

حذف نویز سریع در تصویر SAR با استفاده از نمایش تنک

جواد عباسی آقاملکی^۱، استادیار؛ سید محمد مهدی موسوی شوشتری^۲، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه دامغان، j.a.ghamaleki@du.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، smmms@chmail.ir

چکیده: یکی از عوامل مخرب در تشخیص جزئیات صحنه از تصاویر رادار دهانه مصنوعی، وجود نویز لکه در تصاویر است. روش‌های مختلفی در حذف نویز تصویر با استفاده از تکنیک نمایش تنک ارائه شده‌اند که با حفظ جزئیات، نویز تصویر را به شکل مناسبی حذف می‌کنند. با توجه به حجم محاسبات این روش‌ها و ابعاد بزرگ تصاویر SAR، استفاده از آن‌ها در تصاویر SAR چالش‌برانگیز است. در این مقاله، روشی برای حذف نویز از تصاویر SAR، با استفاده از نمایش تنک ارائه شده که در آن، با حفظ کیفیت تصویر، زمان اجرا کاهش یافته است. در این روش، حذف نویز در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، ابتدا تصویر به کمک یک روش ساده حذف نویز اولیه می‌شود و در مرحله بعد، جزئیات حذف شده، به کمک تکنیک نمایش تنک بازیابی شده و به تصویر اضافه می‌شود. با توجه به اینکه در مرحله بازیابی، نیازی به باز پردازش نواحی همگن تصویر وجود ندارد، تنها جزئیات نواحی ناهمگن تصویر بازیابی می‌شود و با استفاده از ماتریس نمونه‌بردار تصادفی در فرایند باز سازی تصویر، حجم پردازش در استفاده از این تکنیک، کاهش می‌یابد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد این روش می‌تواند تصویری با کیفیت بهتر را در زمان حدود ۰/۲ روش‌های قبل ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: رادار دهانه مصنوعی (SAR)، نمایش تنک، حذف نویز، آموزش دیکشنری.

High-speed Noise Reduction in SAR Images Using Sparse Representation

J.A. Aghamaleki¹, Assistant Professor; M.M. Mousavi Shushtari², MSc

1- Faculty of Engineering Department, Damghan University, Damghan, Iran, Email: j.a.ghamaleki@du.ac.ir

2- Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: smmms@chmail.ir

Abstract: One of the destructive factors in denotation scene details from the Synthetic Aperture radar images is the presence of speckle noise in it. Different method of image denoising have been proposed using the Sparse Representation (SR) Technique, which, eliminates the noise of the image properly by preserving details. Because of the Computational Complexity of these methods and the large dimensions of SAR images, their use in SAR images is challenging. This paper presents a new method in SAR image denoising by SR that reduce run time with preservation of image quality. In this method, the denoising performs in two step. Firstly, the image is filtered using a simple denoising method, and the removed details is then retrieved using the SR technique and added to the filtered image. By retrieving details from the heterogeneous regions of the image and using random sampling matrix in reconstruction image, the processing volume and the required memory in using SR technique are reduced. Simulation results show that this method, with preservation of image quality, has an operating time of about 0.2 of other methods.

Keywords: Synthetic aperture radar (SAR), Sparse representation (SR), Denoising, Dictionary learning.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱

نام نویسنده مسئول: جواد عباسی آقاملکی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

رادار دهانه مصنوعی (SAR) نوعی از رادارهای تصویربردار است که به کمک آن از صحنه وسیع، تصاویری با قدرت تفکیک بالا ایجاد می‌شود. ایجاد تصاویری با قدرت تفکیک مناسب و از فاصله دور در شرایط مختلف جوی سبب شده تا تصاویر این رادار در کاربردهای نظامی و غیرنظامی گوناگون سنجش از دور استفاده شود [۱]. دقت تشخیص اهداف و جزئیات صحنه در این تصاویر، وابسته به کیفیت آن است. عوامل مختلفی در کیفیت تصویر SAR تأثیر دارند. از جمله این عوامل، حضور نویز در تصویر است. هر پیکسل تصویر، نشان‌دهنده مجموع سیگنال‌های مختلط بازتاب‌شده از پراکنده‌سازهای موجود در آن پیکسل است. به همین دلیل، اندازه و فاز هر پیکسل تصویر تحت تأثیر جمع مختلط سیگنال‌های بازگشتی، رفتاری نویزی دارد. این نویز به نام نویز لکه^۱ شناخته می‌شود و به دلیل ماهیت فیزیکی و تصویربرداری SAR، همواره در تصویر حضور دارد. با توجه به مکانیزم بازتاب پراکنده‌سازهای^۲ صحنه، نویز غالب تصاویر SAR، نویز لکه است [۲].

لذا مقالات زیادی با تمرکز بر حذف نویز لکه از تصویر SAR، روش‌هایی برای بهبود کیفیت این تصاویر ارائه کرده‌اند که می‌توان آن‌ها را در دو دسته کلی تقسیم بندی کرد.

