه‌ای دلخواه (x_n, y_n) نسبت به مرکز ناحیه تصویربرداری با توجه به هندسه ارائه‌شده در شکل ۱

شکل (۴-الف)، تصویر SAR هدف تک‌نقطه‌ای استخراج‌شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار با استفاده از الگوریتم تصویربرداری پیشنهادی (شکل ۲) را نشان می‌دهد. در حالی که در شکل (۴-ب) تصویر استخراج‌شده با کمک الگوریتم [۱۰] بر مبنای پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۱ مشاهده می‌گردد. با مقایسه شکل (۴-الف) و (۴-ب) مشخص می‌گردد که الگوریتم [۱۰] دارای کیفیت تصویر بهتری است، اما مختصات هدف نقطه‌ای $(x_n=0, y_n=200)$ صحیح نیست، در حالی که الگوریتم پیشنهادی با وجود کیفیت پایین‌تر، مختصات هدف دقیق است. جهت بررسی، پارامترهای کیفیت تصاویر هدف نقطه‌ای در شکل ۵ دامنه برد و

اعمال می‌گردند. مطابق شکل ۲، گام‌های الگوریتم RDA در سکوی رادار متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک به صورت زیر است:

۱- ابتدا با کمک تبدیل فوریه در راستای برد و سمت، سیگنال خام راداری به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود

۲- جهت فشردگی برد و عملیات SRC، به ترتیب عبارت‌های H_{src} و H_{rg} مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) در خروجی مرحله قبل ضرب می‌گردد.

۳- در این مرحله، تبدیل فوریه معکوس در راستای برد انجام می‌شود.

۴- جهت تصحیح انحنای برد و فشردگی سمت، به ترتیب عبارت‌های H_{rcm} و H_{azc} مطابق روابط (۱۴) و (۱۵) در هم ضرب می‌گردند.

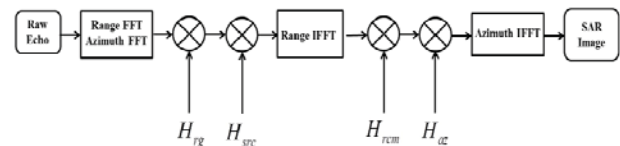
۵- اکنون در راستای سمت، تبدیل فوریه معکوس اعمال شده و پس از جبران‌سازی فاز باقیمانده، تصویر نهایی استخراج می‌شود

$$H_{rg} = \exp(-j\phi_{rg}(f_\tau)) \quad (12)$$

$$H_{src} = \exp(-j\phi_{src}(f_\tau, f_\eta)) \quad (13)$$

$$H_{rcm} = \exp(-j\phi_{rcm}(f_\tau, f_\eta)) \quad (14)$$

$$H_{azc} = \exp(-j\phi_{azc}(f_\eta)) \quad (15)$$



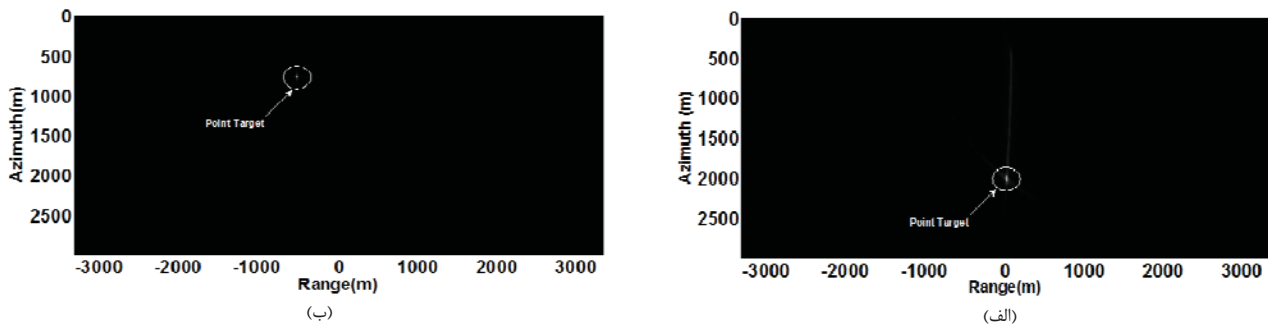
شکل ۲. بلوک دیاگرام الگوریتم RDA با سکوی راداری متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم [۱۰] مقایسه می‌گردد. در ابتدا، هدف تک‌نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای پارامترهای سامانه راداری که در جدول (۱) ارائه شده، داده‌های خام تولید می‌شود. با استفاده از الگوریتم پردازشی پیشنهادی ارائه‌شده در شکل ۲ و الگوریتم ارائه‌شده در [۱۰]، تصویر SAR در حوزه برد-سمت استخراج می‌شود. شکل ۳ محل هدف نقطه‌ای دلخواه (x_n, y_n) و ناحیه تصویربرداری را نشان می‌دهد. با فرض $(x_n=0, y_n=200)$ تصویر SAR هدف نقطه‌ای با توجه به پارامترهای

¹ Coherent Processing Interval (CPI)

² Observation time



شکل ۴. تصویر SAR هدف تک نقطه‌ای با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار، (شکل الف) تصویر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی استخراج شده و در شکل (ب) تصویر با کمک الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۰] استخراج گردیده است.

