

الگوریتم تمرکز خودکار سریع پارامتری در رادار دهانه مصنوعی معکوس مبتنی بر آنتروپی و

تجزیه به مقادیر ویژه

حمیدرضا هاشم پور*

استادیار دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۸/۰۱/۱۵؛ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۸)

چکیده

در این مقاله یک روش سریع پارامتری مبتنی بر تجزیه به مقادیر ویژه و روش حداقل آنتروپی برای تمرکز خودکار در رادار دهانه مصنوعی معکوس (ISAR) ارائه می‌گردد که نسبت به روش‌های معمول تمرکز خودکار، بار محاسباتی کمتری دارد. در این روش، ماتریس کوواریانس داده ISAR فشرده شده و همتراز شده در جهت برد تشکیل شده و با استفاده از روش تجزیه به مقادیر ویژه، سیگنال و نویز جدا می‌شوند. سپس از بردارهای ویژه مربوط به سیگنال که خیلی کمتر از کل بردارهای ویژه هستند تبدیل فوری گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از روش‌های تمرکز خودکار مرسوم بر روی تصویر به دست آمده خطای فاز استخراج می‌گردد. در این مقاله از روشی پارامتری مبتنی بر آنتروپی برای این کار استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با وجود کاهش بار محاسباتی، کارایی الگوریتم در جبران حرکت هدف حفظ شده است.

واژگان کلیدی

آنتروپی، تجزیه به مقادیر ویژه، تمرکز خودکار، رادار دهانه مصنوعی معکوس

۱. مقدمه

[۶-۸] و الگوریتم مبتنی بر بیشینه کردن کنتراست تصویر [۹-۱۱]. بعضی از الگوریتم‌های تمرکز خودکار پارامتری و بعضی غیر پارامتری هستند. در الگوریتم‌های پارامتری، مدلی برای حرکت هدف در نظر گرفته شده و پارامترهای این مدل تخمین زده می‌شود، در حالی که در الگوریتم‌های غیر پارامتری، کل خطای فاز استخراج می‌شود. به عنوان نمونه الگوریتم PGA الگوریتمی غیر پارامتری و الگوریتم بیشینه کردن کنتراست، پارامتری است.

ایده استفاده از بردار ویژه^۶ جهت جبران سازی حرکت ابتدا در [۱۲] مطرح شد. در واقع ابتدا ماتریس کوواریانس داده‌های دریافتی ISAR فشرده شده و همتراز شده در جهت برد محاسبه می‌شود و پس از تجزیه به مقادیر ویژه^۷، از بردار ویژه متناظر با بزرگترین مقدار ویژه جهت جبران سازی حرکت استفاده می‌شود. همچنین نشان داده شده است که این روش نسبت به PGA، خطای فاز سیستم رادار را بهتر استخراج می‌کند. در [۱۳] برای بهبود تخمین خطای فاز، الگوریتم [۱۲] اصلاح شده است به

رادار دهانه مصنوعی معکوس^۱ (ISAR)، به دلیل قابلیت کار در تمام طول شبانه روز و تمام شرایط آب و هوایی، و تشکیل تصویر دو بعدی با حد تفکیک بالا از اهداف متحرک با رفتار غیرهمکارانه^۲، کاربردهای نظامی و غیر نظامی گسترده ای دارد [۱-۳]. در یک رادار ISAR می‌توان با ارسال سیگنال با پهنای باند بالا و جمع‌آوری همدوس داده از زوایای مختلف، تصویری با حد تفکیک بالا از هدف در جهت برد و سمت به دست آورد. یکی از چالش‌های تشکیل تصویر در رادار ISAR جبران حرکت شعاعی هدف است که به دلیل ذات حرکت غیرهمکارانه هدف این حرکت نامعلوم است و بایستی از داده‌های خام دریافتی از هدف استخراج گردد. الگوریتم‌های متداول متنوعی برای تمرکز خودکار^۳ در ISAR پیشنهاد شده است که عبارتند از: الگوریتم PPP^۴ [۴]، PGA^۵ [۵]، الگوریتم مبتنی بر کمینه کردن آنتروپی تصویر [۱]،

*ایانامه نویسنده مسئول: Hrhashempour@Shirazu.ac.ir

^۱ Inverse Synthetic Aperture Radar^۲ Noncooperative^۳ Autofocus^۴ Point Prominent Processing^۵ Phase Gradient Algorithm^۶ Eigenvector^۷ Eigenvalue Decomposition

سمت مربوط به z امین سلول برد است. برای به دست آوردن تصویر ISAR کافی است در جهت سمت از ماتریس \mathbf{X} تبدیل فوریه گرفته شود:

$$\mathbf{I}_x = [FT\{\mathbf{x}_1\}, FT\{\mathbf{x}_2\}, \dots, FT\{\mathbf{x}_N\}] \quad (2)$$

اما به دلیل وجود خطای فاز (عدم جبران حرکت هدف در جهت خط دید رادار) تصویر به دست آمده غیرمتمرکز^۲ است. اگر ماتریس \mathbf{Y} بیانگر داده‌های برد همتراز شده بدون خطای فاز باشد، رابطه زیر بین \mathbf{X} و \mathbf{Y} برقرار است:

$$\mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{Y} \quad (3)$$

و \mathbf{P} ماتریس قطری خطای فاز است.

$$\mathbf{P} = \text{diag}[e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_M}] \quad (4)$$

تصویر ISAR بدون خطای فاز را می‌توان به صورت رابطه (۵) نشان داد.

$$\mathbf{I}_y = [FT\{\mathbf{y}_1\}, FT\{\mathbf{y}_2\}, \dots, FT\{\mathbf{y}_N\}] \quad (5)$$

با ترکیب روابط (۲) و (۳)، تصویر ISAR غیرمتمرکز \mathbf{I}_x را می‌توان مطابق رابطه (۶) بازنویسی نمود.

$$\mathbf{I}_x = [FT\{\mathbf{P}\mathbf{y}_1\}, FT\{\mathbf{P}\mathbf{y}_2\}, \dots, FT\{\mathbf{P}\mathbf{y}_N\}] \quad (6)$$

برای به دست آوردن تصویر متمرکز باید خطای فاز را تخمین زده و جبران نمود. لذا تصویر متمرکز ISAR از رابطه (۷) به دست می‌آید.