در دسته اول، حذف نویز حین پردازش سیگنال و تشکیل تصویر انجام می‌شود. در این دسته، با استفاده از اطلاعات اندازه و فاز داده‌های جمع‌آوری شده، تأثیر عوامل کاهش کیفیت تصویر مانند هدف متحرک، حرکت سکو و نویز جبران‌سازی و اصلاح می‌شود [۳-۶]. به بیان دیگر، هدف این روش‌ها بالابردن تمرکز تصویر است. از جمله روش‌های متداول حذف نویز در این دسته، تکنیک پردازش چند نگاهه^۳ داده‌های جمع‌آوری شده است [۲]. در این روش با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده تعدادی تصویر از یک منطقه ایجاد می‌شود و با متوسط‌گیری روی تصاویر، حذف نویز انجام می‌شود. استفاده از این روش، نویز را به شکل مناسبی حذف می‌کند، اما در عوض به دلیل کوچک کردن حجم داده تصویرسازی، قدرت تفکیک تصویر افت می‌کند.

در دسته دوم، حذف نویز پس از تشکیل تصویر و روی اندازه تصویر اعمال می‌شود. در یک تقسیم‌بندی، روش‌های این دسته در حوزه تصویر یا حوزه تبدیل انجام می‌گیرند.

از جمله روش‌های حذف نویز در حوزه تصویر، استفاده از فیلترهای Lee, Frost, Bilateral و Γ -Map است [۷-۱۱]. سادگی پیاده‌سازی این روش‌ها، زمان اجرای کم و عملکرد مناسب آن‌ها در حذف نویز از نواحی همگن، موجب شده تا استفاده از آن‌ها همچنان مورد توجه باشد و سعی می‌شود تا عملکرد این فیلترها بهبود داده شود [۱۲، ۱۳]. مهم‌ترین ضعف این روش‌ها، عملکرد نامناسب در حفظ برخی جزئیات تصویر در نواحی ناهمگن است. در [۱۴] و [۱۵]، نویسنده روش جدیدی در حذف نویز تصویر ارائه کرده است. در این روش، ابتدا تصویر به تعدادی پنجره^۴ تبدیل شده و پنجره‌های مشابه دسته‌بندی می‌شوند. در مرحله بعد نویز پنجره‌های مشابه تخمین زده می‌شوند و بر اساس یک مدل، نویز

از پنجره‌ها حذف شده و در نهایت از ترکیب پنجره‌ها تصویر بدون نویز تشکیل می‌شود. این روش به دلیل استفاده از پنجره‌های مشابه، نتایج بسیار جالبی در حذف نویز ایجاد می‌کند [۱۶]. مهم‌ترین چالش این روش، حجم محاسبات زیاد در دسته‌بندی پنجره‌ها است. علاوه بر این، چنانچه پنجره‌ای مشابه سایر پنجره‌های تصویر نباشد، امکان حذف نویز در آن وجود نخواهد داشت [۱۷].

دسته دیگر روش‌ها، نویز را در حوزه تبدیل حذف می‌کنند. در این روش، تبدیل مناسب تبدیلی است که به کمک آن، داده‌های تصویر از نویز جدا شوند. از جمله تبدیل‌های مورد علاقه، تبدیل موجک^۵ و مدل‌های توسعه‌داده‌شده آن است و روش‌های مختلفی در حذف نویز به کمک آن معرفی شده است [۱۸-۲۰]. استفاده از این تبدیلات، نتایج مناسبی در حذف نویز ایجاد می‌کند اما موجب ایجاد حلقه‌های مصنوعی در تصویر می‌شود. از جمله نقاط ضعف دیگر حجم محاسبات زیاد در اعمال این تبدیل به تصویر است [۲۱].

اخیراً استفاده از تکنیک نمایش تنک (SR)؛^۶ در کاربردهای پردازش تصویری مورد توجه قرار گرفته است. در [۲۲] از این تکنیک، به عنوان یک ابزار در جداسازی نواحی همگن از ناهمگن استفاده شده است و پس از آن حذف نویز مناسب را در هر ناحیه به تصویر اعمال کرد. علاوه بر این، می‌توان با در نظر گرفتن یک مدل، بهبود کیفیت تصویر را با استفاده از این تکنیک انجام داد. مهم‌ترین نقطه قوت این روش، قابلیت گسترش مدل در بهبود کیفیت تصویر در حوزه تصویر یا حوزه تبدیل است. به بیان دیگر، این تکنیک ابزاری است که با مدل‌سازی مناسب، به کمک آن می‌توان حذف نویز را در حوزه تبدیل یا حوزه تصویر انجام داد. بر این اساس روش‌های مختلفی در حذف نویز تصویر بر مبنای این تکنیک پیشنهاد شده که نتایج مناسبی به وجود می‌آورد [۲۲-۲۵].

