

کاهش نویز لکه و بازسازی تصویر رادار دهانه ترکیبی با استفاده از حسگری فشرده

احمد شفیعی^{۱*}، احسان یزدیان^۲، مجتبی بهشتی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، ۳- استادیار، پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات،

دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۹۴/۰۳/۲۰؛ پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۳)

چکیده

نویز لکه، کیفیت تصاویر رادار دهانه ترکیبی (SAR) را به شدت کاهش می‌دهد و بهره‌برداری از تصویر به کمک شیوه‌های خودکار ارزیابی تصویر را پیچیده می‌کند. به تازگی، کاربرد حسگری فشرده (CS) در پردازش سیگنال رادار دهانه ترکیبی مطرح شده است. در این مقاله ابتدا یک مدل خطی برای داده SAR با در نظر گرفتن نویز لکه به دست می‌آید. سپس با استفاده از این مدل و نظریه CS روشی برای کاهش نویز لکه پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی، همزمان با کاهش نویز، پس‌زمینه تصویر و اهداف نقطه‌ای درخشان نیز، بازسازی می‌شوند. ویژگی مهم روش پیشنهادی، کاهش توأم نویز و تشکیل تصویر SAR است. علاوه بر این، کارایی روش پیشنهادی در نویزهایی و حفظ جزئیات تصویر به کمک تصاویر شبیه‌سازی شده و تصاویر واقعی SAR بررسی و با کارایی چند روش نویززدایی مقایسه می‌شود.

واژگان کلیدی

رادار دهانه ترکیبی، نویز لکه، بازسازی تصویر، حسگری فشرده.

۱. مقدمه

روشنایی پیکسل‌های تصویر می‌شود که به آن، نویز لکه^۴ گفته می‌شود [۲]. نویز لکه، هدف‌های کوچک را پنهان می‌کند و تشخیص اطلاعات و ویژگی‌های تصاویر SAR را مشکل می‌کند. کاهش این نویز در سه دهه گذشته، یک زمینه پژوهشی فعال بوده است و همواره روش‌هایی جدید با کارایی بهتر ارائه شده است. دو رویکرد اصلی برای کاهش نویز لکه عبارتند از:

الف) پردازش چندنگاه (ML^۵) که همراه با تشکیل تصویر پیاده‌سازی می‌شود و ب) فیلتر کردن که نویز لکه را پس از تشکیل تصویر کاهش می‌دهد.

پردازش چندنگاه با میانگین‌گیری ناهمدوس تصاویر مستقل یک منظره، تأثیر نویز لکه را کاهش می‌دهد [۳]. تصاویر مستقل را می‌توان با چند بار تصویربرداری از منظره به دست آورد. روش مرسوم این است که پهنای بیم سمت به چند بخش تقسیم شود که هر بخش، متناظر با یک زاویه دید جداگانه است و یک نگاه نامیده می‌شود. این کار با افزایش طیف داپلر سیگنال دریافتی با استفاده از فیلترهای میان‌گذر به چند بخش، که می‌توانند همپوشان نیز باشند، انجام می‌شود. در پردازش چندنگاه، شدت نویز متناسب با تعداد نگاه‌ها کاهش می‌یابد [۴]. اما از آنجا که برای هر نگاه، تنها بخشی از طیف داپلر به کار رفته است، تفکیک‌پذیری تصویر هم

بیش از سه دهه از به‌کارگیری گسترده رادار دهانه ترکیبی (SAR^۱) [۱] برای سنجش از راه دور در کاربردهای گوناگون می‌گذرد. راداردهانه ترکیبی روی یک سکوی متحرک نصب می‌شود و با ارسال پی‌درپی امواج رادیویی به منظره مورد نظر، سیگنال‌های بازتاب را دریافت کرده و با پردازش مناسب دامنه و فاز آنها، تصویر منظره را تشکیل می‌دهد. این سامانه، امکان تصویربرداری در شب یا روز، شرایط آب و هوایی مختلف، تصویربرداری از اهداف پنهان شده و دست‌یابی به تفکیک‌پذیری^۲ مستقل از برد را فراهم می‌کند. تفکیک‌پذیری، ابعاد کوچکترین هدف قابل تشخیص است.

هر سلول تفکیک‌پذیری در ابعاد ماکروسکوپی، هموار و یک‌دست به نظر می‌رسد اما در ابعاد کوچکتر، سطحی ناهموار دارد و از تعداد زیادی نقطه پراکنش^۳ تشکیل شده است. از آنجا که این نقاط پراکنش، سیگنال دریافتی را با فازها و دامنه‌های مختلفی منعکس می‌کنند، برآیند بازتاب‌های هر سلول تفکیک‌پذیری از سلول به سلول، نوساناتی دارد. این نوسانات، منجر به نوسان شدت

* رایانامه نویسنده پاسخگو: Ahmad.Shafiei@ec.iut.ac.ir

¹ Synthetic Aperture Radar

² Resolution

³ Scatterer

⁴ Speckle

⁵ Multilook

$M \ll N$ ناممکن باشد. اما تنک بودن x ، بازیابی را ممکن می‌سازد. اگر ماتریس B تصادفی باشد و $M > CK \ln(N/K)$ که C عددی ثابت و مثبت و K مرتبه تنکی سیگنال است، شرط RIP^{13} با احتمال زیاد برقرار بوده و در نتیجه سیگنال x به دقت قابل بازیابی است [۱۸]. برخی از مزایای CS در رادار دهانه ترکیبی عبارتند از: دستیابی به تصاویری با تفکیک پذیری بالا، کاهش بهتر نویز لکه و مقاوم سازی در برابر محدودیت‌های کیفی و کمی داده [۱۹].

هدف این مقاله، بررسی کاربرد حسگری فشرده در کاهش نویز لکه است. رویکرد جدید مقاله، افزاز داده SAR به چند زیرمجموعه و بهره‌گیری از نظریه CS برای کاهش نویز و بازسازی تصویر هر زیرمجموعه است. مراجع [۲۰-۲۳] نیز روش‌هایی برای کاهش نویز لکه بر اساس CS بیان کرده‌اند. البته تفاوت‌هایی بین روش‌های آنها و رویکرد این مقاله وجود دارد که مهمترین آنها عبارتند از: الف) مراجع بالا با پردازش تصویر SAR، نویز لکه را حذف می‌کنند. در حالی که در این مقاله، داده خام SAR به کار می‌رود و همراه با کاهش نویز لکه، تصویر SAR نیز تشکیل می‌شود، ب) در مراجع یاد شده، ماتریس پایه موجک یا تبدیل کانتورلت^{۱۴} استفاده شده است. اما روش پیشنهادی این مقاله از ماتریس‌های پایه فوریه و همانی بهره می‌برد. ج) در این مقاله، بر خلاف مراجع بالا، علاوه بر تصاویر همگن SAR، چگونگی بازسازی تصویر و کاهش نویز لکه در حضور اهداف نقطه‌ای درخشان نیز بررسی شده است.

روش پیشنهادی، کاهش نویز را همراه با تشکیل تصویر SAR انجام می‌دهد. بنابراین در مقایسه با روش‌های دیگر، پیچیدگی تشکیل تصویر را ندارد. این روش می‌تواند با دریافت بخشی از داده، کارایی قابل مقایسه یا بهتری نسبت به روش‌های مرسوم که از تمام داده استفاده می‌کنند، ارائه دهد. با وجود این ویژگی‌ها، پیچیدگی محاسباتی روش‌های مبتنی بر CS معمولاً بیش از پیچیدگی روش‌های پیشین است. البته پژوهش‌هایی برای کاهش پیچیدگی روش‌های مبتنی بر CS آغاز شده است. این پژوهش‌ها از پیشرفت‌های اخیر در بهینه‌سازی محدب، تقریب تابع مشاهده و پیاده‌سازی موازی بهره می‌گیرند و می‌توانند پیچیدگی را به طور قابل توجه کاهش دهند [۱۹ و ۲۴].