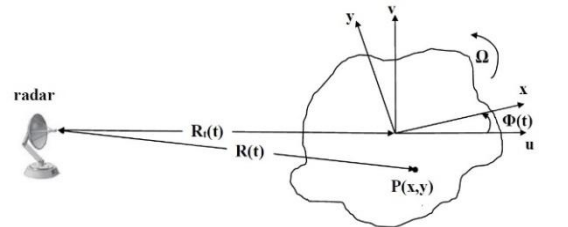
$$\hat{\mathbf{I}}_y = [FT\{\hat{\mathbf{P}}^H \mathbf{x}_1\}, FT\{\hat{\mathbf{P}}^H \mathbf{x}_2\}, \dots, FT\{\hat{\mathbf{P}}^H \mathbf{x}_N\}] \quad (7)$$

که \mathbf{H} نماد ترانهاده هرمیتی است و $\hat{\mathbf{P}}$ ماتریس خطای فاز تخمین زده شده است. برای تخمین خطای فاز ($\hat{\mathbf{P}}$) می‌توان از الگوریتم‌های تمرکز خودکار پارامتری یا غیر پارامتری استفاده نمود. اما به دلیل ابعاد بزرگ تصویر ISAR بار محاسباتی این الگوریتم‌ها بالا است. در بخش بعد روشی برای کاهش بار محاسباتی الگوریتم تمرکز خودکار پیشنهاد می‌گردد.

۳. تمرکز خودکار تصویر ISAR مبتنی بر تجزیه به مقادیر ویژه و آنتروپی

در این بخش با استفاده از تجزیه به مقادیر ویژه، الگوریتمی پارامتری و سریع، مبتنی بر آنتروپی برای تمرکز خودکار ارایه می‌گردد. ابتدا با استفاده از [۱۴] مفهوم تصویر ویژه^۳ و روش استخراج آن از سیگنال دریافتی معرفی شده، سپس روش تمرکز

نحوی که به سلول‌های برد، وزنی متناسب با نسبت سیگنال به نویز آن سلول داده شده، و سپس ماتریس کوواریانس و بردار ویژه محاسبه می‌گردد و نشان داده شده این کار خطای تخمین را کاهش می‌دهد.



شکل (۱): مدل هدف

داده‌های خام ISAR بعد از فشرده سازی و همترازی در جهت برد^۱، ماتریس کوواریانس تشکیل شده و با استفاده از روش تجزیه به مقادیر ویژه، سیگنال و نویز جدا می‌شوند و از بردارهای ویژه مربوط به سیگنال که خیلی کمتر از کل بردارهای ویژه هستند تبدیل فوریه گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از روش-های تمرکز خودکار غیر پارامتری مرسوم بر روی تصویر به دست آمده خطای فاز استخراج می‌گردد.

در این مقاله با استفاده از تکنیک استفاده شده در [۱۴] و استفاده از روشی پارامتری مبتنی بر آنتروپی، الگوریتمی سریع و کارا جهت جبران سازی حرکت ارایه می‌گردد که نسبت به روش‌های معمول تمرکز خودکار، بار محاسباتی کمتری دارد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی نشان می‌دهد که بار محاسباتی الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم‌های مرسوم کمتر است و در عین حال کارایی الگوریتم در جبران حرکت هدف حفظ شده است.

بخش‌های بعدی این مقاله بدین صورت تنظیم شده است که در بخش ۲ مدل مساله بیان می‌گردد. در بخش ۳ الگوریتم تمرکز خودکار پیشنهادی ارایه می‌گردد. در بخش ۴ نتایج شبیه سازی انجام شده بررسی می‌شود و در بخش ۵ نتیجه گیری ذکر می‌گردد.

۲. مدل مساله

در این بخش هندسه ISAR و مدل سیگنال دریافتی از هدف توصیف می‌شود. فرض کنید مطابق شکل (۱) هدف به طور یکنواخت در حال چرخش باشد، سیگنال دریافتی از هدف بعد از فشرده سازی و همترازی در جهت برد، به صورت رابطه زیر قابل نمایش است:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N] \quad (1)$$

که \mathbf{X} یک ماتریس با ابعاد $M \times N$ است و M و N به ترتیب تعداد پالس‌ها و سلول‌های برد هستند. لذا \mathbf{x}_z یک بردار در جهت

² Unfocused

³ Eigenimage

¹ Range Alignment

ویژه متناظر با مقادیر ویژه بزرگ انجام داد. با توجه به این که تعداد مقادیر ویژه بزرگ معمولاً خیلی کمتر از کل مقادیر ویژه است، این کار باعث کاهش بار محاسباتی می شود. شبیه سازی انجام شده در بخش ۴ درستی این موضوع را نشان می دهد.

برای جدا نمودن سیگنال از نویز با توجه به روش پیشنهادی در [۱۴]، ابتدا جمع نرمالیزه r مقدار ویژه در Λ_x ، مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می شود:

$$E_r = \sum_{i=1}^r \lambda_{xi} / \sum_{i=1}^M \lambda_{xi} \quad (14)$$

سپس تعداد ستون های منتخب ماتریس E_x (که با R نمایش داده می شود) با استفاده از قاعده زیر به دست می آید [۱۴]:

$$R = \min\{r \mid E_r \geq \eta\} \quad (15)$$

که η عددی بین صفر و یک است و به طور تجربی برای رسیدن به یک تصویر متمرکز، از 0.95 تا 0.98 انتخاب می شود. در نهایت ماتریس تصویر بردارهای ویژه منتخب مطابق رابطه (۱۶) تشکیل می شود:

$$E_s = [FT\{q_{x1}\}, FT\{q_{x2}\}, \dots, FT\{q_{xR}\}] \quad (16)$$

با توجه به این که معمولاً $R \ll M$ است، ابعاد ماتریس E_s از E_x به مراتب کمتر است. اکنون می توان با اعمال الگوریتم تمرکز خودکار بر روی ماتریس E_s خطای فاز را تخمین زد.