در این روش‌ها، یک دیکشنری در نظر گرفته می‌شود که پایه‌های^۷ آن، توصیف‌کننده مناسبی از عناصر تشکیل‌دهنده تصویراند. پس از آن، عناصر تصویر، با حل یک مسئله بهینه‌سازی، از پایه‌های بدون نویز دیکشنری، بازسازی می‌شوند. انتخاب دیکشنری مناسب و نحوه بازیابی سیگنال با استفاده از پایه‌های دیکشنری، از جمله پارامترهای اثرگذار در نتیجه نهایی است. چنانچه در ادامه بیان می‌شود، در [۲۲] نویسنده نشان داده استفاده از پایه‌های دیکشنری متناسب با محتویات تصویر، نتایج مناسب‌تری در حذف نویز نسبت به انتخاب پایه‌های ثابت (پایه‌های مربوط به تبدیل) ایجاد می‌کند. لذا روش‌های [۲۲] و [۲۴، ۲۵] با استفاده از آموزش دیکشنری، پایه‌های متناسب با محتویات تصویر را ایجاد می‌کنند و به کمک دیکشنری آموزش دیده، با استفاده از تکنیک نمایش تنک، حذف نویز تصویر را انجام می‌دهند. چنانچه تصویر ابعاد بزرگی نداشته باشد، استفاده از این روش‌ها در زمان معقول نتایج کاملاً مناسبی ایجاد می‌کند. اما باید توجه داشت در هندسه SAR، از صحنه‌ای با ابعاد چند کیلومتری، تصاویری با قدرت تفکیک زیر یک متر ایجاد می‌شود. لذا تعداد پیکسل‌ها و حجم حافظه مورد نیاز برای پردازش این تصاویر به حدی زیاد است که موجب می‌شود روش‌های حذف نویز

$$\hat{x} = \arg \min_x (\|b - xA\|_2 + \|x\|_1) \quad (۳)$$

اگرچه با استفاده از تقریب نرم یک و برقراری شرط RIP، امکان دستیابی به پاسخ بهینه وجود دارد، اما به دلیل استفاده از ضربهای ماتریسی و محاسبه ماتریس معکوس، این روش زمان اجرای زیادی دارد. در روشهای دیگر، مانند روش OMP^{۱۱} و IHT^{۱۲}، پاسخ مسئله نمایش تنک، با استفاده از یک فرایند تکراری انجام می‌شود. در این روش‌ها، سیگنال روی تمام پایه‌های دیکشنری تصویر شده و ضریب آن محاسبه می‌شود. ضرایب بزرگ‌تر نگه داشته شده و با صفر کردن بقیه ضرایب و کم کردن ضریب بزرگ‌تر از سیگنال اصلی، سیگنال جدید ساخته می‌شود و فرایند فوق تا رسیدن به یک شرط خاتمه تکرار می‌شود. این روش‌ها به دلیل استفاده از جست‌وجوی حریصانه، زمان اجرای کمتری دارد. در [۲۷] نشان داده شده پاسخ این روش‌ها، در صورت برقراری شرایط اشاره شده، تقریبی از پاسخ مسئله کمینه‌سازی نرم صفر است.

۲-۲- استفاده از تکنیک نمایش تنک در حذف نویز تصویر

یکی از کاربردهای این تکنیک، حذف نویز تصویر است. روش‌های بیان شده در حذف نویز تصویر به کمک این تکنیک، به دو صورت ارائه شده‌اند. در شکل اول، از این تکنیک به عنوان یک ابزار کمکی در حذف نویز تصویر استفاده شده است. در [۲۸] ابتدا نواحی همگن و ناهمگن تصویر SAR با استفاده از تکنیک SR تعیین می‌شود و در مرحله بعد به هر ناحیه فیلتر خاصی اعمال می‌شود. در شکل دوم، تکنیک SR با مدل سازی نویز تصویر، مستقیماً آن را از تصویر حذف می‌کند. در این روش یک دیکشنری مناسب برای بیان عناصر تصویر در نظر گرفته می‌شود و با ترکیب پایه‌های دیکشنری، تصویر بدون نویز ساخته می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۲-۱، درستی و صحت عملکرد این روش، وابسته به انتخاب دیکشنری مناسب است. مهم‌ترین ویژگی دیکشنری انتخابی، توصیف سیگنال با استفاده از بردار ضرایب تنک است. به همین منظور دسته‌ای از مقالات، پایه‌های دیکشنری را بر اساس تبدیلاتی مانند تبدیل موجک، تبدیل فوریه یا تبدیل DCT^{۱۳} انتخاب کرده‌اند و حذف نویز را در حوزه بردار ضرایب تبدیل انجام داده‌اند. در [۲۲] نویز سنده برای ساخت دیکشنری، از تبدیل استفاده نکرده و در آن هر عنصر تصویر با حل مسئله زیر نمایش تنک داده می‌شود:

$$\{A, x\} = \arg \min_{x, A} (\|x\|_1) \quad (۴)$$

$$\text{Subject to } \|b - xA\|_2 < \varepsilon$$

در این مقاله نویسنده برای حل مسئله فوق و ساخت دیکشنری مناسب، روشی به نام K-SVD را ارائه داده است. در این روش به منظور حذف نویز، ابتدا تصویر به پنجره‌های دارای همپوشانی تجزیه می‌شود. در گام بعد با بهره‌گیری از مفهوم آموزش دیکشنری، پایه‌های دیکشنری بر اساس روش K-SVD و بر اساس پنجره‌های ایجاد شده ساخته می‌شوند. شیوه آموزش در روش K-SVD، مشابه با خوشه‌بندی K-Means است. در این روش، ابتدا یک دیکشنری اولیه در نظر گرفته می‌شود.