روند مقاله به این شرح است: در بخش ۲، مدل خطی داده SAR و مدل نویز لکه معرفی می‌شود. در بخش ۳، روش پیشنهادی کاهش نویز لکه ارائه می‌گردد. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های مرسوم کاهش نویز بیان

متناسب با تعداد نگاه‌ها کاهش می‌یابد. برای افزایش کارایی پردازش چندنگاهه، پنجره‌گذاری و روش‌های بهبودیافته (IML) پیشنهاد شده است [۵].

روش‌های فیلتری، تصویر را از فیلتری مناسب عبور می‌دهند تا علاوه بر نویزدایی، اطلاعات تصویر مانند لبه‌ها و خطوط نازک حفظ شود. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه بیزی^۲ و غیربیزی تقسیم کرد [۶]. روش‌های بیزی بر اساس نظریه تخمین بیز [۷] بنا شده‌اند و نویزدایی در آنها، معادل حل یک مسأله تخمین برای یافتن ضرایب بازتاب واقعی بدون نویز است. فیلترهای لی‌ارتقا یافته^۳ [۸]، فروست^۴ [۹] و $\Gamma - MAP^5$ [۱۰] مهمترین فیلترهای بیزی به کاررفته برای کاهش نویز لکه هستند. گروه دوم روش‌های فیلتری، رویکرد بیز را دنبال نمی‌کنند. فیلترهای NLM^6 [۱۱]، تنظیم تغییرات کلی (TV)^۷ [۱۲]، PPB^8 [۱۳] و $BM3D^9$ [۱۴] در این گروه جای دارد. فیلترهای کاهش نویز می‌تواند روی تصویر یا تبدیلی از تصویر در یکی از حوزه‌های تبدیل مانند فوریه [۱۵]، موجک^{۱۰} [۱۶] و لگاریتم [۱۷] اعمال شود.

صرف نظر از روشی که برای کاهش نویز لکه استفاده شود، باید ویژگی‌های ساختاری (مانند لبه‌ها، خطوط باریک و اهداف نقطه‌ای) و بافت تصویر (مانند جنگل و دشت‌های ناهموار) تا حد امکان حفظ شود. همچنین لازم است میانگین محلی بازتاب پذیری راداری^{۱۱} به دقت حفظ شود و از تفکیک پذیری تصویر کاسته نشود [۹]. برای دستیابی به این کارایی، رویکردهای مرسوم کاهش نویز لکه به داده‌ای با نرخ زیاد نیاز دارند که پهنای باند ارسال، فضای ذخیره‌سازی داده و در نتیجه پیچیدگی سخت‌افزار را افزایش می‌دهد.

به تازگی، کاربرد حسگری فشرده (CS)^{۱۲} در پردازش سیگنال و داده رادار توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب نموده است. حسگری فشرده، اندازه‌گیری‌های لازم از یک سیگنال نامعلوم را کمینه کرده و با داشتن این اندازه‌گیری‌ها، سیگنال را با احتمال خطای کم، بازسازی می‌کند. مسأله اصلی CS، بازیابی تقریبی بردار تنک $x \in R^N$ ، از تعداد محدودی اندازه‌گیری خطی $y = Bx$ است که $B \in R^{M \times N}$ و $M \ll N$. به نظر می‌رسد بازیابی x به دلیل

¹ Improved MultiLook

² Bayesian

³ Enhanced Lee

⁴ Frost

⁵ Γ -Maximum A-Posteriori

⁶ Non-Local Mean

⁷ Total Variation regularization

⁸ Probabilistic Patch-Based

⁹ Block Matching 3D

¹⁰ Wavelet

¹¹ Radar reflectivity

¹² Compressed Sensing

¹³ Restricted Isometry Property

¹⁴ Contourlet

می‌شود. سرانجام، در بخش ۵، نتیجه‌گیری مقاله انجام می‌گیرد.

۲. مدل‌سازی سیگنال و نویز

یک سامانه SAR با سکوی هواپایه را در مود تصویربرداری نواری^۱ در نظر بگیرید. البته روش پیشنهادی این مقاله را می‌توان به سادگی برای دیگر مدهای کاری SAR، تعمیم داد. همچنان که سکوی رادار با سرعت ثابت v_r در جهت سمت حرکت می‌کند، نواری از صحنه مورد نظر توسط پرتو آنتن رادار، جارو می‌شود. فرض کنید سیگنال LFM^۲ با فرکانس حامل f_0 و نرخ تغییر فرکانس K_r و زمان تکرار پالس T_r به سوی منظره مورد نظر ارسال شده و بازتاب‌های آن توسط رادار جمع‌آوری شود. در این بخش، ابتدا مدلی خطی برای بازتاب‌های دریافتی در حالت بدون نویز به دست می‌آید. سپس چگونگی پدید آمدن نویز لکه مرور می‌شود و یک مدل نویز جمع‌شونده برای آن معرفی می‌گردد. سرانجام، مدل خطی داده SAR با در نظر گرفتن نویز لکه، کامل می‌شود.

اگر نوار تصویر از N_c سلول تفکیک‌پذیری جداگانه در صفحه برد-سمت تشکیل شده باشد، سیگنال بازتابی از سلول i ام در باند پایه عبارت است از [۱۹]:

$$s_r^{(i)}(\tau, \eta) = \sigma_i w_r\left(\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c}\right) p_a^2(\eta) \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_i(\eta)}{c} + j\pi K_r \left(\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c}\right)^2\right) \quad 1 \leq i \leq N_c \quad (1)$$

که τ زمان برد، η زمان سمت، c سرعت انتشار نور، $w_r(\eta)$ پوش سیگنال در برد، $p_a(\eta)$ الگوی آنتن در سمت، σ_i ضریب بازتاب سلول i ام و $R_i(\eta)$ برد رادار تا مرکز سلول i ام است که با حرکت در راستای سمت با زمان تغییر می‌کند و برد مایل نامیده می‌شود. برد مایل، پوش سیگنال در برد و الگوی آنتن سمت با روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$R_i(\eta) = \sqrt{R_0^2 + v_r^2 \eta^2} \quad (2)$$

$$w_r(\tau) = \text{rect}(\tau/T_r) \quad (3)$$

$$p_a(\eta) = \text{sinc}\left(\frac{0.886\theta(\eta)}{\theta_a}\right) \quad (4)$$

که R_0 کمترین برد رادار تا مرکز سلول i ام، θ_a پهناي پرتو سمت آنتن و $\theta(\eta)$ زاویه لحظه‌ای خط برد مایل تا خط دید^۳ آنتن است. سیگنال دریافتی در لحظه (τ, η) با در نظر گرفتن بازتاب همه سلول‌های نوار تصویر به دست می‌آید:

$$s_r(\tau, \eta) = \sum_{i=1}^{N_c} s_r^{(i)}(\tau, \eta) = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i w_i(\tau, \eta) \quad (5)$$

که

$$w_i(\tau, \eta) = w_r\left(\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c}\right) p_a^2(\eta) \exp\left(-4\pi f_0 \frac{R_i(\eta)}{c} + \pi K_r \left(\tau - \frac{2R_i(\eta)}{c}\right)^2\right)$$

سامانه SAR از سیگنال رابطه (۵) نمونه‌برداری کرده و نمونه‌ها را برای پردازش و تشکیل تصویر در حافظه مناسب ذخیره می‌کند. اگر N_r نمونه در راستای برد و N_a نمونه در راستای سمت برداشته شود، سیگنال رابطه (۵) را می‌توان در حوزه دیجیتال به صورت ماتریسی زیر نشان داد:

$$\mathbf{s} = \mathbf{A}\boldsymbol{\sigma} \quad (6)$$

که

$$\mathbf{s} = [s_r^{(1,1)}, \dots, s_r^{(1,N_r)}, s_r^{(2,1)}, \dots, s_r^{(N_a, N_r)}]^T$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_N]^T, \mathbf{a}_i = [w_i^{(1,1)}, \dots, w_i^{(N_a, N_r)}]^T$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N_c}]^T$$

در رابطه (۶)، \mathbf{s} بردار $N_c \times 1$ داده‌خام، $N_c = N_r N_a$ ، $\{w_i^{(k,l)}\}_{k=1, \dots, N_a, l=1, \dots, N_r}$ و $\{s_r^{(k,l)}\}_{k=1, \dots, N_a, l=1, \dots, N_r}$ به ترتیب نمونه‌های سیگنال‌های $s_r(\tau, \eta)$ و $w_i(\tau, \eta)$ است. همچنین σ بردار ضرایب بازتاب سطح و \mathbf{A} ماتریس سامانه SAR با ابعاد $N_c \times N_c$ است.