در عمل به دلیل وجود نویز خصوصاً در SNRهای پایین معیار (۱۴) و (۱۵) برای جدا نمودن نویز از سیگنال دچار خطا می شود. لذا جهت بهبود تخمین مقادیر ویژه سیگنال از روش پیشنهادی در [۱۳] و [۱۴] استفاده می شود. در این روش مطابق با رابطه (۱۷) با اعمال وزن به داده های دریافتی همتراز شده در برد رابطه (۱)، SNR بهبود می یابد.

$$\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N] \quad (17)$$

که $\hat{x}_j = \omega_j x_j$ وزن مربوط به j امین بردار برد متقاطع است و از رابطه زیر به دست می آید [۱۴]:

$$\omega_j = \frac{\|x_j\|^2}{\sum_{k=1}^N \|x_k\|^2} \quad (18)$$

لذا ماتریس کوواریانس و تجزیه به مقادیر ویژه مربوط به آن، برای داده های دریافتی همتراز شده در برد و وزن دار شده رابطه (۱۷) محاسبه می گردد.

۳-۲. الگوریتم تمرکز خودکار پیشنهادی

در این بخش الگوریتم تمرکز خودکار پارامتری مبتنی بر آنتروپی پیشنهادی تشریح می گردد.

خودکار پیشنهادی مبتنی بر کمینه کردن آنتروپی تصویر ویژه ارائه می گردد.

۳-۱. استخراج تصویر بردارهای ویژه منتخب

در این بخش با استفاده از [۱۴] روش استخراج تصویر ویژه سیگنال دریافتی ارائه می شود. ابتدا یک ماتریس کوواریانس با ابعاد $M \times M$ برای ماتریس X مطابق با رابطه (۸) تشکیل می گردد.

$$C_x = \frac{1}{N} X X^H \quad (8)$$

ماتریس C_x ، یک ماتریس هرمیتی است، لذا می توان آنرا با استفاده از رابطه زیر قطری نمود [۱۴]:

$$\Lambda_x = Q_x^H C_x Q_x = \text{diag}[\lambda_{x1}, \lambda_{x2}, \dots, \lambda_{xM}] \quad (9)$$

که $(\lambda_{x1} \geq \lambda_{x2} \geq \dots \geq \lambda_{xM})$ و Λ_x یک ماتریس قطری است که درایه های قطر اصلی آن مقادیر ویژه ماتریس C_x است و $Q_x = [q_{x1}, q_{x2}, \dots, q_{xM}]$ ماتریس شامل بردارهای ویژه C_x است. اکنون اگر از ستون های ماتریس Q_x تبدیل فوریه گرفته شود تصویر متناظر با بردارهای ویژه (تصویر ویژه) به صورت رابطه (۱۰) به دست می آید [۱۴]:

$$E_x = [FT\{q_{x1}\}, FT\{q_{x2}\}, \dots, FT\{q_{xM}\}] \quad (10)$$

به روشی مشابه برای ماتریس Y نیز می توان ماتریس های کوواریانس (C_y)، بردار ویژه (Q_y) و تصویر ویژه (E_y) تعریف نمود. با استفاده از روابط (۳) و (۸) داریم:

$$C_x = \frac{1}{N} (PY)(PY)^H = P C_y P^H \quad (11)$$

همچنین با توجه به (۹) و (۱۱) برای ماتریس مقادیر ویژه داریم [۱۴]:

$$\Lambda_x = Q_x^H C_x Q_x = (P^H Q_x)^H C_y (P^H Q_x) = Q_y^H C_y Q_y = \Lambda_y \quad (12)$$

از معادله (۱۲) می توان مشاهده نمود که مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس X و Y یکسان هستند. لذا به جای استفاده از (۷)، خطای فاز (ماتریس P) را با استفاده از ماتریس بردارهای ویژه می توان محاسبه نمود [۱۴].

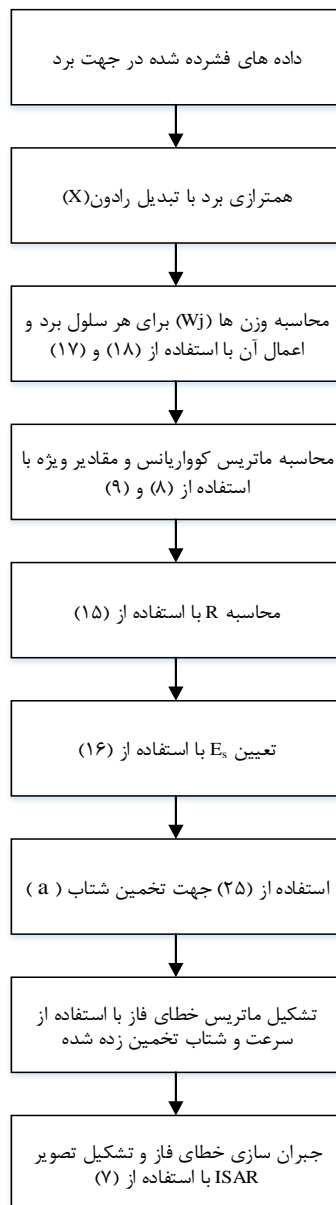
$$\hat{E}_y = [FT\{\hat{P}^H q_{x1}\}, FT\{\hat{P}^H q_{x2}\}, \dots, FT\{\hat{P}^H q_{xM}\}] \quad (13)$$

اگر مقادیر ویژه به ترتیب نزولی مرتب شوند و مقادیر ویژه بزرگ، با استفاده از گذاشتن سطح آستانه جدا شوند، می توان سیگنال و نویز را جدا نمود و تخمین خطای فاز را روی بردارهای

استفاده از الگوریتم جستجوی قسمت طلایی^۲ [۱۵] قابل دست‌یابی است. پس از استخراج مقدار شتاب هدف، خطای فاز به‌دست آمده و جبران‌سازی آن قابل انجام است.