به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و شکل (۷-ب) تصویر SAR استخراج شده بر مبنای الگوریتم ارائه شده در [۱۰] ارائه شده است. همچنین در شکل (۸) تصویر SAR استخراج شده با درشت‌نمایی بالاتر برای هدف پنج نقطه‌ای، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (شکل ۸-الف) و الگوریتم ارائه شده در [۱۰] (شکل ۸-ب) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود، تصویر استخراج شده توسط الگوریتم ارائه شده در [۱۰] علاوه بر نیاز به تصحیح هندسی دارای مقداری کجی^۴ است که جهت حذف این کجی، باید تصویر در راستای محور برد و سمت برش^۵ داده شود [۹،۸] و همچنین تصویر دارای خطای افست^۶ است.

جهت بررسی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، مدل هدف با تعداد نقاط پراکنده‌گر بیشتری در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۶-ب) یک هدف با ۱۶ نقطه در گوشه‌های آن و یک نقطه در وسط آن مدل می‌گردد. در شکل (۹-الف) تصویر SAR استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای این هدف هفده نقطه‌ای، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و در شکل (۹-ب) تصویر استخراج شده، بر مبنای الگوریتم ارائه شده در [۱۰]، ارائه گردیده است.

سمت بر حسب دسیبل ارائه گردیده است. شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) به ترتیب بیانگر دامنه در برد و سمت برای تصویر استخراج شده توسط الگوریتم [۱۰] و شکل‌های (۵-ج) و (۵-د) به ترتیب نشان‌دهنده دامنه در برد و سمت برای تصویر استخراج شده توسط الگوریتم پیشنهادی هستند. در جدول ۲، جهت بررسی پارامترهای کیفیت متناسب با تصاویر هدف نقطه‌ای در برد و سمت، پارامترهای PSLR^۱ (نسبت بزرگترین لوب فرعی به لوب اصلی) و ISLR^۲ (بیانگر مجموع انرژی موجود در لوب‌های کناری به لوب اصلی) محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی نسبت به مقدار نوعی^۳ و الگوریتم [۱۰] دارای پارامترهای کیفیت بسیار پایین‌تری است، اما همان‌طور که اشاره شد تصویر استخراج شده توسط الگوریتم ارائه شده در [۱۰] نیازمند تصحیح هندسی است. بنابراین با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار، استخراج هدف با پارامترهای ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی مطلوب است. همچنین در شکل‌های (۵-ج) و (۵-د) مشاهده می‌شود که مقدار کیفیت تصویر، در سمت نسبت به برد کمتر است. دلیل آن، تاثیر بسیار زیاد پارامترهای مسیر پروازی بر مولفه‌های سمت است.

جهت بررسی اهداف بزرگ، مدل نقطه‌ای از هدف در نظر گرفته می‌شود. شکل (۶-الف) مدل یک هدف را با ۴ نقطه در گوشه‌های آن و یک نقطه در وسط و شکل (۶-ب) مدل هدف با هفده نقطه را نشان می‌دهد. در شکل (۷-الف) تصویر SAR استخراج شده با توجه

جدول ۲. پارامتر کیفیت تصویر SAR هدف تک نقطه‌ای استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار و مقایسه آن با مقدار نوعی

الگوریتم	Range		Azimuth		توضیحات
	PSLR (dB)	ISLR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	
الگوریتم پیشنهادی	-۱۲/۲	-۷/۸۵	-۳/۹۵	-۴/۵۳	عدم نیاز به تصحیح هندسی
الگوریتم مرجع [۱۰]	-۱۵/۵۶	-۹/۲۷	-۱۳/۲۸	-۱۰/۰۲	نیاز به تصحیح هندسی
الگوریتم RDA مرسوم [۱۳]	-۲۰ الی -۱۳/۳	-۱۷	-۲۰ الی -۱۳/۳	-۱۷	-