رابطه (۶)، مدل خطی داده رادار دهانه ترکیبی در حالت ایده‌آل (بدون نویز) است. در عمل، هر سلول از چندین نقطه پراکنش با توزیع تصادفی تشکیل شده است. ضریب بازتاب کلی که در مقدار بازتاب هر سلول نقش دارد، از جمع بازتاب هر یک از نقاط پراکنش آن سلول حاصل می‌شود. به دلیل اختلاف فاز نسبی بازتاب نقاط پراکنش هر سلول، جمع همدوس بازتاب‌ها، مقداری کمتر از انتظار (تأثیری مخرب) یا بیشتر از انتظار (تأثیری سازنده) به دست می‌دهد. این پدیده موجب نوسان در مقادیر پیکسل‌های تصویر نهایی می‌شود که آن را نویز لکه می‌نامند. تأثیر این نویز برای هر پیکسل با یک مدل ضرب‌شونده بیان می‌گردد [۶]:

$$I = \sigma \tilde{n} \quad (7)$$

که در آن، I شدت‌روشنایی^۱ (مجذور دامنه) پیکسل، \tilde{n} نویز لکه با توزیع تصادفی نمایی با میانگین و واریانس واحد و σ ضریب بازتاب سلول تفکیک‌پذیری نظیر پیکسل تصویر است. با بازنویسی رابطه (۷) می‌توان نویز لکه را به صورت نویزی جمع‌شونده و وابسته به سیگنال نمایش داد [۲۵]:

$$I = \sigma \tilde{n} = \sigma + \sigma \tilde{n} - \sigma = \sigma + \sigma(\tilde{n} - 1) \triangleq \sigma + \bar{n} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن مدل جمع‌شونده نویز لکه در ضریب بازتاب هر یک از سلول‌های سطح، مدل داده نویزی SAR با استفاده از رابطه (۶) چنین نوشته می‌شود:

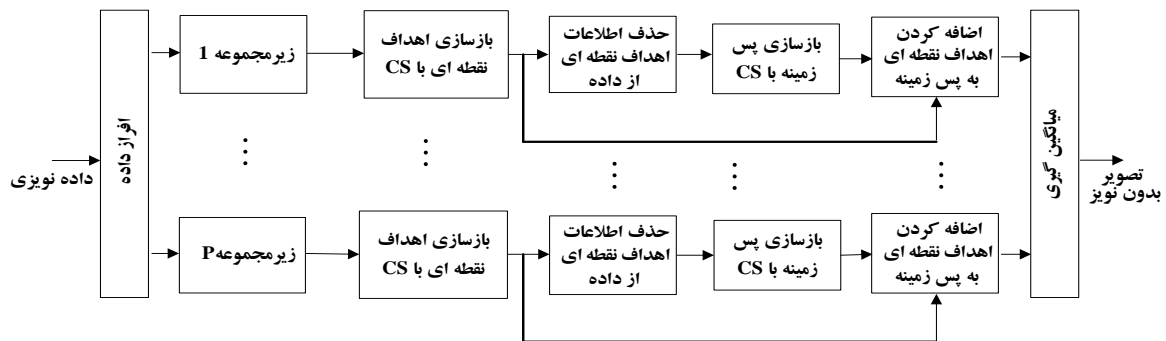
$$\mathbf{s} = \mathbf{A}\boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{n}} \quad (9)$$

^۱ Stripmap

^۲ Linear Frequency Modulated

^۳ Boresight

نقطه‌ای درخشان را می‌توان در حوزه تصویر و پس‌زمینه را در حوزه‌های رایج دیگر مانند فوریه و موجک، تنک فرض کرد [۲۶]. از سوی دیگر، حسگری فشرده قادر است سیگنال را در فضای تنک بازسازی کند. بنابراین در روش پیشنهادی، اهداف نقطه‌ای و پس‌زمینه بر اساس حوزه‌ای که در آن تنک هستند، جداگانه بازسازی می‌شوند. شکل ۱ نمودار بلوکی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار بلوکی روش پیشنهادی

می‌شود: الف) در بازسازی اهداف نقطه‌ای درخشان و پس‌زمینه بر اساس مدل داده رابطه (۹) که نويز را شامل می‌شود. ب) در میانگین‌گیری تصاویر بازسازی شده زیرمجموعه‌ها.

بازسازی تصویر نظیر هر زیرمجموعه، به معنی یافتن بردار ضرایب بازتاب سطح σ یا تقریبی از آن با داشتن داده خام آن زیرمجموعه است. در بحث حسگری فشرده، فرض بر این است که حداقل یک فضای تبدیل وجود دارد که در آن، بردار σ نمایشی تنک دارد. به عبارتی فرض می‌شود که می‌توان بردار σ را در فضای تبدیل چنین نمایش داد:

$$\sigma = \Psi \alpha \quad (11)$$

که Ψ ، ماتریس نمایش یا پایه و α بردار ضرایب تبدیل نامیده می‌شود. α نمایش تنک بردار σ است و تنها K مؤلفه آن غیر صفر است. K مرتبه تنکی بردار α و $K \ll N_c$ است. با جایگذاری (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۹) می‌توان نوشت:

$$s_i = \Phi_i s = \Phi_i A \sigma + \Phi_i \bar{n} = \Phi_i A \Psi \alpha + n \quad (12)$$

که s_i بردار نمونه‌های زیرمجموعه i ام و $n \triangleq \Phi_i \bar{n}$ بردار نويز این نمونه‌ها هستند. تعداد درایه‌های s_i می‌تواند بسیار کمتر از تعداد مؤلفه‌های سیگنال مشاهده s باشد. در این صورت بر اساس قضایای حسگری فشرده، بازسازی بردار σ با داشتن تعداد اندکی نمونه موجود در بردار s_i امکان‌پذیر است. اما اهدافی که در تصویر SAR وجود دارند، در حوزه‌ای یکسان، تنک نیستند. اهداف نقطه‌ای در حوزه تصویر (فضا) و اهداف پس‌زمینه در حوزه تبدیل

که \bar{n} برداری $1 \times N_c$ شامل مؤلفه‌های نويز وابسته به سیگنال است.

۳. روش پیشنهادی

در این بخش، روشی برای کاهش نويز لکه بر اساس نظریه حسگری فشرده پیشنهاد می‌گردد. این روش، کاهش نويز را همراه با بازسازی تصویر انجام می‌دهد. در تصاویر واقعی SAR علاوه بر پس‌زمینه، معمولاً تعدادی هدف نقطه‌ای درخشان ناشی از نقاط پراکنش گوشه‌ای، ساختمان‌ها یا وسایل نقلیه وجود دارد. اهداف

ابتدا داده نويزی یا مجموعه کامل نمونه‌ها با نمونه‌برداری معمولی SAR از منظره مورد نظر جمع‌آوری می‌شود (رابطه (۹)). سپس این مجموعه به چند زیرمجموعه تنک افراز می‌شود. افراز داده را می‌توان معادل ضرب یک ماتریس مناسب در بردار داده رابطه (۹) دانست. بنابراین زیرمجموعه i ام چنین به‌دست می‌آید:

$$s_i = \Phi_i s, \quad i = 1, \dots, N_s \quad (10)$$

که Φ_i ، ماتریس $N_c \times M$ اندازه‌گیری برای زیرمجموعه i ام، M تعداد نمونه‌های هر زیرمجموعه با شرط $M \leq N_s$ و N_s بیانگر تعداد زیرمجموعه‌ها است. هر زیرمجموعه به عنوان سیگنال مشاهده^۱ در بلوک بازسازی اهداف نقطه‌ای استفاده می‌شود تا تصویری از اهداف نقطه‌ای در هر زیرمجموعه به‌دست آید. سپس اطلاعات اهداف نقطه‌ای از داده هر زیرمجموعه حذف می‌شود تا داده مناسب برای بازسازی پس‌زمینه فراهم شود. در هر زیرمجموعه به کمک CS، تصویری از پس‌زمینه تشکیل می‌شود. پس از آن، اهداف نقطه‌ای هر زیرمجموعه به تصاویر پس‌زمینه نظیر، افزوده می‌شوند. اکنون، به ازای هر زیرمجموعه داده، تصویری از منظره به‌دست آمده است. سرانجام، میانگین ناهمدوس این تصاویر محاسبه می‌شود تا تصویر نهایی منظره با نويز کاهش‌یافته تشکیل گردد.