تفاوتی که در روش این مقاله نسبت به [۱] وجود دارد این است که به‌جای استفاده از تصویر ISAR هدف (\mathbf{I}_x)، از ماتریس تصویر بردارهای ویژه منتخب (\mathbf{E}_s) در الگوریتم تمرکز خودکار [۱] استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد ابعاد ماتریس \mathbf{E}_s از \mathbf{I}_x به مراتب کوچکتر است. لذا الگوریتم جستجوی حداقل آنتروپی سریع‌تر به جواب همگرا می‌شود.

نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): نمودار بلوکی الگوریتم پیشنهادی

زمانی که حد تفکیک برد متقاطع مورد نیاز از مرتبه یک متر باشد و حرکت نسبی بین رادار و هدف متعارف باشد، فاصله لحظه ای هدف از رادار (شکل (۱)) را می‌توان با بسط تیلور مرتبه دو حول $t=0$ به صورت زیر تقریب زد [۱۱]:

$$R_t(t) \cong R_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (۱۹)$$

که R_0 برد اولیه هدف از رادار است و v و a به ترتیب سرعت و شتاب هدف در جهت خط دید هستند.

ابتدا با استفاده از تبدیل رادون^۱ (RT) تخمین اولیه ای از سرعت شعاعی به‌دست می‌آید. برای این کار از سیگنال فشرده شده در برد در حوزه زمان تبدیل رادون گرفته می‌شود:

$$u_{rc}(r, \theta) = RT \{u_{rc}(\tau, t)\} \quad (۲۰)$$

که $u_{rc}(\tau, t)$ سیگنال فشرده شده در برد است. اکنون می‌توان تخمینی از سرعت شعاعی را با استفاده از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$\hat{v}_0 = \tan(\hat{\theta}) \quad (۲۱)$$

که

$$\hat{\theta} = \arg \left\{ \max_{\theta} [u_{rc}(r, \theta)] \right\} - \frac{\pi}{2} \quad (۲۲)$$

با این روش می‌توان هدف را در جهت برد همتراز نمود. سپس با استفاده از یک الگوریتم جستجو (مبتنی بر [۱]) مقدار شتاب هدف (a) به‌دست می‌آید. قبل از تشریح مراحل الگوریتم، آنتروپی تصویر \mathbf{E}_s به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$IE = - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \bar{\mathbf{E}}_s(m, n) \ln[\bar{\mathbf{E}}_s(m, n)] \quad (۲۳)$$

که $\bar{\mathbf{E}}_s$ مطابق رابطه (۲۴)، توان نرمالیزه تصویر \mathbf{E}_s است:

$$\bar{\mathbf{E}}_s = \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\mathbf{E}_s(m, n)|^2} \quad (۲۴)$$

مراحل این الگوریتم بدین شرح است: ابتدا مقدار اولیه‌ای برای شتاب هدف در نظر گرفته می‌شود (مثلاً $\hat{a}_0 = 0$)، سپس برای مقادیر مجاز تغییرات شتاب، آنتروپی مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌گردد و شتاب معادل با مقدار کمینه آنتروپی (\hat{a}_1) انتخاب می‌شود:

$$\hat{a}_1 = \arg \{ \min_{\tilde{a}} [IE(\hat{v}_0, \tilde{a})] \} \quad (۲۵)$$

در این رابطه \hat{v}_0 مقدار سرعت تخمینی توسط تبدیل رادون است، همچنین $\tilde{a} \in [-a_{max}, a_{max}]$ که حداکثر شتاب ممکن هدف در جهت خط دید رادار (LOS) می‌باشد. جواب رابطه (۲۵) با استفاده از یک جستجوی کامل در بازه مجاز یا

² Golden-Section

¹ Radon Transform

۴. شبیه‌سازی

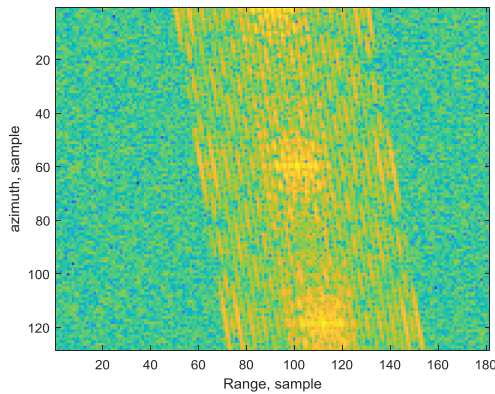
در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی صحت الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

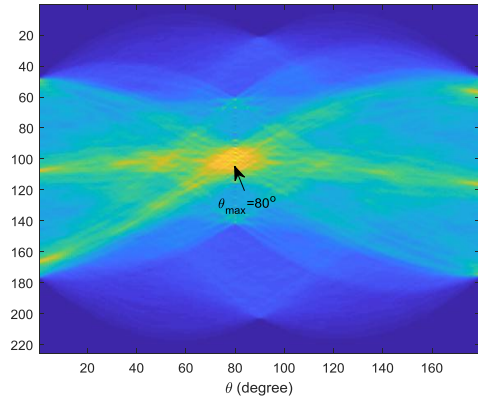
f_0	۹/۶ GHz
Transmitted signal	LFM
PRF	۳۰۰ Hz
Pulse width	۶ μ s
BW (Bandwidth)	۴۰۰ MHz
Ω (angular velocity)	۰/۰۸ rad/s
Number of pulses	۱۲۸
Number of range cells	۱۸۱