⁴ Skew

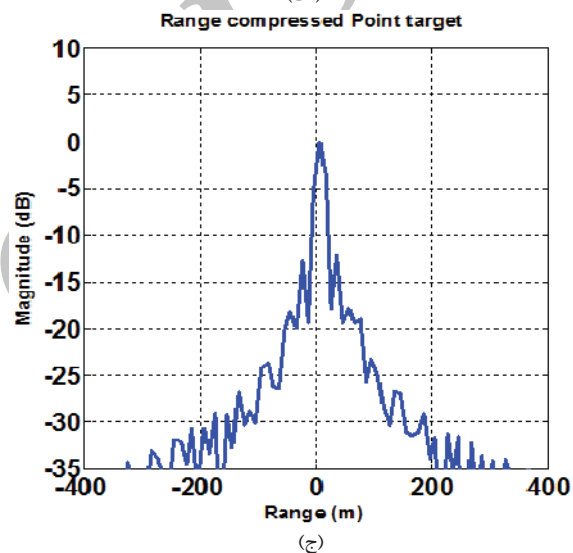
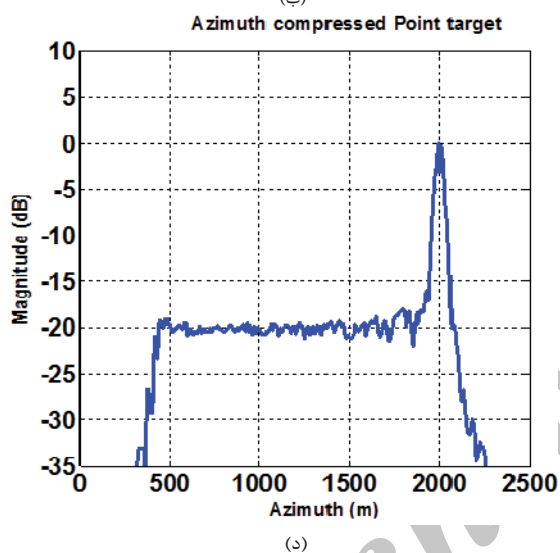
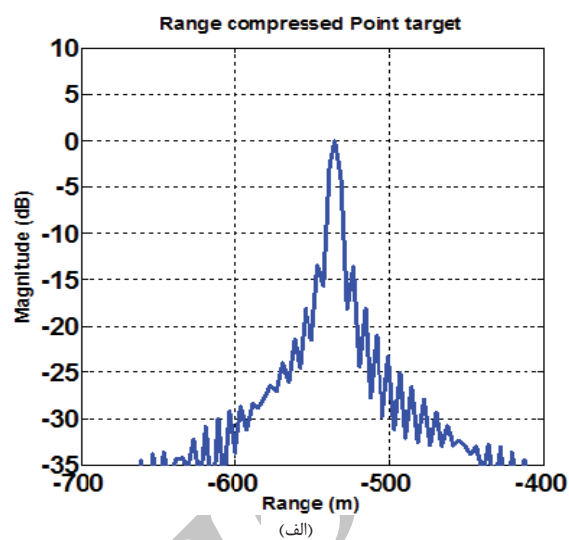
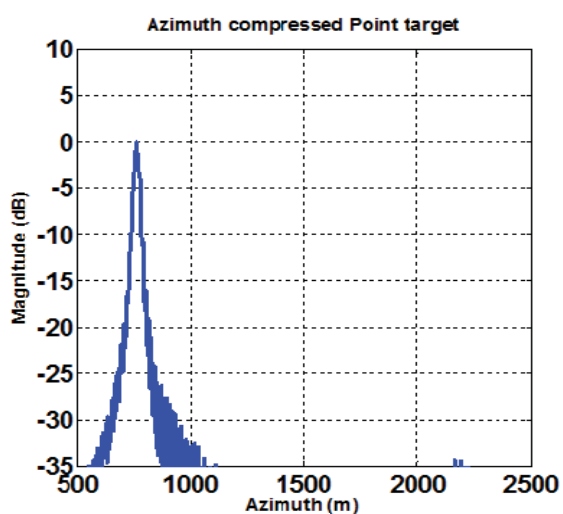
⁵ Shearing

⁶ Offset

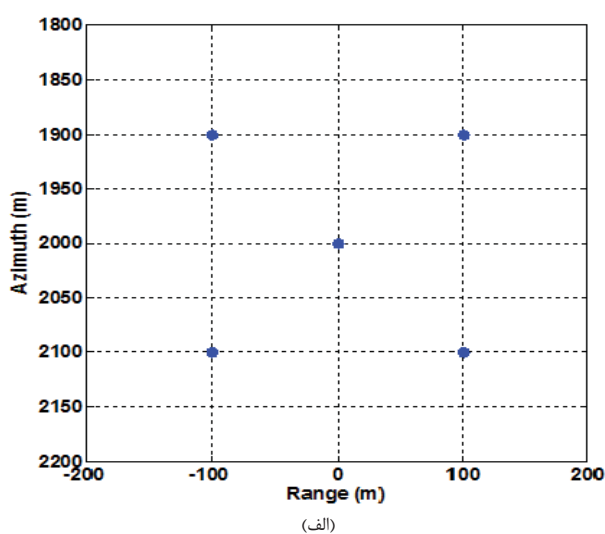
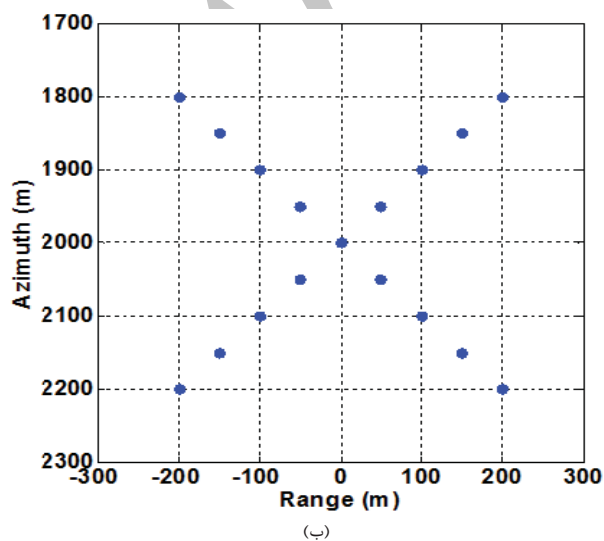
¹ peak side lobe ratio (PSLR)

² integration side lobe ratio (ISLR)