در روش پیشنهادی شکل ۱، نويز لکه در دو گام کاهش داده

¹ Intensity

² Observation

حسگری فشرده برای یافتن بردار تنک α_p یا همان تشکیل تصویر اهداف نقطه‌ای برای زیرمجموعه α_m را بیان می‌کند. در این رابطه تعداد مجهولات (ضرایب بازتاب سطح در فضای تنک) از تعداد معادلات یا تعداد نمونه‌های داده‌خام (در زیرمجموعه α_m) بیشتر است. به جای حل (۱۶) برای یافتن بردار تنک α_p ، حل مسائل بهینه‌سازی محدب معادل، پیشنهاد شده است که یکی از متداولترین آنها عبارت است از [۲۷]:

$$\hat{\alpha}_{pi} = \operatorname{argmin} \|\alpha_p\|_1 \quad (18)$$

subject to $\|S_i - \Theta_{pi}\alpha_p\|_2 \leq \varepsilon_1$

که $\|\alpha_p\|_1 = \sum_j |\alpha_{p,j}|$ ، مؤلفه $\alpha_{p,j}$ از بردار α_p و ε_1 ضریبی ثابت برای در نظر گرفتن اثر نویز n' است.

برای حل مسأله بهینه‌سازی (۱۸) الگوریتم‌های گوناگون مانند پیگیری پایه‌ای^۱ [۲۹]، تکرارشونده حریص^۲ [۳۰] و آستانه‌ای^۳ [۳۱] ارائه شده است. در این مقاله الگوریتم حریص^۴ OMP [۳۲] به عنوان یکی از الگوریتم‌های شناخته شده در CS استفاده می‌شود. این الگوریتم یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های تکرارشونده با دقت و سرعت بالا است که در هر گام، تنها یکی از مؤلفه‌های سیگنال را تخمین می‌زند. با اجرای الگوریتم بازسازی برای نمونه‌های هر زیرمجموعه و جستجو برای مؤلفه‌های تنک سیگنال در فضای تنک، مؤلفه‌های مربوط به نویز کاهش می‌یابد و در هر زیرمجموعه، تصویری از منظره با نویز کمتر به دست می‌آید.

۲-۳. بازسازی پس‌زمینه

پس از بازسازی اهداف نقطه‌ای در هر زیرمجموعه، می‌توان اطلاعات این اهداف را از بردار نمونه‌های هر زیرمجموعه حذف کرد تا تنها اطلاعات اهداف پس‌زمینه به همراه نویز باقی بماند. اگر بردار $\hat{\alpha}_{pi}$ ضرایب بازتاب تخمینی اهداف درخشان برای زیرمجموعه α_m باشد، با ضرب ماتریس‌های Φ_i و A در این بردار و تفاضل حاصل ضرب از بردار نمونه‌های زیرمجموعه α_m (رابطه (۱۴)) می‌توان نوشت:

$$s_{i,bg} = \Phi_i A \sigma_{bg} + \Phi_i A (\sigma_p - \hat{\alpha}_{pi}) + n \quad (19)$$

با فرض اینکه الگوریتم بازسازی، اهداف نقطه‌ای درخشان را با دقت خوبی تخمین زده است، $\hat{\alpha}_{pi}$ به σ_p خیلی نزدیک است و بردار $\sigma_p - \hat{\alpha}_{pi}$ مؤلفه‌های کوچکی دارد؛ در نتیجه می‌توان عبارت $\Phi_i A (\sigma_p - \hat{\alpha}_{pi}) + n$ در رابطه (۱۹) را معادل نویز n'' در نظر گرفت. در این صورت (۱۹) چنین نوشته می‌شود:

$$s_{i,bg} = \Phi_i A \sigma_{bg} + n'' \quad (20)$$

تنک هستند؛ بنابراین باید این اهداف را جداگانه بازسازی کرد. برای این کار، در روش پیشنهادی بردار ضرایب بازتاب پیکسل‌های سطح در حوزه فضا به دو بردار جدا از هم تقسیم می‌شود:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_{bg} \quad (13)$$

که σ_p شامل اهداف نقطه‌ای و σ_{bg} شامل اهداف پس‌زمینه‌ای است. از آنجا که مقدار پیکسل‌های اهداف نقطه‌ای از مقدار پیکسل‌های پس‌زمینه بسیار بزرگتر است، در روش پیشنهادی ابتدا اهداف نقطه‌ای بازسازی می‌شود.

۱-۳. بازسازی اهداف نقطه‌ای درخشان

جایگزینی رابطه (۱۳) در (۱۲) نتیجه می‌دهد:

$$s_i = \Phi_i A \sigma_p + \Phi_i A \sigma_{bg} + n \quad (14)$$

چون مقادیر بردار σ_{bg} نسبت به بردار σ_p بسیار کوچکتر است، برای یافتن اهداف نقطه‌ای، عبارت $\Phi_i A \sigma_{bg} + n$ در (۱۴) معادل نویز n' در نظر گرفته می‌شود. همچنین بردار σ_p با استفاده از (۱۱) در فضای تبدیل به صورت $\sigma_p = \Psi_p \alpha_p$ نمایش داده می‌شود؛ بنابراین می‌توان رابطه (۱۴) را چنین بازنویسی کرد:

$$\Phi_i A \sigma_p + n' = \Phi_i A \Psi_p \alpha_p + n' \quad (15)$$

در این رابطه ماتریس‌های Φ_i و A مشخص است. علاوه بر این، چون اهداف نقطه‌ای درخشان در حوزه فضا تنک هستند، $\Psi_p = I$ انتخاب می‌شود، در نتیجه رابطه (۱۵) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$s_i = \Phi_i A \alpha_p + n' = \Theta_{pi} \alpha_p + n' \quad (16)$$

که $\Theta_{pi} = \Phi_i A$ ماتریس حسگری زیرمجموعه α_m برای اهداف نقطه‌ای نامیده می‌شود. برای بازسازی اهداف نقطه‌ای، لازم است بردار α_p در (۱۶) با استفاده از CS به دست آید. حسگری فشرده در صورتی می‌تواند این بردار را به درستی بازسازی کند که علاوه بر تنک بودن آن، تعداد نمونه‌هایش به اندازه کافی باشد و ماتریس حسگری Θ_{pi} هم شرط RIP را داشته باشد. شرط RIP برای ماتریس Θ_{pi} عبارت است از [۲۷]:

$$(1 - \delta_K) \|x\|_2 \leq \|\Theta_{pi} x\|_2 \leq (1 + \delta_K) \|x\|_2 \quad (17)$$

$$(0 \leq \delta_K < 1, \quad K > \|x\|_0)$$

که δ_K کوچکترین ثابتی است که به ازای آن، رابطه بالا برای هر بردار تنک x هم مرتبه با α_p برقرار است. $\|x\|_0$ برابر با تعداد مؤلفه‌های غیر صفر بردار x و $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_j |x_j|^2}$ است که x_j مؤلفه j ام این بردار است. با توجه به اینکه ماتریس Φ_i در این مقاله طوری انتخاب شده است که نمونه‌های داده‌خام را تصادفی انتخاب می‌کند، شرط RIP به ازای هر ماتریس پایه‌ای همواره برقرار است [۲۸].

با فرض برقرار بودن شرایط بالا، رابطه (۱۶)، دستگاه معادلات

¹ Basis Pursuit

² Greedy

³ Thresholding

⁴ Orthogonal Matching Pursuit

۴-۱. معیارهای ارزیابی

معیارهای گوناگونی برای ارزیابی روش‌های کاهش نویز لکه معرفی شده است [۳۴]. در این مقاله معیارهای رایج MSE^2 ، ENL^3 و EI^4 برای مقایسه کارایی روش‌ها به کار می‌رود.