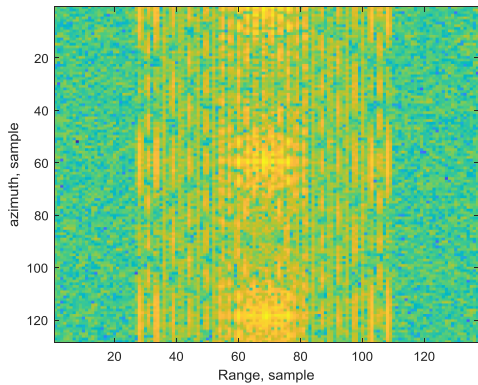
شکل (۴): خطای فاز سیگنال دریافتی از هدف



شکل (۵): داده ISAR بعد از فشرده سازی در جهت برد



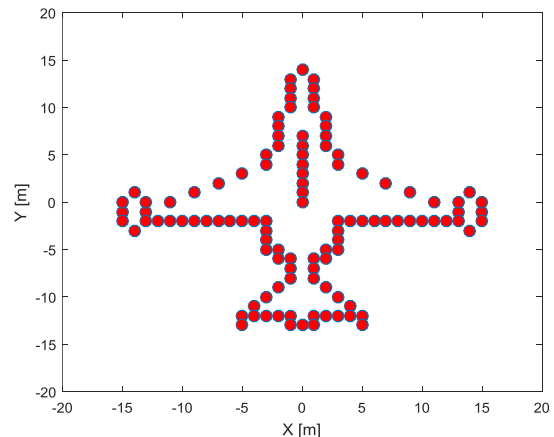
شکل (۶): تبدیل رادون پروفایل برد



شکل (۷): داده ISAR بعد از فشرده سازی در جهت برد و همترازی برد

فرض کنید هدف شامل پراکنده سازهای نقطه‌ای ایده‌آل مطابق با شکل (۳) باشد. برای هدف یک حرکت شتاب ثابت در نظر گرفته شده است. سرعت و شتاب هدف به ترتیب برابر 20 m/s و 0.6 m/s^2 است. همچنین برای در نظر گرفتن خطاهای درجه بالاتر فاز تصادفی با توزیع یکنواخت به فاز هدف اضافه می‌شود (مطابق شکل (۴)).

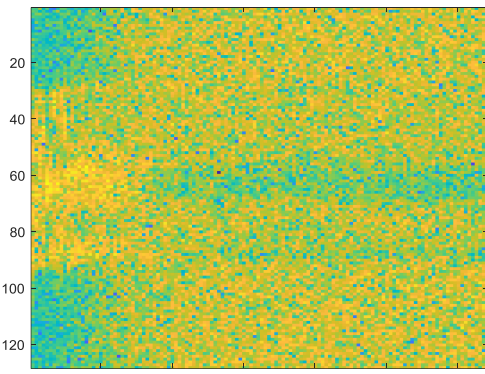
SNR سیگنال دریافتی برابر با 0 dB در نظر گرفته شده است. ابتدا فشرده‌سازی برد بر روی داده‌های خام ورودی انجام می‌شود (شکل (۵)). سپس با استفاده از تبدیل رادون سرعت هدف تخمین زده می‌شود. خروجی تبدیل رادون پروفایل برد در شکل (۶) نشان داده شده است. پس از تخمین سرعت هدف، پروفایل برد هدف همتراز می‌شود (شکل (۷)). اگر از داده‌های به دست آمده تبدیل فوریه گرفته شود تصویر غیرمتمرکز (بدلیل عدم جبران حرکت هدف) به دست می‌آید (مطابق با شکل (۸)).



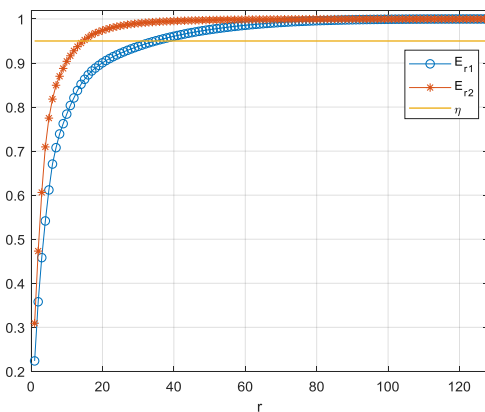
شکل (۳): مدل هدف

همین‌طور که دیده می‌شود تصویر هدف کاملاً متمرکز است.

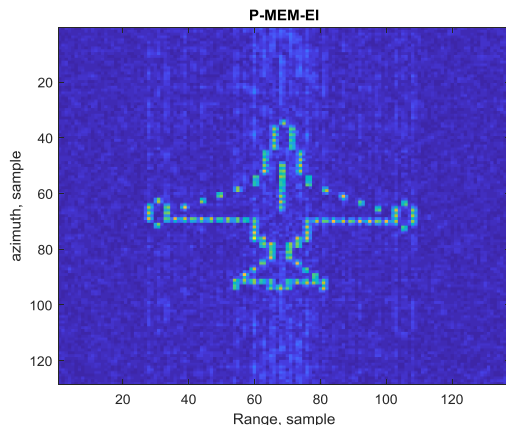
برای بررسی بهتر کارایی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، در اینجا مقایسه‌ای با الگوریتم تمرکز خودکار پارامتری [۱] و الگوریتم‌های متداول غیر پارامتری مراجع [۱۴] و [۸] انجام می‌شود. الگوریتم [۱۴] مبتنی بر تصویر بردارهای ویژه و الگوریتم غیر پارامتری حداقل آنتروپی است و الگوریتم [۸]، الگوریتمی غیر پارامتری مبتنی بر آنتروپی است که از کل تصویر ISAR استفاده می‌نماید.



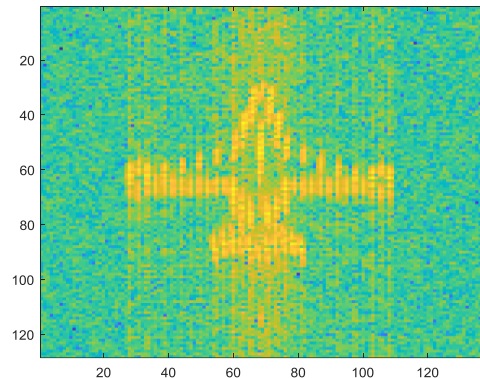
شکل (۱۰): تصویر بردارهای ویژه (E_x)