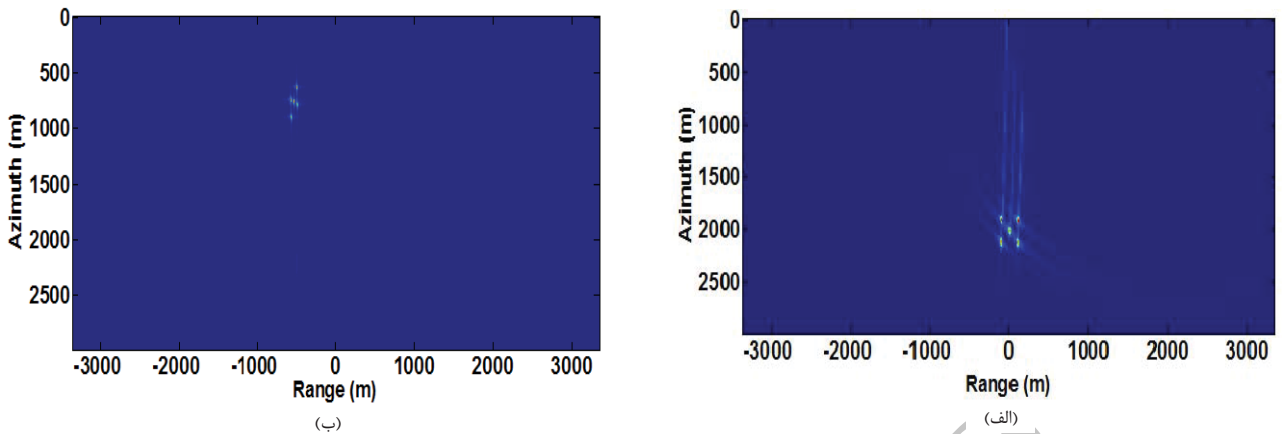
³ Typical



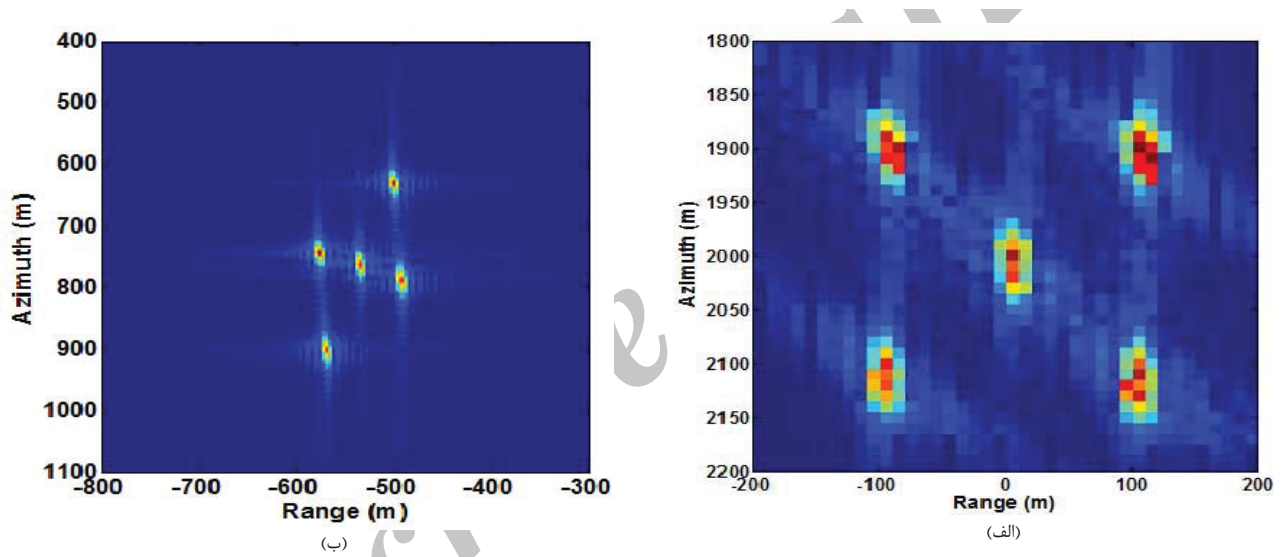
شکل ۵. دامنه هدف نقطه‌ای استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار بر حسب دسیبل با استفاده از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۰] (در برد (الف) و در سمت (ب)) و الگوریتم پیشنهادی (در برد (ج) و در سمت (د))



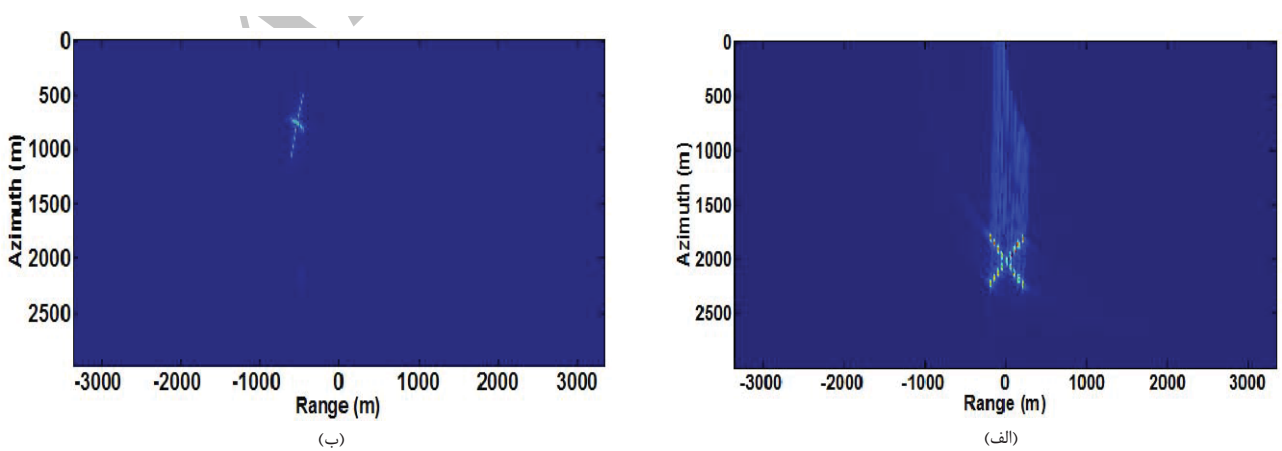
شکل ۶. مدل نقطه‌ای هدف (هدف پنج نقطه‌ای (الف) و هدف هفده نقطه‌ای (ب))