مناسب، در پردازش این تصاویر کمتر استفاده شوند. علاوه بر این، انتخاب مناسب پارامترهای این روش‌ها نیز امری چالش برانگیز است.

در این مقاله، روشی جدید در حذف نویز از تصویر SAR به کمک تکنیک SR ارائه می‌شود که در آن حذف نویز، در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، نویز تصویر با استفاده از یک روش ساده حذف می‌شود و در گام بعد جزئیات از دست‌رفته در مرحله قبل با استفاده از تکنیک SR بازیابی شده و به تصویر اضافه می‌شود. در روش پیشنهادی، به دلیل انتخاب عناصر تصویر بر اساس معیار همگنی و همچنین استفاده از ماتریس نمونه‌بردار تصادفی، حجم محاسبات و زمان اجرا کاهش چشمگیری پیدا کرده است. علاوه بر این، نحوه شکل‌گیری دیکشنری به گونه‌ای است که منجر به بهبود کیفیت تصویر نهایی خواهد شد.

در بخش ۲ ابتدا تکنیک SR، معرفی می‌شود. در ادامه، نحوه حذف نویز با استفاده از این تکنیک تشریح می‌گردد. در بخش ۳ روش پیشنهادی در حذف نویز به کمک تکنیک نمایش تنک معرفی می‌شود. در این روش، با استفاده از معیار همگنی نواحی تصویر و بهره‌گیری از ماتریس نمونه‌بردار در بازسازی تصویر، حجم محاسبات کاهش می‌یابد. در بخش ۴ نتایج این روش روی تصاویر SAR واقعی نشان داده می‌شود. در بخش ۵ نتیجه‌گیری از روش پیشنهادی و نتایج آن، بیان می‌شود.

۲- حذف نویز با استفاده از نمایش تنک

۲-۱- معرفی تکنیک نمایش تنک

تکنیک نمایش تنک امروزه کاربردهای زیادی در موضوعات پردازش سیگنالی مانند فشرده‌سازی، طبقه‌بندی، بینایی ماشین و پردازش تصویر پیدا کرده است. هدف این تکنیک، پیدا کردن بردار x در مسئله زیر و محدودیت در نظر گرفته شده است:

$$b_{1 \times m} = x_{1 \times n} A_{n \times m} \quad m \ll n \quad (۱)$$

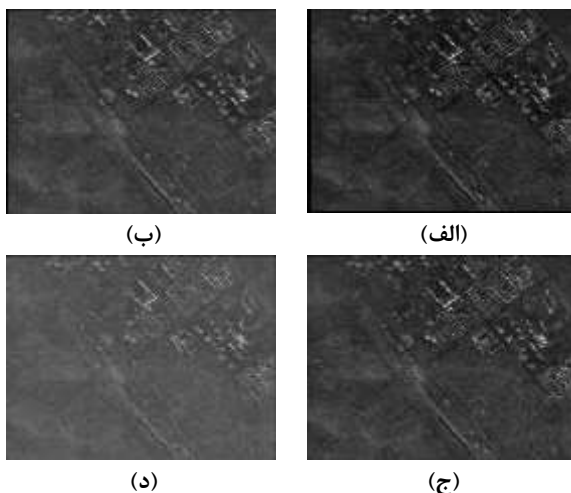
در رابطه فوق، b نمونه‌های سیگنال و A ماتریس دیکشنری است. با توجه به اینکه مسئله فوق یک مسئله زیرمعیّن^{۱۴} است، پاسخ یکتا ندارد. تکنیک SR با در نظر گرفتن قید تنک‌ترین پاسخ، x را با حل مسئله زیر پیدا می‌کند:

$$\min \{\|x\|_0\} \quad \text{subject to } \{\|b - xA\|_2 < \varepsilon\} \quad (۲)$$

در رابطه فوق، ε مقدار خطا قابل قبول در محاسبه x و $\|b\|_0$ نمایانگر نرم صفر فروبنیوسی است. در نظر گرفتن تنک‌ترین پاسخ به دلیل تجمیع انرژی و تنک بودن بیان سیگنال، در کاربردهای مختلف مورد علاقه است. با توجه به حل غیرعملی^{۱۵} مسئله نرم صفر با افزایش n ، با در نظر گرفتن شرایط اشاره شده در [۲۶]، می‌توان به جای نرم صفر، از نرم یک استفاده نمود و مسئله معادل زیر را برای داده‌های نویزی حل کرد. مسئله فوق در صورتی پاسخ یکتا خواهد داشت که ماتریس دیکشنری، توصیف کننده مناسب سیگنال بوده به طوری که بردار ضرایب x تنک باشد و همچنین شرط RIP^{۱۶} روی آن برقرار باشد [۲۶]. از جمله روش‌های متداول در حل این مسئله، روش LASSO است.