• میانگین مربع خطا (MSE)

میانگین مربع خطا را می‌توان چنین بیان کرد:

$$MSE = \frac{1}{PQ} \sum_{n=1}^Q \sum_{m=1}^P |x_{m,n} - \hat{x}_{m,n}|^2 \quad (24)$$

که $x_{m,n}$ و $\hat{x}_{m,n}$ به ترتیب پیکسل‌های نظیر در سطر m ام و ستون n ام ماتریس تصاویر بدون نویز و نویززدایی شده و P و Q به ترتیب تعداد کل سطرها و ستون‌های این ماتریس‌ها است. محاسبه این معیار به یک تصویر مرجع یا بدون نویز نیاز دارد. هر چه MSE کوچکتر باشد، تصویر نویززدایی شده به تصویر بدون نویز شبیه‌تر است [۳۴].

• تعداد معادل نگاه‌ها (ENL)

معیار ENL معادل نسبت سیگنال به نویز لکه است و برای یک پیکسل با شدت روشنایی I اینگونه تعریف می‌شود [۳۴].

$$ENL = \frac{E^2\{I\}}{\text{var}\{I\}} \quad (25)$$

که $E\{I\}$ و $\text{var}\{I\}$ به ترتیب میانگین و واریانس آماری را نشان می‌دهد. برای محاسبه ENL ، به جای میانگین و واریانس آماری یک پیکسل، میانگین و واریانس نقطه‌ای مجموعه‌ای از پیکسل‌های یک ناحیه همگن^۵ تصویر قرار داده می‌شود. هر چه ENL بزرگتر باشد، کاهش نویز بهتر انجام گرفته است.

• شاخص لبه (EI)

شاخص لبه (EI) برای ارزیابی جزئیات لبه‌های موجود در تصویر ارائه شده است:

$$EI = \frac{\sum_{n=1}^{Q-1} \sum_{m=1}^{P-1} |\hat{x}_{m+1,n+1} - \hat{x}_{m,n}|^2}{\sum_{n=1}^{Q-1} \sum_{m=1}^{P-1} |x_{m+1,n+1} - x_{m,n}|^2} \quad (26)$$

هر چه شاخص لبه به یک نزدیکتر باشد، محفوظ ماندن بیشتر لبه‌ها در هنگام نویززدایی نشان می‌دهد [۳۵].

۴-۲. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و برخی از روش‌های مهم کاهش نویز لکه در دو آزمایش، ارائه می‌گردد.

در این معادله ماتریس‌های Φ_i و A معلوم است. تصاویر SAR با اهداف پس‌زمینه در حوزه‌های فوریه و موجک نمایش تنک دارند [۲۷]. بنابراین ماتریس پایه Ψ_{bg} برای اهداف پس‌زمینه می‌تواند ماتریس معکوس فوریه یا ماتریس معکوس تبدیل موجک انتخاب شود. جایگزینی رابطه تبدیل در (۲۰) نتیجه می‌دهد:

$$s_{i,bg} = \Phi_i A \Psi_{bg} \alpha_{bg} + n'' = \Theta_{bgi} \alpha_{bg} + n'' \quad (21)$$

که α_{bg} بردار ضرایب تبدیل و $\Theta_{bgi} = \Phi_i A \Psi_{bg}$ ماتریس حسگری زیرمجموعه نام برای پس‌زمینه است.

اکنون با توجه به اینکه ماتریس Φ_i در این مقاله طوری انتخاب شده است که نمونه‌های داده‌خام را تصادفی انتخاب می‌کند، شرط RIP برای ماتریس Θ_{bgi} نیز همواره برقرار است [۲۸]. در نتیجه، به شرط کافی بودن تعداد نمونه‌های زیرمجموعه نام، بردار α_{bg} را می‌توان با حل مسأله بهینه‌سازی زیر برای زیرمجموعه نام بازسازی کرد.

$$\hat{\alpha}_{bgi} = \underset{\alpha_{bg}}{\text{argmin}} \|\alpha_{bg}\|_1 \quad (22)$$

subject to $\|s_{i1} - \Theta_{bgi} \alpha_{bg}\|_2 \leq \varepsilon_2$

که ε_2 ، برای در نظر گرفتن اثر نویز n'' است. مسأله بهینه‌سازی (۲۲) مشابه (۱۸) است و در اینجا با الگوریتم OMP حل می‌شود. برای حفظ جزئیات تصاویر اهداف نقطه‌ای درخشان و پس‌زمینه در روش پیشنهادی، ε_1 و ε_2 روی مقادیر کوچک و ثابتی تنظیم می‌شوند.

پس از تخمین $\hat{\alpha}_{bgi}$ ، تصویر اهداف پس‌زمینه یا بردار $\hat{\sigma}_{bgi}$ از رابطه تبدیل $\hat{\sigma}_{bgi} = \Psi_{bg} \hat{\alpha}_{bgi}$ محاسبه می‌شود. تصویر SAR حاصل از زیرمجموعه نام، بردار مجموع $\hat{\sigma}_{bgi} + \hat{\sigma}_{pi}$ است. تصویر نهایی منظره با میانگین‌گیری تصاویر همه زیرمجموعه‌ها به دست می‌آید:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (\hat{\sigma}_{bgi} + \hat{\sigma}_{pi}) \quad (23)$$

۴. ارزیابی روش پیشنهادی

در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری روی تصاویر شبیه‌سازی شده و واقعی SAR بررسی می‌شود. همچنین روش‌های کاهش نویز IML [۵]، لی‌ارتقایافته [۸]، فروست [۹]، MAP - Γ [۱۰]، NLM [۱۱]، TV [۱۲]، PPB [۱۳]، BM3D [۱۴]، آستانه‌گذاری تبدیل موجک [۳۳] و BCS^1 [۲۲]، که یک روش مبتنی بر حسگری فشرده بلوکی است، شبیه‌سازی شده و کارایی آنها با کارایی روش پیشنهادی مقایسه می‌گردد.

² Mean Square Error

³ Equivalent Number of Looks

⁴ Edge Index

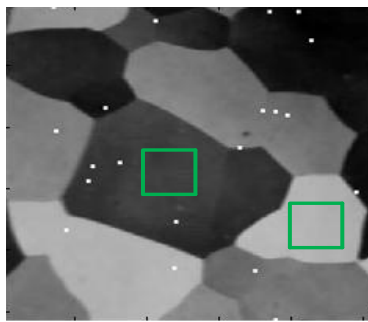
⁵ Homogeneous

¹ Block Compressed Sensing

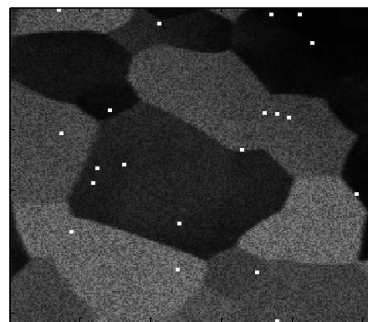
خروجی روش های $\Gamma - \text{MAP}$ و لی ارتقایافته قرار دارد.