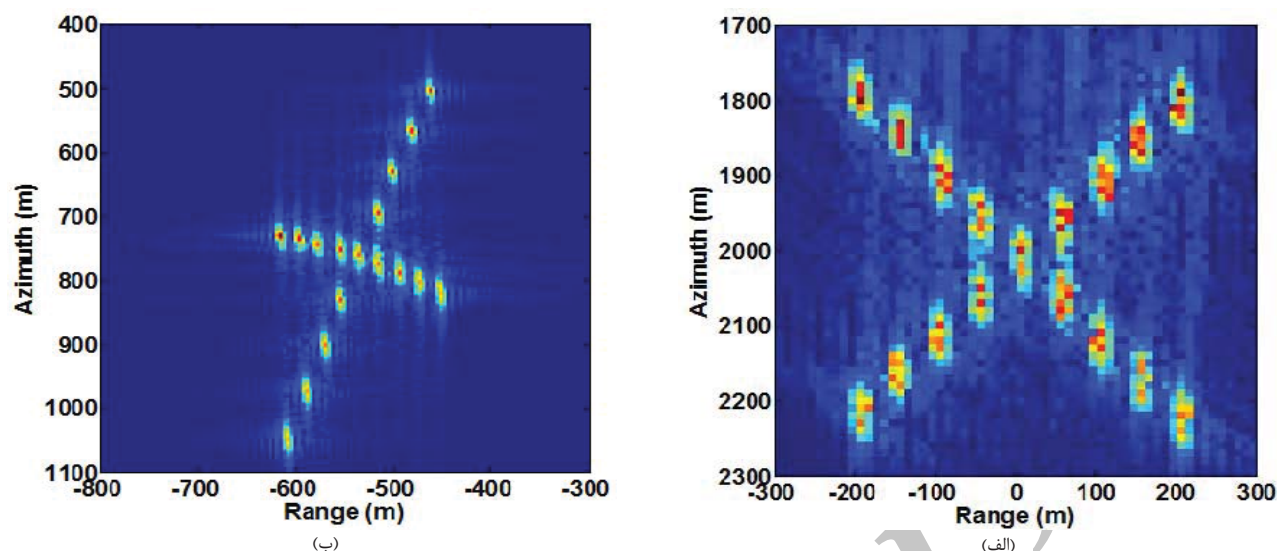
شکل ۷. تصویر SAR استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای، (الف) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و (ب) بر مبنای الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۰]



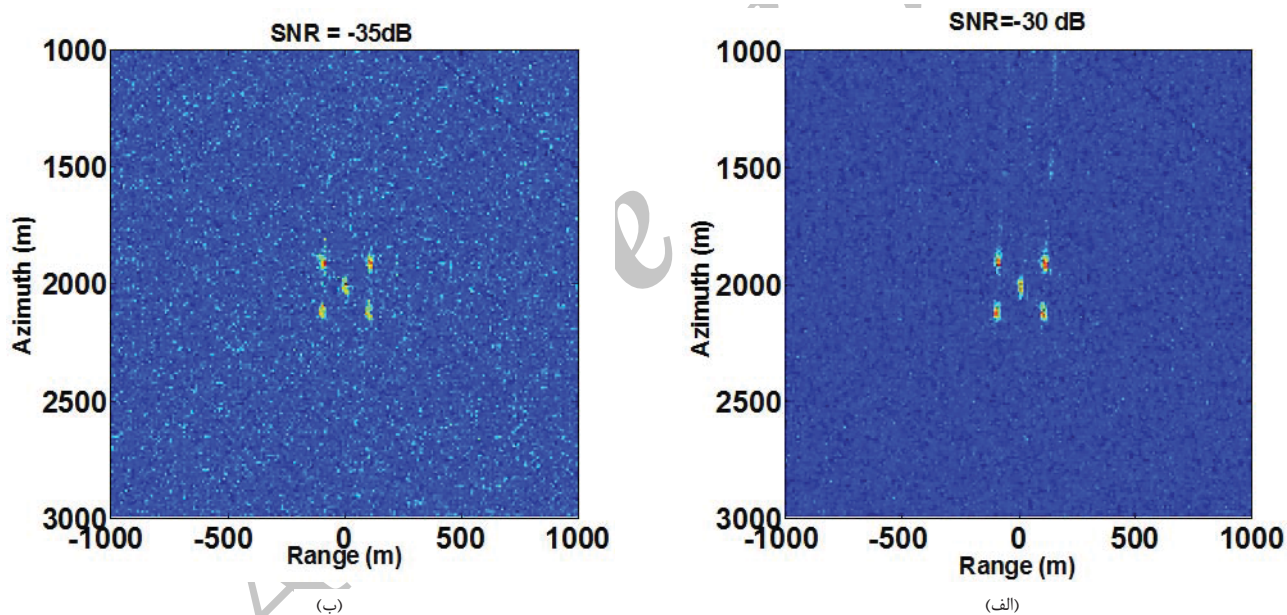
شکل ۸. تصویر SAR استخراج شده با درشتنمایی بالاتر با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای، (الف) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و (ب) بر مبنای الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۰]



شکل ۹. تصویر SAR استخراج شده بالاتر با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای، (الف) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و (ب) بر مبنای الگوریتم ارائه شده در مرجع [۱۰]



شکل ۱۰. تصویر SAR استخراج شده با درشتنمایی بالاتر با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف هفده نقطه‌ای، (الف) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و (ب) بر مبنای الگوریتم ارائه شده در [۱۰]



شکل ۱۱. تصویر SAR استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای در حضور نویز با SNRهای ۳۰- (الف) و ۳۵- (ب) دسیبل

از مولفه‌های تاثیرگذار بر کیفیت تصویر بوده، از این رو جهت بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی و بهره‌برداری آن در مواجهه با نویز، داده‌های خام راداری را به نویز با مقدار SNR معلوم آغشته کرده و در نهایت، تصویر خروجی مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصویر SAR استخراج شده با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف پنج نقطه‌ای که داده‌های خام راداری قبل از اعمال الگوریتم پیشنهادی به نویز با SNRهای ۳۰- و ۳۵- دسیبل آغشته شده‌اند، نشان داده شده است.