لذا در [۲۵] پیشنهاد شده ابتدا با در نظر گرفتن توان پایین برای نویز، دیکشنری آموزش داده شود و در گام بعد بر اساس میزان استفاده از پایه‌ها، پایه‌های کم استفاده حذف شوند. با استفاده از این روش، پایه‌های اثرگذار در ساخت تصویر حفظ شده و پایه‌های نویزی از دیکشنری حذف می‌شوند. در مورد اندازه پنجره‌های تصویر و میزان همپوشانی پنجره‌ها در کیفیت تصویر نهایی، گزارشی ارائه نشده است. شکل ۱، تأثیر اندازه پنجره‌ها را در کیفیت تصویر بازسازی شده با استفاده از روش K-SVD نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود کوچک بودن اندازه پنجره‌های تصویر، منجر به نویزی شدن پایه‌های دیکشنری بر اساس ساختارهای موجود در تصویر شکل می‌گیرند و در نتیجه حذف نویز تصویر به شکل مؤثرتری انجام می‌شود. اما باید توجه داشت با افزایش اندازه پنجره‌های تصویر، حجم محاسبات و حجم حافظه مورد نیاز در آموزش دیکشنری و بازسازی تصویر، افزایش می‌یابد. علاوه بر اندازه پنجره‌ها، میزان همپوشانی پنجره‌های تصویر نیز در کیفیت تصویر بازسازی شده نقش مهمی دارند.

شکل ۲، تصویر بازسازی شده را با تغییر اندازه همپوشانی پنجره‌ها در روش K-SVD نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود چنانچه پنجره‌های تصویر با یکدیگر همپوشانی زیادی داشته باشند، در فرایند بازسازی تصویر، پنجره‌های بیشتری با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه نویز به شکل بهتری حذف می‌شود. اما باید توجه داشت با زیاد شدن محدوده همپوشانی، تعداد پنجره‌های تصویر زیاد می‌شود و با توجه به بزرگی اندازه تصاویر SAR، بیان تنک همه این پنجره‌ها عملاً زمان‌بر بوده و با توجه به محدودیت حجم حافظه غیرممکن است.

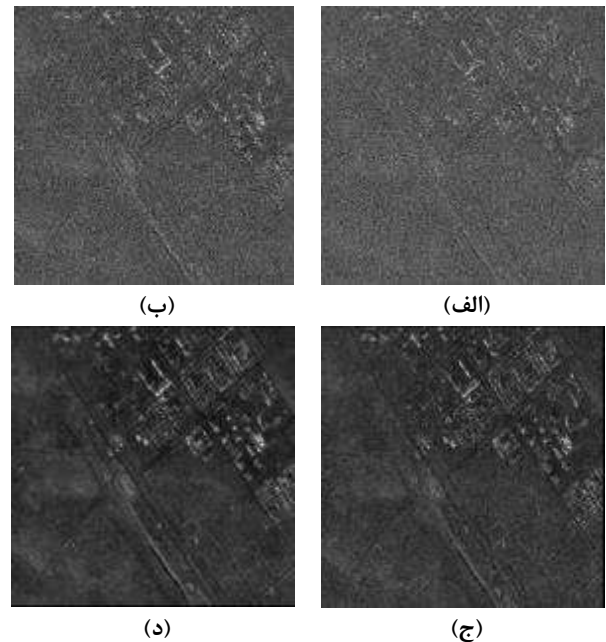


شکل ۲: (الف) تصویر فیلتر شده با همپوشانی ۹۵ درصدی پنجره‌ها (ب) همپوشانی ۷۵ درصدی پنجره‌ها (ج) همپوشانی ۵۰ درصدی پنجره‌ها (د) همپوشانی ۳۰ درصد پنجره‌ها

به منظور غلبه بر محدودیت‌های بیان شده در بهبود کیفیت تصویر، در روش پیشنهادی تمهیداتی در نظر گرفته می‌شود به گونه‌ای که کیفیت تصویر نهایی افزایش یابد. برای این منظور در روش پیشنهادی، ابتدا

شود که به طور معمول، تعدادی از پنجره‌های تصویر هستند. در مرحله بعد، با استفاده از تجزیه SVD، پایه‌ها در یک فرایند تکراری به گونه‌ای شکل می‌گیرند که به کمک آن‌ها، پنجره‌های تصویر بر اساس پایه‌ها، نمایش تنک داده شوند. به بیان دیگر، پایه‌های شکل گرفته در این روش، توصیف کننده میانگین بسته‌های مشابه در راستای پراکندگی داده‌ها هستند و در نتیجه نویز در آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. پس از شکل‌گیری دیکشنری، پنجره‌های ایجاد شده، بر اساس ترکیب پایه‌های دیکشنری، نمایش تنک داده می‌شوند. به بیان دیگر، در این مرحله، با حل رابطه (۲) پنجره‌های جدید ایجاد می‌شوند. با توجه به اینکه این پنجره‌ها از دیکشنری بدون نویز ساخته می‌شوند، نویز در آن‌ها وجود ندارد. در مرحله آخر، با ترکیب پنجره‌ها، تصویر بدون نویز ساخته می‌شود.