جدول ۱. معیارهای MSE، ENL و EI روش های کاهش نویز لکه برای تصویر شبیه سازی شده

عنوان	ENL	MSE	I-EI
فروست	۳۱۴/۸۹۷۱	۰/۰۰۳۳	۰/۲۳۳۲
لی ارتقایافته	۲۵۲/۷۸۳۸	۰/۰۰۱۱	۰/۰۶۱۳
BM3D	۴۵۲/۳۱۶۴	۰/۰۰۳۷	۰/۴۱۰۱
$\Gamma - \text{MAP}$	۳۲۱/۸۰۰۶	۰/۰۰۱۵	۰/۲۶۲۵
TV	۴۴۸/۷۲۳۰	۰/۰۰۳۰	۰/۴۴۱۹
NLM	۴۸۸/۱۱۳۱	۰/۰۰۳۸	۰/۴۳۲۸
IML	۱۰۸/۷۹۷۵	۰/۰۰۳۷	۰/۸۴۸۲
PPB	۴۲۲/۲۹۳۲	۰/۰۰۳۷۷	۰/۲۰۲۳
آستانه گذاری موجک	۳۲۷/۸۰۹۸	۰/۰۰۳۹۳	۰/۳۱۰۶
BCS	۴۳۰/۲۵۴۱	۰/۰۰۲۸۳	۰/۴۸۴۳
روش پیشنهادی	۵۱۹/۸۷۸۴	۰/۰۰۲۹	۰/۱۶۸۱



(الف)



(ب)

شکل ۲. تصاویر شبیه سازی شده: الف) بدون نویز، ب) با نویز لکه

❖ آزمایش ۲

در این آزمایش از دو تصویر واقعی SAR با نویز لکه ذاتی استفاده می شود. تصویر شکل ۳-الف با ابعاد ۲۵۶×۱۲۸ پیکسل با تفکیک پذیری $۱۲/۵\text{m}$ توسط ماهواره ERS و تصویر شکل ۳-ب با ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ پیکسل با تفکیک پذیری ۱m توسط ماهواره TerraSAR-X به دست آمده است. داده خام این تصاویر بر اساس شبیه سازی های [۳۷] تهیه شده است. از آنجا که برای تصاویر واقعی این آزمایش، تصاویر بدون نویز (دامنه ضرایب بازتاب)، در دسترس نیست، معیارهای MSE و EI را نمی توان به کار برد.

آزمایش اول برای یک تصویر شبیه سازی شده و آزمایش دوم برای دو تصویر واقعی SAR انجام شده است. در آزمایش ها، روش پیشنهادی از دو زیرمجموعه استفاده می کند که هر یک، ϵ_1 و ϵ_2 به ترتیب برابر با $0/1$ و $0/0/1$ فرض شده است. ماتریس های تبدیل اهداف نقطه ای و پس زمینه ای به ترتیب، ماتریس همانی و ماتریس معکوس فوری انتخاب شده است. در شبیه سازی روش های وفقی (لی ارتقایافته، فروست، $\Gamma - \text{MAP}$) یک پنجره 7×7 به کار رفته و برای روش های مبتنی بر تبدیل موجک (BM3D، BCS) آستانه گذاری تبدیل موجک، از موجک هار^۱ و سطح تجزیه ۲، استفاده شده است. در شبیه سازی IML، پنجره های همینگ با ۵۰ درصد همپوشانی، ۳ نگاه طولانی و ۷ نگاه کوتاه به کار رفته است. شبیه سازی روش BCS با ابعاد بلوک 16 و نرخ نمونه برداری $0/98$ اجرا شده است. در BCS، تبدیل پایه نیز، ماتریس موجک است. پارامترهای دیگر این روش ها بر اساس مرجع اصلی آنها انتخاب می شود.

❖ آزمایش ۱

در این آزمایش، روش های کاهش نویز لکه برای یک تصویر شبیه سازی شده با ابعاد 256×256 پیکسل اجرا می شود. داده خام با استفاده از شبیه سازی های [۳۶] تهیه شده است. برای افزودن نویز لکه، 1000 نقطه پراکنش در هر پیکسل در نظر گرفته شده است. دامنه بازتاب این نقاط پراکنش برابر با مقدار پیکسل و فاز آنها به صورت تصادفی با یک توزیع یکنواخت در $[0 - 2\pi]$ انتخاب شده است. در پایان، تصویر نویزی با عبور داده نویزی از الگوریتم برد-داپلر (RDA^2) به دست می آید. از داده خام تهیه شده در شبیه سازی IML و روش پیشنهادی و از تصویر نویزی در شبیه سازی سایر روش های کاهش نویز استفاده شده است.

جدول ۱، روش های کاهش نویز را بر اساس معیارهای MSE، ENL و EI با یکدیگر مقایسه می کند. نتایج این جدول، میانگین پنج بار اجرای مستقل هر روش است. برای تصویر خروجی هر روش، مقدار ENL در نواحی مشخص شده با مربع سبز رنگ در شکل ۲-الف محاسبه و میانگین گیری شده است. مقادیر معیارها برای تصویر نویزی شکل ۲-ب نیز محاسبه شده است که عبارتند از: $\text{EI}=2/4609$ و $\text{ENL}=20/17$ ، $\text{MSE}=0/0399$.

مقادیر ENL در جدول ۱ نشان می دهد که کاهش نویز لکه در روش پیشنهادی بهتر از روش های دیگر انجام گرفته است. از نظر شاخص لبه، روش پیشنهادی پس از روش لی ارتقایافته کمترین مقدار $|I-EI|$ را دارد و لبه های تصویر را به خوبی حفظ می کند. همچنین با توجه به مقادیر MSE در جدول ۱، تصویر خروجی روش پیشنهادی از دید تطابق با تصویر بدون نویز، پس از تصاویر

¹ Haar

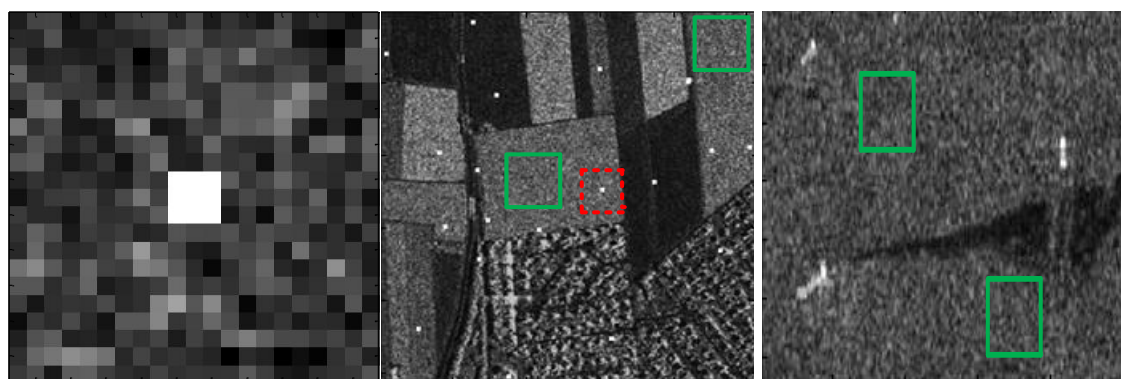
² Range Doppler Algorithm

واقعی TerraSAR-X، $ENL=16/3054$ و برای تصویر واقعی ERS، $ENL=12/9550$ است. مقادیر ENL در جدول ۲ نشان می‌دهد که اگر چه فیلترهای غیربیزی مقدار ENL بالایی دارند، اما بیشترین ENL برای روش پیشنهادی به دست آمده است.

در جدول ۲ تعداد معادل نگاه‌ها (ENL) برای تصاویر خروجی روش‌ها آمده است. نتایج این جدول، میانگین پنج بار اجرای مستقل هر روش است. مقدار ENL در نواحی سبز رنگ نشان داده شده در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) و برای تصویر خروجی هر روش محاسبه و میانگین‌گیری شده است. همچنین، برای تصویر

جدول ۲. معیار ENL روش‌های کاهش نویز لکه برای تصاویر واقعی SAR

TerraSAR	ERS	روش
۷۶/۱۷۲۴	۲۷۰/۳۷۷۶	فروست
۸۶/۹۵۰۸	۳۳۵/۶۷۲۵	لی‌ارتقایافته
۸۹/۸۷۱۴	۵۰۶/۴۵۲۶	BM3D
۷۹/۹۷۳۳	۳۷۲/۶۲۰۴	Γ - MAP
۷۳/۳۹۳۰	۴۹۵/۳۴۱۰	TV
۹۲/۰۰۳۸	۳۹۳/۲۷۷۰	NLM
۶۵/۱۰۸۴	۸۷/۸۲۳۰	IML
۸۳/۰۴۶۴	۴۳۹/۸۸۳۷	PPB
۷۷/۵۶۷۹	۲۰۷/۷۷۳۰	آستانه‌گذاری موجک
۸۰/۰۵۱۴	۴۶۹/۷۲۵۶	BCS
۹۵/۲۰۴۶	۵۱۹/۲۵۵۲	روش پیشنهادی



(ج)

(ب)