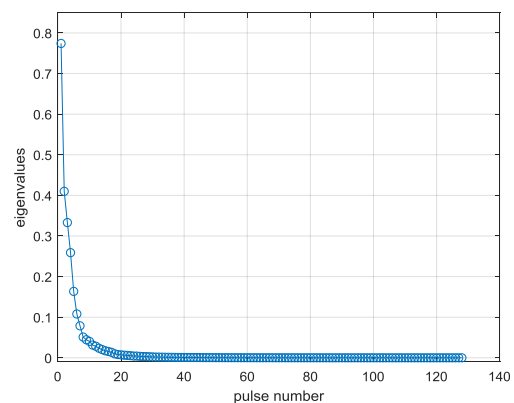
شکل (۱۱): نمودار E_r بر حسب r و سطح آستانه 0.95



شکل (۱۲): تصویر ISAR نهایی بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی



شکل (۸): تصویر ISAR بدون اعمال تمرکز خودکار



شکل (۹): مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس

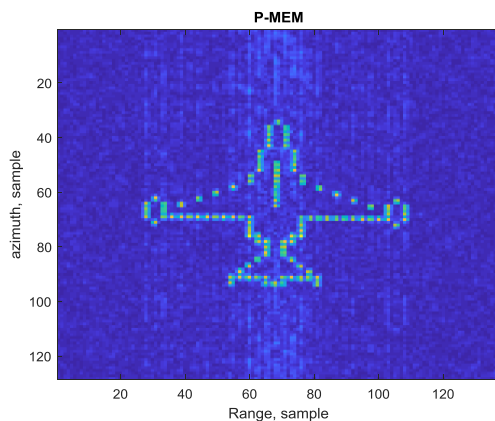
در اینجا عملکرد الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۹) مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تعداد کمی از مقادیر ویژه دارای مقادیر بزرگی هستند و بقیه دارای مقادیر بسیار کوچکی هستند. در شکل (۱۰) تصویر بردارهای ویژه E_x به‌دست آمده رسم شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است سیگنال از نویز جدا شده است. به عبارت دقیق‌تر بردارهای ویژه از یک تا حدود ۲۰ مربوط به سیگنال و بقیه مربوط به نویز هستند.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد (روابط ۱۴ تا ۱۶) با استفاده از یک سطح آستانه می‌توان مقادیر ویژه غالب را انتخاب نمود. سطح آستانه در اینجا برابر با 0.95 انتخاب شده است. در شکل (۱۱) نمودار E_r برای \mathbf{X} و E_r برای $\hat{\mathbf{X}}$ بر حسب r و سطح آستانه رسم شده اند. با توجه به شکل (۱۱) برای تشکیل ماتریس E_s براساس \mathbf{X} و $\hat{\mathbf{X}}$ ، به ترتیب ۳۵ و ۱۵ بردار از ۱۲۸ بردار ویژه مورد نیاز است. لذا با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) می‌توان با تعداد بردار ویژه کمتری تمرکز خودکار تصویر را انجام داد که باعث کاهش بیشتر بار محاسباتی الگوریتم پیشنهادی می‌شود. در نهایت با اعمال الگوریتم حداقل آنتروپی بر روی بردارهای ویژه منتخب، مقدار شتاب هدف (و در نتیجه خطای فاز) به‌دست می‌آید. تصویر ISAR نهایی بعد از اعمال الگوریتم تمرکز خودکار پیشنهادی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

به‌عنوان شبیه‌سازی آخر، MSE خطای فاز، آنتروپی تصاویر به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف و زمان اجرای الگوریتم‌ها به ازای SNR از 10- تا 30 دسیبل به ترتیب در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) رسم شده است. برای رسم این نمودارها از آزمایش مونت کارلو با تکرار ۵۰ استفاده شده و خطای فاز هم مطابق شکل (۴) فرض شده است. مطابق شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، MSE و آنتروپی روش پیشنهادی و الگوریتم P-MEM بسیار به هم نزدیک است، اما همان‌طور که گفته شد بار محاسباتی الگوریتم پیشنهادی کمتر است. روش MEM هم کمترین MSE و آنتروپی را دارد. از طرف دیگر در SNRهای پایین آنتروپی تصاویر به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شود و MSE و آنتروپی همه الگوریتم‌ها افزایش می‌یابد، اما الگوریتم MEM-EI (۱۴) در $SNR = -10$ dB نسبت به سایر روش‌ها دارای SNR بالاتری است، که نشان از حساسیت بالای این روش به SNR دارد. روش پیشنهادی حساسیت کمتری نسبت به SNR دارد و تقریباً در SNRهای مختلف عملکرد یکسانی دارد. با توجه به نظر گرفتن خطای فاز با درجات بالا (شکل (۴)) و غیر پارامتری بودن روش‌های MEM-EI و MEM، عملکرد این الگوریتم‌ها در تخمین خطای فاز به خصوص در SNRهای بالا بهتر از روش پیشنهادی است. از طرف دیگر با توجه به شکل (۱۸)، زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی در SNRهای مختلف به مراتب کمتر از سایر الگوریتم‌هاست که نشانگر برتری الگوریتم پیشنهادی از نظر بار محاسباتی و سرعت اجراست.

جدول (۲): مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های مرسوم

الگوریتم	آنتروپی	MSE	زمان اجرا
P-MEM	۷/۴۶۶۱	۰/۱۸۱۴	۱/۱۴ s
P-MEM-EI	۷/۴۹۶۲	۰/۱۹۱۲	۰/۱۳ s
MEM-EI	۷/۰۰۴۲	۰/۰۷۱	۱/۲۱ s
MEM	۶/۹۱۴۴	۰/۰۰۶	۱/۶۱ s