با توجه به اینکه در این روش، دیکشنری بر اساس ساختارهای موجود در تصویر شکل می‌گیرد، می‌تواند به خوبی عناصر تصویر را توصیف کند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد آموزش دیکشنری و تشکیل آن در حوزه تصویر، نتایج مناسب تری نسبت به دیکشنری مبتنی بر حوزه تبدیل ایجاد می‌کند. تعیین حد آموزش، اندازه پنجره‌های تصویر و میزان همپوشانی پنجره‌ها از جمله پارامترهای مهم در عملکرد این روش است. تعیین حد آموزش مستلزم تخمین توان نویز است. چنانچه این تخمین به درستی صورت نگیرد، کیفیت پایه‌های دیکشنری حین فرایند آموزش تغییر می‌کند. چنانچه توان نویز مقدار پایینی تخمین زده شود، نویز در پایه‌های دیکشنری ظاهر می‌شود. از سوی دیگر با تخمین بالای توان نویز، جزئیات تصویر در پایه‌ها حذف می‌شوند.



شکل ۳: (الف) تصویر نویزی ورودی (ب) تصویر فیلتر شده با اندازه پنجره ۸ (ج) تصویر فیلتر شده با اندازه پنجره ۱۵ (د) تصویر فیلتر شده با اندازه پنجره ۲۵

۳-۲- اعمال تبدیل لگاریتم به تصویر

از کم کردن تصویر نویزی از تصویر فیلترشده، تصویر تفاضل ایجاد می شود. برای اعمال روش نمایش تنک لازم است تا مدل نویز به صورت جمع شونده باشد. با توجه به اینکه در تصاویر SAR، نویز به صورت ضرب شونده است، با اعمال تبدیل لگاریتم و اصلاح بایاس^{۱۴} [۲۹] به تصویر تفاضل، مدل نویز به صورت جمع شونده تبدیل می شود.

۳-۳- تهیه نقشه نواحی همگن و ناهمگن تصویر

در این مرحله نقشه نواحی همگن و ناهمگن تصویر تعیین می شود و براساس آن، پنجره‌ها از تصویر استخراج می شود. میزان همگنی هر پیکسل تصویر، مطابق رابطه (۵) و بر اساس واریانس نرمالیزه شده یک پنجره، حول آن پیکسل سنجیده می شود. این معیار نشان دهنده کنتراست نرمالیزه شده آن پیکسل از تصویر است.

$$H(i, j) = \frac{\sigma_w(i, j)}{\mu_w(i, j)} \quad (5)$$

در رابطه فوق σ_w و μ_w به ترتیب واریانس و میانگین پنجره تصویراند. براساس مقدار H برای هر پیکسل، می توان در مورد میزان همگنی آن قضاوت کرد. نواحی ناهمگن در روش پیشنهادی، از هیستوگرام نقشه ایجاد شده تعیین می شوند. با توجه به اینکه بیشتر پیکسل های تصویر در نواحی همگن تصویر واقع اند، می توان براساس بیشینه هیستوگرام، آستانه مناسبی را برای تعیین نواحی ناهمگن تصویر پیدا کرد.

۳-۴- استخراج پنجره‌ها و آموزش دیکشنری

در این مرحله به منظور آموزش و تشکیل دیکشنری، لازم است تا پنجره‌هایی از تصویر استخراج شوند. باتوجه به اینکه SNR در تصویر نویزی نسبت به تصویر تفاضل بیشتر است، آموزش دیکشنری بر اساس پنجره تصویر نویزی انجام می شود.

افزایش پنجره‌ها در مرحله آموزش دیکشنری موجب بهبود کیفیت پایه‌های آن می شود اما باید توجه داشت زیاد شدن تعداد پنجره‌ها در مرحله آموزش، موجب افزایش حجم محاسبات می شود. به این منظور در روش پیشنهادی استخراج پنجره‌ها بر اساس نقشه نواحی همگن و ناهمگن تصویر انجام می شود. در این روش، با توجه به نقشه ایجاد شده در مرحله قبل، پنجره‌ها از نواحی با بیشترین مقدار H انتخاب می شوند و میزان همپوشانی پنجره‌ها نیز براساس مقدار آن تعیین می شود. براین اساس میزان جابجایی پنجره در اعمال همپوشانی از رابطه (۶) محاسبه می شود.

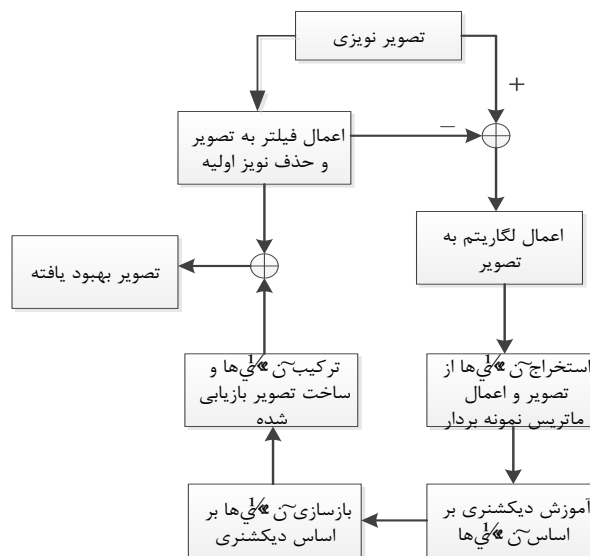
$$\Delta d(i, j) = \frac{1}{H(i, j)} \quad (6)$$