در شکل ۱۰، تصویر SAR استخراج شده با درشتنمایی بالاتر با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار برای هدف هفده نقطه‌ای، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی (شکل ۱۰-الف)) و بر مبنای الگوریتم ارائه شده در [۱۰] (شکل ۱۰-ب)) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰-ب) مشاهده می‌شود، مقدار کجی مشهودتر است.

اکنون به بررسی بهره‌برداری الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. با توجه به پارامترهای ارائه شده در جدول ۱، چون فاصله سامانه تصویربردار راداری تا هدف زیاد است، نویز سفید گوسی، یکی

در مواجهه با نویز سفید گوسی، تصویر SAR با توجه به مسیر پروازی بالستیک شتابدار در حضور نویز با مقادیر $SNR = -30\text{dB}$ و $SNR = -35\text{dB}$ برای هدف پنج نقطه‌ای و هفده نقطه‌ای استخراج گردید.

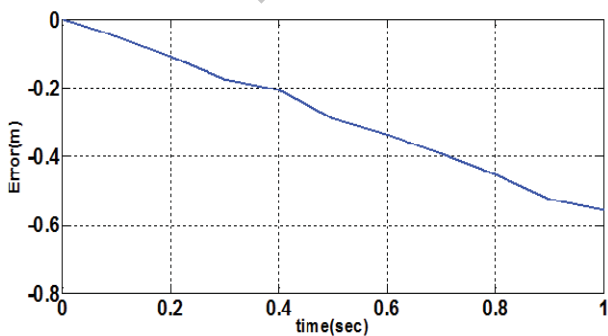
پیوست ۱. (استخراج طیف دوبعدی سیگنال):

گام کلیدی و مهم جهت پایه‌ریزی الگوریتم RDA در رادار روزنه مصنوعی متحرک بر روی مسیر پروازی بالستیک، استخراج طیف تحلیلی سیگنال بازگشتی است [۲، ۸، ۹]. در این مقاله جهت استخراج طیف دوبعدی سیگنال، از روش ارائه‌شده در مرجع [۸] استفاده شده است. زیرا این روش بسیار کامل و جامع جهت محاسبه و استخراج طیف تحلیلی دوبعدی است [۸، ۹، ۱۰]. ابتدا با کمک بسط سری تیلور، برد مایل را به صورت رابطه (۱۶) بیان می‌نماییم، که در آن R_{cen} ، k_1 ، k_2 ، k_3 و k_4 ضرایب سری تیلور می‌باشند. این ضرایب به مسیر پروازی (همانند سرعت و شتاب) وابسته هستند [۸]. در جدول ۳ مقادیر ضرایب سری تیلور محاسبه‌شده بر مبنای پارامترهای مسیر پروازی بالستیک ارائه‌شده در جدول ۱ محاسبه گردیده است. همچنین در شکل ۱۳ مقدار خطای برد مایل واقعی و برد مایل محاسبه‌شده با استفاده از بسط سری تیلور با توجه به پارامترهای مسیر پروازی بالستیک جدول ۱ ارائه شده است.

$$R(\eta) = R_{cen} + k_1\eta + k_2\eta^2 + k_3\eta^3 + k_4\eta^4 + \dots \quad (16)$$

جدول ۳. ضرایب سری تیلور محاسبه‌شده بر مبنای پارامترهای مسیر

ضریب تیلور	مقدار	توضیحات
R_{cen}	670.95 m	وابسته به فاصله نقطه شروع تصویربرداری تا مرکز ناحیه تصویربرداری
k_1	$-2727/2\text{ m/s}$	وابسته به سرعت اولیه
k_2	$-3/8301\text{ m/s}^2$	وابسته به شتاب
k_3	-0.1016 m/s^3	-
k_4	$\cdot\text{ m/s}^4$	-



شکل ۱۳. اختلاف برد مایل واقعی و برد مایل محاسبه‌شده توسط ضرایب سری تیلور به ازای زمان مشاهده