شکل (۱۳): تصویر ISAR نهایی بعد از اعمال الگوریتم P-MEM

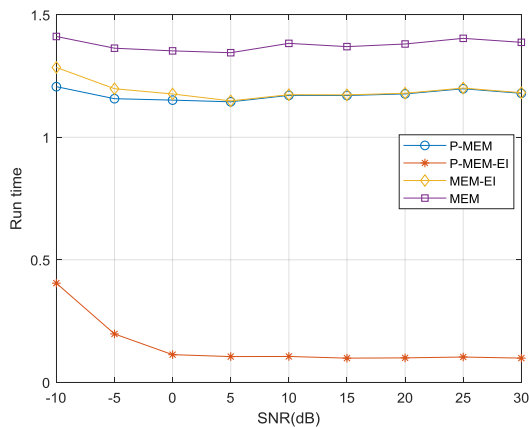
برای سادگی در نام‌گذاری، الگوریتم مرجع [۱]، روش پیشنهادی و روش‌های [۱۴] و [۸] به ترتیب، P-MEM، P-MEM-EI، و MEM-EI و MEM نامیده می‌شوند. پارامترهای مقایسه عبارتند از: آنتروپی تصویر ISAR، میانگین مربع اختلاف فاز تخمینی و فاز واقعی سیگنال (MSE)، و زمان اجرای الگوریتم‌ها. زمان اجرای الگوریتم‌ها بر اساس اجرا روی یک رایانه با پردازنده مرکزی Core i5 (2.5 GHz) و RAM 6GB و در نرم‌افزار MATLAB اندازه‌گیری شده است. در جدول (۲) نتایج مقایسه بین الگوریتم‌های ذکر شده، آمده است. لازم به ذکر است که سرعت همگرایی الگوریتم‌های غیر پارامتری (MEM و MEM-EI) به جواب صحیح، وابسته به مقدار اولیه فاز است. در اینجا خروجی الگوریتم P-MEM به عنوان مقدار اولیه فاز در الگوریتم‌های غیر پارامتری استفاده شده است. لذا زمان اجرای الگوریتم P-MEM به زمان کل این الگوریتم‌ها اضافه می‌شود.

چنان‌که از جدول (۲) مشخص است الگوریتم MEM کمترین مقدار آنتروپی و MSE را نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد، که این به معنی دقت بالای این الگوریتم در تخمین خطای فاز دارد. اما زمان اجرای این الگوریتم از بقیه بالاتر است، لذا از نظر بار محاسباتی و زمان اجرا الگوریتم بهینه‌ای نیست. از طرف دیگر الگوریتم پیشنهادی (P-MEM-EI) دارای مقادیر آنتروپی و MSE تقریباً مشابهی با الگوریتم P-MEM می‌باشد، اما زمان اجرای آن به مراتب کمتر از P-MEM است، که دلیل آن ابعاد کوچک ماتریس ورودی الگوریتم (E_p) نسبت به ابعاد تصویر واقعی است که منجر به کاهش بار محاسباتی می‌شود. به دلیل پارامتری بودن الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم قادر به تخمین خطاهای تصادفی و درجه بالاتر نیست، لذا اندکی مقدار آنتروپی و MSE آن از الگوریتم‌های غیر پارامتری (MEM و MEM-EI) بیشتر است، اما زمان اجرای این الگوریتم (بار محاسباتی) آن از تمامی الگوریتم‌ها کمتر است. لذا چنانچه در بخش قبل گفته شد به دلیل کاهش قابل ملاحظه ابعاد تصویر بردارهای ویژه منتخب (E_p)، نسبت به تصویر اصلی، انتظار کاهش بار محاسباتی و افزایش سرعت اجرای الگوریتم وجود داشت.

در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) تصویر ISAR نهایی به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های P-MEM، MEM-EI و MEM به ترتیب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی تصاویر ISAR رسم شده از پنجره تیلور 35 dB در هر دو جهت برد و سمت استفاده شده است. می‌توان مشاهده نمود که همان‌طور که قابل انتظار بود تصویر به‌دست‌آمده از تمامی الگوریتم‌ها متمرکز است ولی تصویر به‌دست‌آمده از الگوریتم MEM بهترین کیفیت را دارد.

¹ Parametric Minimum Entropy Method

² P-Mem Eigenimage



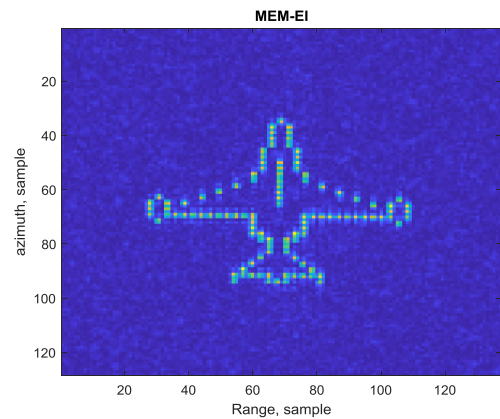
شکل (۱۸): نمودار زمان اجرا بر حسب SNR برای الگوریتم‌های مختلف

۵. نتیجه‌گیری

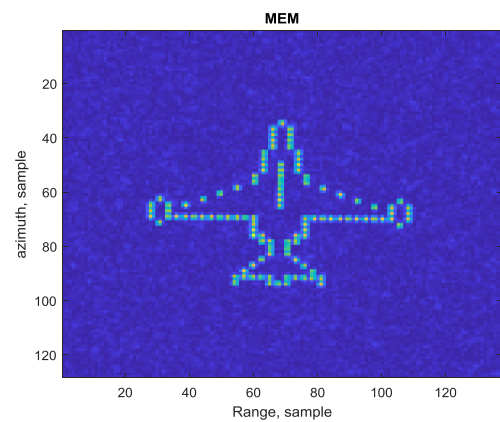
در این مقاله روشی سریع مبتنی بر تجزیه به مقادیر ویژه برای تمرکز خودکار در رادار ISAR ارایه گردید که نسبت به روش‌های معمول تمرکز خودکار، بار محاسباتی کمتری دارد. در این روش ماتریس کوواریانس داده ISAR همتراز شده در جهت برد تشکیل شده و با استفاده از روش تجزیه به مقادیر ویژه، سیگنال و نویز جدا می‌شوند و از بردارهای ویژه مربوط به سیگنال که خیلی کمتر از کل بردارهای ویژه هستند تبدیل فوریه گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از روش‌های تمرکز خودکار مرسوم بر روی تصویر به دست آمده خطای فاز استخراج می‌گردد. در این مقاله از روشی پارامتری مبتنی بر آنتروپی برای این کار استفاده شد. نتایج به دست آمده از شبیه سازی نشان می‌دهد که با وجود کاهش بار محاسباتی، کارایی الگوریتم در جبران حرکت هدف حفظ شده است.