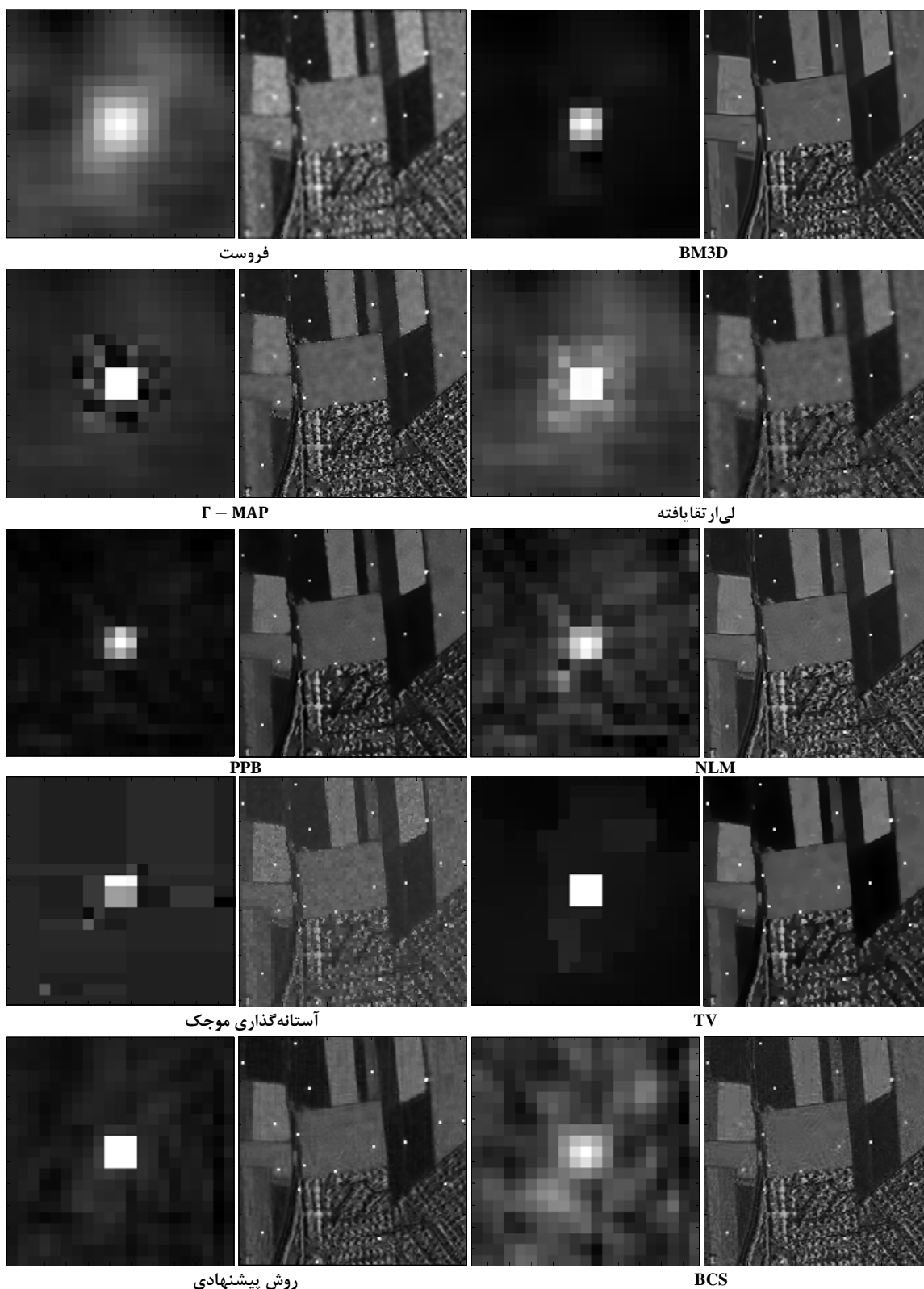
(الف)

شکل ۳. تصاویر واقعی : (الف) تصویر ERS، (ب) تصویر TerraSAR-X، (ج) درشت‌نمایی یک هدف نقطه‌ای از تصویر TerraSAR-X

نقطه‌چین قرمز رنگ مشخص شده است.

شکل ۴، تصویر TerraSAR-X و هدف نقطه‌ای درشت‌نمایی شده آن را از نویززدایی با روش‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که روش‌های آستانه‌گذاری موجک، تنظیم TV و BCS در نواحی همگن تصویر و روش‌های Γ - MAP و لی‌ارتقایافته در نواحی ناهمگن تصویر، نویز را به خوبی حذف کرده‌اند. در حالی که فیلترهای غیرمحلی و روش پیشنهادی در هر دو ناحیه تصویر در کاهش نویز، کارایی مناسبی دارند.

در تصویر ERS، دامنه پیکسل‌های نفت‌کش و کشتی‌های دیگر، حدود دو برابر پیکسل‌های پس‌زمینه‌ای (شامل اقیانوس و نفت نشت‌یافته) است و می‌توان آنها را اهداف نقطه‌ای فرض کرد. برای مقایسه بهتر روش‌ها، به تصویر TerraSAR-X، چند هدف نقطه‌ای با دامنه دو برابر پس‌زمینه و با ابعاد ۳ پیکسل در مکان‌های تصادفی، اضافه شده است. این نقاط در شکل ۳-ب دیده می‌شود. شکل ۳-ج درشت‌نمایی یکی از اهداف نقطه‌ای را نشان می‌دهد. این هدف در تصویر شکل ۳-ب با یک مربع



شکل ۴. تصویر خروجی روش‌های کاهش نویز لکه برای تصویر TerraSAR-X و یک هدف نقطه‌ای آن

پیکسل‌های اطراف هدف و روش‌های غیربیزی و BCS در مقدار پیکسل‌های هدف اعوجاج ایجاد کرده‌اند. روش فروست هدف نقطه‌ای را در پیکسل‌های همسایه پخش کرده است و در خروجی

تصاویر هدف نقطه‌ای نشان می‌دهد که اگر چه روش‌های لی ارتقایافته و غیربیزی توانسته‌اند هدف نقطه‌ای را حفظ کنند، روش‌های $\Gamma - MAP$ و لی ارتقایافته در مقدار

- Prentice Hall, 1993.
- [8] A. Lopès, R. Touzi, and E. Nezry, "Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 6, pp. 992-1000, 1990.
- [9] A. Rajamani and V. Krishnaveni, "Performance Analysis Survey of various SAR Image Despeckling Techniques," International Journal of Computer Applications, Vol. 90, No. 7, pp. 5-17, 2014.
- [10] A. Lopès, E. Nezry, R. Touzi, and H. Laur, "Maximum A Posteriori Speckle Filtering and First Order Texture Models in SAR Images," In Proc. of the IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp., 1990, 2409-2412.
- [11] A. Buades, B. Coll, and J. M. Morel, "A Non-Local Algorithm for Image Denoising," In Proc. of the IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, 60-65.
- [12] G. Aubert and J. Aujol, "A Variational Approach to Removing Multiplicative Noise," SIAM Journal on Applied Mathematics, Vol. 68, No. 4, pp. 925-946, 2008.
- [13] C. A. Deledalle, L. Denis and F. Tupin, "Iterative Weighted Maximum Likelihood Denoising with Probabilistic Patch-Based Weights," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 18, No. 12, pp. 2661-2672, 2009.
- [14] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, "Image Denoising by Sparse 3D Transform-domain Collaborative Filtering," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 16, No. 8, pp. 2080-2095, 2007.
- [15] E. O. Brigham and E. O. Brigham, "The Fast Fourier Transform and its Applications, Volume I, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
- [16] A. Khmag, A. R. Ramli, and S. A. R. Al-Haddad, Hashim, S. J. B., "Additive and Multiplicative noise Removal based on Adaptive Wavelet Transformation using Cycle Spinning," American Journal of Applied Sciences, Vol. 11, No. 2, pp. 316-328, 2014.
- [17] H. H. Arsenault and M. Levesque, "Combined Homomorphic and Local Statistics Processing for Restoration of Images Degraded by Signal Dependent Noise," Applied optics, Vol. 23, No. 6, pp. 845-850, 1984.
- [18] A. Y. Carmi, L. Mihaylovam, and S. J. Godsill, "Compressed Sensing and Sparse Filtering," New York: Springer, 2014.
- [19] J. Fang, Z. Xu, B. Zhang, W. Hong, and Y. Wu, "Fast Compressed Sensing SAR Imaging Based on Approximated Observation," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, pp. 1-12, 2014.
- [20] H. Li, H. Du and W. Mei, "A Speckle Suppression SAR Imaging Method Based on Compressive Sensing," In Proc. of the Int. Cong. Image and Signal Process., 2012, 283-287.
- [21] I. M. Chen, J. Yang, W. P. Wang, and B. Sun, "SAR Image Despeckling by Selective 3D Filtering of Multiple Compressive Reconstructed Images,"