از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که بهره پردازشی الگوریتم پیشنهادی در حدود ۳۵ دسیبل است، زیرا در صورتی که داده‌های خام راداری، دارای نویز سفید گوسی با مقدار SNR نزدیک ۳۵- دسیبل باشند، پس از استخراج تصویر توسط الگوریتم پیشنهادی، تصویر همچنان واضح است. این مقدار، بهره پردازشی ایمنی الگوریتم پیشنهادی در مقابل نویز را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، همان‌طور که اشاره گردید، کیفیت تصویر در راستای سمت نسبت به برد و مقدار نوعی تعریف‌شده برای تصاویر SAR کمتر است، زیرا پارامترهای کیفیت به‌ویژه در راستای سمت وابسته به مسیر پروازی، هستند. از سوی دیگر با توجه به شکل‌های ۶ و ۸ و دقت الگوریتم در استخراج تصویر SAR با توجه به مدل هدف و مسیر پروازی گویای قابلیت بسیار بالای الگوریتم پیشنهادی در استخراج تصویر SAR است. همچنین با توجه به تعداد زیاد پراکنده‌گرهای نقطه‌ای مانند شکل ۸ که شامل هدف هفده نقطه‌ای است و تصویر SAR استخراج‌شده، مشاهده می‌گردد که الگوریتم پیشنهادی قابلیت بسیار بالایی در استخراج تصویر SAR اهداف بزرگ مثل کشتی‌ها و تاسیسات بزرگ مستقر بر روی زمین دارد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم تصویربرداری راداری RDA با در نظر گرفتن مسیر پروازی بالستیک شتابدار بررسی شده است. به دلیل سرعت و شتاب بسیار بالا در سه جهت محور مختصات، استفاده از الگوریتم‌های برد- داپلر مرسوم بسیار مشکل است. از این رو در این مقاله بر مبنای مسیر پروازی بالستیک و طیف دوبعدی سیگنال بازگشتی، الگوریتم RDA پایه‌ریزی گردید. نتایج شبیه‌سازی برای هدف تک‌نقطه‌ای ارائه و پارامترهای کیفیت محاسبه شد. الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های RDA مرسوم که در آن سکوی راداری متحرک بر روی مسیر یکنواخت است-به‌ویژه در حوزه سمت-کیفیت تصویر پایین‌تری دارد. همچنین در مقایسه با الگوریتم مشابه، گرچه پارامترهای کیفیت الگوریتم پیشنهادی بسیار پایین هستند اما الگوریتم پیشنهادی بدون نیاز به تصحیح هندسی تصویر با وضوح خوبی ارائه می‌دهد. البته دلیل کیفیت پایین با توجه به پارامترهای مسیر پروازی و تقریب‌های استفاده‌شده در سری‌های توانی قابل توجه است. جهت ارزیابی قابلیت الگوریتم ارائه‌شده، برای هدف چند نقطه‌ای متشکل از پنج و هفده پراکنده‌گر نقطه‌ای، داده‌های خام متناسب با هدف، پارامترهای راداری و مسیر پروازی بالستیک تولید شده و در نهایت، تصویر SAR با کمک الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم مشابه استخراج و مقایسه گردید. نتایج ارائه‌شده نشان‌دهنده وضوح قابل قبول تصاویر استخراج‌شده است. در ادامه جهت ارزیابی قابلیت و میزان بهره پردازشی الگوریتم پیشنهادی

طیف دوبعدی هدف نقطه‌ای $s(\tau, \eta)$ استخراج می‌گردد. که در آن، K_r نرخ چیرپ برای پالس برد و تابع فاز $\phi(f_\tau, f_\eta)$ به صورت رابطه (۲۴) بیان می‌شود [۸، ۹، ۱۰، ۱۱].

$$S(f_\tau, f_\eta) = \quad (23)$$

$$W_r(f_\tau) W_{az} \left(f_\eta + (f_0 + f_\tau) \frac{k_1}{c} \right) \exp \left\{ j \phi(f_\tau, f_\eta) \right\}$$

$$\phi(f_\tau, f_\eta) = -2\pi \left(\frac{f_0 + f_\tau}{c} \right) R_{cen}$$

$$- \frac{\pi f_\tau^2}{K_r} + 2\pi \frac{c}{4k_2(f_0 + f_\tau)} \left(f_\eta + (f_0 + f_\tau) \frac{k_1}{c} \right)^2$$

$$+ 2\pi \frac{c^2 k_3}{8k_2^3 (f_0 + f_\tau)^2} \left(f_\eta + (f_0 + f_\tau) \frac{k_1}{c} \right)^3 \quad (24)$$

$$+ 2\pi \frac{c^3 (9k_3^2 - 4k_2 k_4)}{64k_2^5 (f_0 + f_\tau)^3} \left(f_\eta + (f_0 + f_\tau) \frac{k_1}{c} \right)^4 + \dots$$

۸. مراجع

- [1] C.W. Davis III, "The Airborne Seeker Test Bed", The Lincoln Laboratory Journal, V. 3, No.2, pp. 203-224, 1990.
- [2] B. Deng, X. Li, H. Wang, Y. Qin, and J. Wang, "Fast Raw-Signal Simulation of Extended Scenes for Missile-Borne SAR With Constant Acceleration", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 8, No. 1, pp.44-48, January 2011.
- [3] W. Weiguo, Z. Yanan, Q. Xiaolin, "A Review of synthetic Aperture Reader Seeker Related Technology Research." Key Engineering Materials, Vol. 460-461, pp.83-89, 2011.
- [4] Y. Yi, L. Zhang, N. Liu, X. Liu, D. Shen. "Imaging algorithm for missile-borne SAR with diving acceleration based on series reversion." Systems Engineering and Electronics, pp.2863-2866, 2009.
- [5] Y. Yi, L. Zhang, X. Lju, N. Liu, D. Shen. "A Large Scene Imaging Algorithm for Missile-borne Side-looking SAR." Journal of Electronics & Information Technology, pp.587-592, 2010.
- [6] Y. Qin, J. Wang, H. Wang, X. Li. "Range Doppler Algorithm Based Missile-Borne SAR Imaging with Diving Maneuver," Journal of Electronics & Information Technology, pp.2563-2568, 2009.
- [7] L. Fang, Y. Wang. "Signal analysis and motion compensation of SAR data with diving acceleration," Journal of Electronics & Information Technology, pp.1316-1320, 2008.
- [8] Y. Lam Neo, F. H. Wong, and I. G. Cumming, "A Two-Dimensional Spectrum for Bistatic SAR Processing Using Series Reversion," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No 1, pp.93-96, January 2007.