۶. منابع

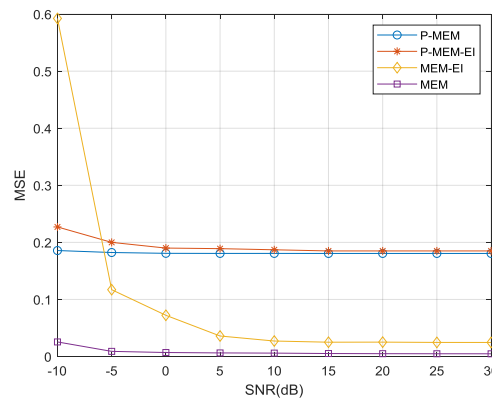
- [1] H. R. Hashempour, M. A. Masnadi-Shirazi, and A. Sheikhi, "Cyclic prefix-based OFDM ISAR imaging," *Iranian J. Sci. Technol., Trans. Elect. Eng.*, vol. 42, no. 2, pp. 239-249, 2018.
- [2] H. R. Hashempour and M. A. Masnadi-Shirazi, "Inverse synthetic aperture radar phase adjustment and cross-range scaling based on sparsity," *Digit. Signal Process.*, vol. 68, pp. 93-101, Sep. 2017.
- [3] H. R. Hashempour, M. A. Masnadi-Shirazi, and B. A. Arand, "Compressive sensing ISAR imaging with LFM signal," In *Proc. Iranian Conf. Electr. Eng. (ICEE)*, Tehran, Iran, pp. 1869-1873, May 2017.
- [4] B. Haywood and R. J. Evans, "Motion compensation for ISAR imaging," In *Proc. ASSPA 89*, Adelaide, Australia, pp. 113-117, April 1989.
- [5] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, July 1994.



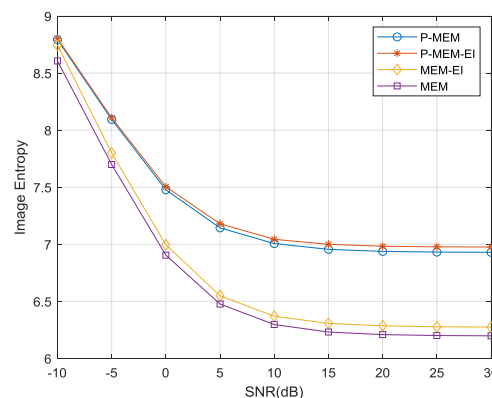
شکل (۱۴): تصویر ISAR نهایی بعد از اعمال الگوریتم MEM-EI



شکل (۱۵): تصویر ISAR نهایی بعد از اعمال الگوریتم MEM



شکل (۱۶): نمودار MSE بر حسب SNR برای الگوریتم‌های مختلف



شکل (۱۷): نمودار آنتروپی بر حسب SNR برای الگوریتم‌های مختلف

- [11] M. Martorella, F. Berizzi, and B. Haywood, "A contrast maximization based technique for 2D ISAR autofocusing," Proc. Inst. Elect. Eng. Radar, Sonar Navig., vol. 152, no. 4, pp. 253262, Aug. 2005.
- [12] C. V. Jakowatz, Jr., and D. E. Wahl, "Eigenvector method for maximum-likelihood estimation of phase errors in synthetic-aperture radar imagery," J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci., vol. 10, no. 12, pp. 2539–2546, Oct. 1993.
- [13] J. Duan, L. Zhang, and M. Xing, "A weighted eigenvector autofocus method for sparse-aperture ISAR imaging," EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 2013, pp. 1–9, 2013.
- [14] S.-H. Lee, J.-H. Bae, M.-S. Kang, and K.-T. Kim, "Efficient ISAR autofocus technique using eigenimages," IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens., vol. 10, no. 2, pp. 605–616, Feb. 2017.
- [15] S. Press WH et al, "Numerical recipes: the art of scientific computing," Cambridge University Press, New York, pp. 120–122, 1987.
- [6] R. P. Bocker, T. B. Henderson, S. A. Jones, and B. R. Frieden, "A new inverse synthetic aperture radar algorithm for translational motion compensation," Proc. SPIE, vol. 1569, pp. 298–310, 1991.
- [7] L. Xi, L. Giosui, and J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimisation," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999.
- [8] J. Wang, X. Liu, and Z. Zhou, "Minimum-entropy phase adjustment for ISAR," IEE Proc.-Radar, Sonar Navigat., vol. 151, no. 4, pp. 203–209, Aug. 2004.
- [9] F. Berizzi and G. Corsini, "Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 32, no. 3, pp. 1185-1191, July 1996.
- [10] F. Berizzi and G. Corsini, "Focusing of two dimensional ISAR images of objects by contrast maximization," Proc. Microw. Conf., Helsinki, Finland, pp. 951–956, August 1992.

Fast Parametric ISAR Autofocus Algorithm Based on Entropy and Eigenvalue Decomposition

H. R. Hashempour^{*}

^{*}Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received: 04/04/2019, Accepted: 30/06/2019)

Abstract

In this paper, a fast-parametric method for ISAR autofocus is proposed which is based on the minimum entropy method and eigenvalue decomposition, and has less computational complexity than that of conventional autofocus methods. In this technique, the covariance matrix of the range compressed and aligned data is formed and by utilizing eigenvalue decomposition, signal and noise are separated. Then, the Fourier transform of the signal eigenvectors which are much smaller than the total eigenvectors is taken. Finally, by applying the conventional autofocus approaches to the image of eigenvectors, the phase error is estimated. In this paper, a parametric method based on entropy is utilized. The simulation results show that although the computational complexity is decreased, the performance of the algorithm is maintained.

Keywords: Entropy, Eigenvalue Decomposition, Autofocus, ISAR

^{*} Corresponding author E-mail: Hrhashempour@Shirazu.ac.ir