روش آستانه‌گذاری، بخشی از پیکسل‌های هدف کمرنگ شده است. همچنین خروجی روش IML در جهتی که نگاه‌ها اعمال شده‌اند، تفکیک‌پذیری را از دست داده است. روش پیشنهادی، تفکیک‌پذیری را کاهش نداده و توانسته است هدف نقطه‌ای را مانند روش TV به‌خوبی حفظ کند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از نظریه جدید حسگری فشرده، روشی برای کاهش نویز لکه پیشنهاد شد. روش پیشنهادی، نویززدایی را توأم با تشکیل تصویر SAR انجام می‌دهد. بنابراین در مقایسه با روش‌های دیگر، پیچیدگی تشکیل تصویر را ندارد. نتایج ارزیابی روش پیشنهادی روی تصاویر شبیه‌سازی شده و واقعی SAR نشان می‌دهد که این روش می‌تواند با دریافت بخشی از داده، علاوه بر کاهش نویز، جزئیات تصویر را حفظ نموده و اهداف نقطه‌ای درخشان را به‌خوبی بازسازی کند و کارایی قابل مقایسه یا بهتری نسبت به روش‌های مرسوم که از تمام داده استفاده می‌کنند، ارائه دهد. همچنین، با افزایش تعداد زیرمجموعه‌ها می‌توان به نتایج بهتری دست یافت. با وجود این ویژگی‌ها، در روش‌های مبتنی بر CS بهبود کارایی در ازای افزایش پیچیدگی محاسباتی به‌دست می‌آید. اگر چه تاکنون پژوهش‌هایی برای کاهش پیچیدگی روش‌های مبتنی بر CS آغاز شده است، پژوهش‌های بیشتری را برای کاهش پیچیدگی می‌طلبند.

۶. مراجع

- [1] A. Moreira, P. Prats-iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," IEEE Geosci. Remote Sensing Mag., Vol. 1, No. 1, pp. 6-43, 2013.
- [2] J. W. Goodman, "Some Fundamental Properties of Speckle," Journal of the Optical Society of America, Vol. 66, No. 11, pp. 1145-1150, 1976.
- [3] S. Joseph, K. Balakrishnan, M. B. Nair, and R. R. Varghese, "Ultrasound Image Despeckling using Local Binary Pattern Weighted Linear Filtering," International Journal of Information Technology and Computer Science, Vol. 5, No. 6, pp. 1-9, 2013.
- [4] A. Moreira, "An Improved Multilook Technique to Produce SAR Imagery," In Proc. of the IEEE Int. radar conf., 1990, 57-63.
- [5] F. P. Devries, "Speckle Reduction in SAR Imagery by various Multi-look Techniques," Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), Report. FEL-96-A015, 1998.
- [6] F. Argenti, A. Lapini, and L. Alparone, "A Tutorial on Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images," IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 1, No. 3, pp. 6-35, 2013.
- [7] S. M. Kay, "Fundamentals of Statistical Processing," Volume I: Estimation Theory, Englewood Cliffs, NJ:

Simulated in MATLAB. Master's of Science Thesis in Geodesy Report," California polytechnic state university, San Luis Obispo, 2009.

Progress in Electromagnetics Research, Vol. 134, pp. 209-226, 2013.

- [22] H. Zhao, J. F. Lopez, S. Li, Y. Cao, and Z. Qiao, "Noise synthetic aperture radar (SAR) imagery compressing and reconstruction based on compressed sensing," In SPIE Defense, Security, and Sensing, Int. Soc. Optics and Photonics, pp. 87500N-87500N, May 2013.
- [23] L. Guo and X. Wen, "SAR Image Compression and Reconstruction based on Compressed Sensing," J. Inf. and Computational Sci., vol. 11, no. 2, pp. 573-579, 2014.
- [24] M. Cetin, I. Stojanovic, N. O. Onhon, K. Varshney, R. Samadi, S. Karl, W. C, and A. S. Willsky, "Sparsity-driven Synthetic Aperture Radar Imaging: Reconstruction, Auto-focusing, Moving Targets, and Compressed Sensing," IEEE Signal Process. Mag., vol. 31, no. 4, pp. 27-40, Jul. 2014.
- [25] A. Chatterjee and H. N. Moulick, "Image Filtering Noise Removal with Speckle Noise," Int. J. Ethics in Eng. Manage. Educ. (IJEEE), pp. 21-26, Mar. 2014.
- [26] S. Samadi, M. Çetin, and M. A. Masnadi-Shirazi, "Sparse Representation-based Synthetic Aperture Radar Imaging," IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 5, no 2, pp. 182-193, 2011.
- [27] S. Roucart, "Sparse Recovery Algorithms: Sufficient Conditions in terms of Restricted Isometry Constants," In Approximation Theory XIII: San Antonio 2010, Springer New York, pp. 65-77, 2012.
- [28] S. Uğur and O. Arkan, "SAR Image Reconstruction and Autofocus by Compressed Sensing," Digital Signal Process., vol. 22, no. 6, pp. 923-932, 2012.
- [29] S. S. Chen, D. L., Donoho, M. A. Saunders, "Atomic Decomposition by Basis Pursuit," SIAM Review, vol. 43, no. 1, pp. 129-159, 2001.
- [30] S. Bahmani, B. Raj, and P. T. Boufounos, "Greedy Sparsity-constrained Optimization," J. Mach. Learning Research, vol. 14, no.1, pp. 807-841, 2013.
- [31] T. Blumensath, M. Yaghoobi, and M. Davies, "Iterative Hard Thresholding and L0 Regularization," In Proc. IEEE int. conf. acoust. speech and signal process., pp. III-877-III-880, 2007.
- [32] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal Recovery From Random Measurements via Orthogonal Matching pursuit," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 53, no. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.
- [33] D. L. Donoho, "Denoising by Soft-Hresholding," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 41, no. 3, pp. 613-627, 1995.
- [34] M. Mansourpour, M. A. Rajabi, and J. A. R. Blais, "Effects and Performance of Speckle Noise Reduction Filters on Active Radar and SAR Images," Int. Soc. Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), pp. 14-16, Feb. 2006.
- [35] I. M. R. De Leeuw and L. M. T. D. Carvalho, "Performance Evaluation of several Adaptive Speckle filters for SAR imaging," Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), vol. 14, no. 2, pp. 7299-7305, Apr. 2009.
- [36] M. Schlutz, "Synthetic Aperture Radar Imaging

SAR Speckle Reduction and Image Reconstruction Using Compressed Sensing

A. Shafiei*, E. yazdian, M. Beheshti

Isfahan University of Technology

(Received: 10/06/2015, Accepted: 12/06/2016)

Abstract

Speckle noise seriously degrades the quality of SAR images and complicates the image exploitation using automated image analysis techniques. Recently, the application of compressed sensing (CS) is explored in the SAR signal processing. In this paper, first, a linear model is derived for speckled SAR data. Then, using this model and the compressed sensing theory, a speckle reduction method is proposed. In the proposed method, the image backgrounds as well as the bright point targets are also reconstructed together with noise reduction. The important feature of the proposed method is the joint noise reduction simultaneous with the SAR image formation. Moreover, using simulated and real SAR images, the performance of the proposed method in noise reduction and preserving image features is evaluated and compared to the performance of some de-noising approaches.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), Speckle, Image Reconstruction, Compressed Sensing (CS).

* Corresponding author E-mail: Ahmad.Shafiei@ec.iut.ac.ir