به این ترتیب، تصویر به تعدادی پنجره که عناصر تصویر نامیده می شوند، تبدیل می شود. این عناصر در نواحی همگن که H مقدار کمی دارد به دلیل افزایش Δd تعداد کمتر و در نواحی ناهمگن تراکم بیشتری دارند. پس از انتخاب پنجره‌ها از تصویر، آموزش دیکشنری به

تصویر با استفاده از یک روش متداول حذف نویز اولیه می شود و در مرحله بعد جزئیات به کمک تکنیک نمایش تنک بازیابی می شوند و تصویر بهبودیافته تشکیل می شود. در این روش، میزان همپوشانی پنجره‌ها با توجه به ناهمگنی نواحی تصویر تغییر می کند به این ترتیب، تراکم پنجره‌ها در نواحی با اهمیت تصویر افزایش می یابد و آموزش دیکشنری بر اساس نواحی با اهمیت تصویر انجام می شود. همچنین برای کاهش حجم محاسبات در نمایش تنک پنجره‌ها از ماتریس نمونه برداری تصادفی استفاده می شود.

۳-۳- روش پیشنهادی در بهبود کیفیت تصویر

همان طور که در قبل بیان شد، افزایش اندازه پنجره‌ها و میزان همپوشانی آن‌ها، موجب بهبود کیفیت تصویر حذف نویز شده می شود. اما از سوی دیگر موجب افزایش حجم محاسبات و حجم حافظه مورد نیاز در این روش می شود. بدین منظور برای کاهش حجم حافظه و حجم محاسبات روش جدیدی ارائه می شود. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل زیر نشان داده شده است و در ادامه هر قسمت توضیح داده می شود. در این روش، تراکم انتخاب پنجره‌های تصویر، بر اساس معیار همگنی تصویر انجام می شود و همچنین برای کاهش حجم محاسبات، از ماتریس نمونه بردار مدل بازسازی تصویر حذف نویز شده استفاده می شود.



شکل ۳: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

۳-۱- اعمال فیلتر و حذف نویز اولیه

این مرحله حذف نویز اولیه از تصویر است. در این مرحله روش انتخابی باید به نحوی باشد که نویز تصویر را به خصوص در نواحی همگن، به خوبی حذف کند و از سوی دیگر پیاده سازی و عملکرد ساده و سریعی داشته باشد. برای این منظور می توان از فیلترهای مختلفی استفاده کرد. با توجه به عملکرد مناسب فیلتر دوطرفه در حذف نویز از نواحی همگن تصویر، و عدم تغییر شکل نواحی ناهمگن [۱۱]، از این فیلتر به عنوان فیلتر حذف نویز اولیه استفاده می شود.

$$\hat{x} = \arg \min_x (\|b_{1 \times N} Q_{N \times K} - x_{1 \times M} D_{M \times N} Q_{N \times K}\|_2 + \|x\|_1) \quad (8)$$

در رابطه فوق $Q_{N \times K}$ ماتریس نمونه بردار تصادفی است. از آنجایی که در مسئله فوق $K < N$ است، پیچیدگی محاسبات به مرتبه $O(MK)$ کاهش می‌یابد. با توجه به ساختار تصادفی ماتریس DQ ، شرط RIP روی آن برقرار بوده و در نتیجه مسئله فوق پاسخ یکتا دارد و با استفاده از روش‌های بیان شده در حل مسئله نمایش تنک، می‌توان به پاسخ همگرا شد.

پس از محاسبه ضرایب نمایش تنک پنجره‌ها، ابتدا مقدار جدید پنجره‌های حذف‌نویز شده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود و در گام بعد، تصویر تفاضل با ترکیب پنجره‌ها بازسازی شده و با اضافه کردن آن به تصویر فیلترشده، تصویر نهایی تشکیل می‌شود.

$$\hat{b} = \hat{x} D \quad (9)$$

۴- نتایج روش پیشنهادی

در این بخش نتایج روش پیشنهادی در حذف نویز و بهبود کیفیت تصویر SAR نشان داده می‌شود. بدین منظور برای مقایسه کیفیت تصویر روش‌های مختلف، چهار معیار در نظر گرفته شده است. معیار اول PSNR^{۱۷} است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{PSNR} = 20 \log \left(\frac{255}{\text{mean}2 \left[\sqrt{(I_N - I_F)^2} \right]} \right) \quad (10)$$