برای استخراج طیف دوبعدی گام اول، حذف فاز خطی و انحنای خطی سلول برد^۱ است. بعد از حذف این عبارت، سیگنال هدف نقطه‌ای در حوزه زمان به صورت رابطه (۱۷) بازنویسی می‌گردد [۸].

$$s_A(\tau, \eta) = \rho_r \left(\tau - \frac{2R_1(\eta)}{c} \right) w_{az}(\eta) \times \exp \left(-j 4\pi \frac{R_1(\eta)}{\lambda} \right) \quad (17)$$

$$R_1(\eta) = R_{cen} + k_2 \eta^2 + k_3 \eta^3 + k_4 \eta^4 + \dots \quad (18)$$

که در آن، مطابق رابطه (۱۸)، برابر برد مایل بعد از حذف عبارت خطی است. اگر ضرایب سری تیلور تا مرتبه چهارم استفاده شود، با کمک تبدیل فوریه در راستای برد، رابطه (۱۷) به رابطه (۱۹) تبدیل می‌شود [۸].

$$S'_A(f_\tau, \eta) = W_r(f_\tau) w_{az}(\eta) \exp \left\{ -j 2\pi \frac{(f_0 + f_\tau) R_1(\eta)}{c} \right\} \quad (19)$$

که در آن، $W_r(f_\tau)$ بیانگر شکل طیف پالس ارسالی، f_0 فرکانس کار رادار و f_τ فرکانس برد است. با استفاده از تئوری فاز ایستاد، فرکانس سمت (f_η) متناسب با زمان سمت (η) به صورت رابطه (۲۰) است [۸].

$$\left(\frac{c}{f_0 + f_\tau} \right) f_\eta = 2k_2 \eta + 3k_3 \eta^2 + 4k_4 \eta^3 + \dots \quad (20)$$

می‌توان با بهره‌گیری از روش سری معکوس مطابق مراجع

[۸، ۱۰] عبارت η را بر حسب f_η بیان نمود. که در آن $A_1 = k_2^{-1}$ ، $A_3 = k_2^{-5} (2k_3^2 - k_2 k_4)$ و $A_1 = -k_2^{-3} k_3$ با استفاده از سری معکوس محاسبه می‌شوند. با استفاده از روابط (۱۹)، (۲۰) و

(۲۱) و با کمک تبدیل فوریه در راستای سمت، طیف دوبعدی به صورت رابطه (۲۲) می‌گردد، که در آن $W_{az}(f_\eta)$ بیانگر شکل طیف داپلر است [۸].

$$\eta(f_\eta) = A_1 \left(-\frac{c}{f_0 + f_\tau} f_\eta \right) + A_1 \left(-\frac{c}{f_0 + f_\tau} f_\eta \right)^2 + A_1 \left(-\frac{c}{f_0 + f_\tau} f_\eta \right)^3 + \dots \quad (21)$$

$$S_A(f_\tau, f_\eta) = W_r(f_\tau) W_{az}(f_\eta) \exp \left\{ -j 2\pi f_\eta \eta(f_\eta) \right\} \times \exp \left\{ -j \frac{2\pi (f_0 + f_\tau)}{c} R_1(\eta(f_\eta)) \right\} \quad (22)$$

برای محاسبه طیف دوبعدی سیگنال بازگشتی $s(\tau, \eta)$ ، با معرفی دوباره LRCM و فاز خطی در عبارت $S_A(f_\tau, f_\eta)$ و استفاده از خواص تبدیل فوریه، رابطه (۲۲) به صورت رابطه (۲۳) بازنویسی و

¹ linear range cell migration (LRCM)

- [14] C.V. J.Jr, D.E. Wahl, D.C. Ghiglia, P.A. Thompson, and P.H. Eichel, " Spotlight Synthetic Aperture Radar", Kluwer Academic Publishers ,1996 .
- [15] M. Soumekh , "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms ", JOHN WILEY & SONS, 1999.
- [16] M.A. Richards, "Fundamentals of radar signal processing ", McGraw-Hill, 2005.
- [17] H. Xie, H. Zhao, Q. Fu, "Taylor expansion and its application in missile-borne SAR imaging," APSAR, pp. 426-430, 2009.
- [18] M. Y. Jin and C. Wu, "A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. GRS-22, No. 6, pp. 592-597, Nov. 1984.
- [9] Y. Lam Neo, F. H. Wong, and I. G. Cumming, "Processing of Azimuth-Invariant Bistatic SAR Data Using the Range Doppler Algorithm," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No.1, pp.14-21, Jan 2008.
- [10] L. Zhichao and L. Youxin, "Research on Imaging Algorithm for Diving Missile borne SAR Based on A Curve Trajectory", IEEE , 2012.
- [11] Z. Wang, X. He and B. Tang, "Imaging Algorithm of Missile-borne SAR in Diving and Squint Mode ", IEEE, 2013.
- [12] I.G. Cumming , and F.H. Wong , " Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation ", Artech House, Remote sensing library, 2004.
- [13] W. G. Carrara, R .S. Goodman, and R. M. Majewski . , "Spotlight Synthetic Aperture Radar ", ARTECH HOUSE, INC, 1995.

Archive of SID