در رابطه فوق I_N و I_F تصویر ورودی و تصویر حذف‌نویز شده است. معیار دوم SSIM^{۱۸} است. در این معیار، تشابه ساختار، شدت روشنایی و کنتراست تصویر ورودی و تصویر حذف‌نویز شده ارزیابی می‌شود و نسبت به معیار PSNR توصیف مناسب‌تری از کیفیت تصویر در اختیار قرار می‌دهد. با در نظر گرفتن تأثیر یکسان پارامترهای فوق در محاسبه SSIM، مقدار این معیار برابر است با:

$$\text{SSIM}(I_N, I_F) = \frac{(2\mu_N \mu_F + c_1)(2\sigma_N \sigma_F + c_2)}{(\mu_N^2 + \mu_F^2 + c_1)(\sigma_N^2 + \sigma_F^2 + c_2)} \quad (11)$$

در رابطه فوق μ ، σ و c به ترتیب نمایانگر میانگین، واریانس و ضریبی ثابت هستند. معیار سوم و چهارم ENL^{۱۹} و ESI^{۲۰} هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند. معیار ENL میزان همگن شدن تصویر و معیار ESI بیانگر میزان حفظ جزئیات و لبه‌ها در تصویر است. برای محاسبه ENL، رابطه (۱۲) باید روی یک پنجره از ناحیه همگن تصویر اعمال شود.

روش K-SVD انجام می‌شود. به این ترتیب، دیکشنری آموزش دیده، شامل جزئیات تصویر بوده و نویز از آن‌ها حذف شده است. تعیین مقدار آموزش، از پارامترهای تأثیرگذار در حفظ جزئیات و نویز تصویر است. میزان آموزش، براساس مقدار خطای قابل قبول در پاسخ مسئله نمایش تنک، یا بر اساس مقدار نرم صفر پاسخ مسئله نمایش تنک تعیین می‌شود. تعیین خطای قابل قبول، مستلزم تخمین توان نویز است که خود امری چالش برانگیز است. لذا در روش پیشنهادی، از شکل دیگر حل مسئله نمایش تنک استفاده می‌شود و با در نظر گرفتن محدودیت نرم صفر کوچک‌تر از یک برای ضرایب، پاسخ محاسبه می‌شود. باید توجه داشت چنانچه مقدار نرم صفر در نظر گرفته شده برای پاسخ افزایش یابد، جزئیات بیشتری از تصویر حفظ می‌شود که در نتیجه آن، حضور نویز در پایه‌های دیکشنری خواهد بود.

۳-۵- بازسازی پنجره‌ها براساس دیکشنری تشکیل شده

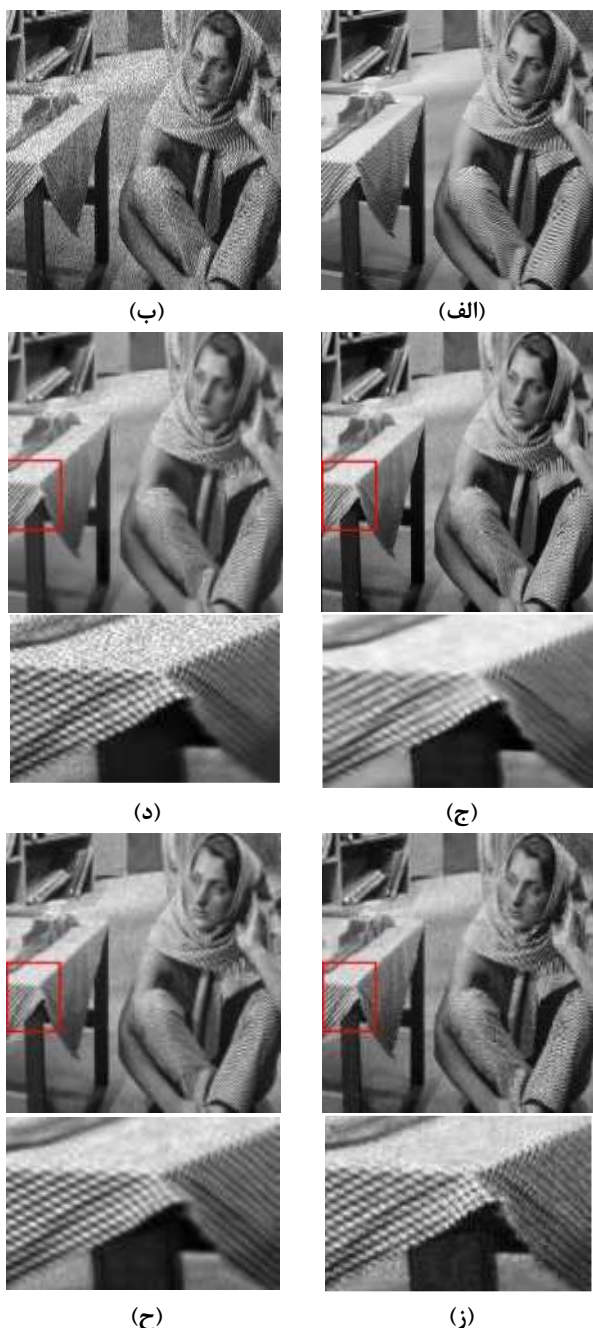
در این مرحله، تصویر تفاضل بر اساس دیکشنری تشکیل شده بازسازی می‌گردد. برای این منظور ابتدا تصویر تفاضل به تعدادی پنجره تبدیل می‌شود. با توجه به حضور جزئیات صحنه در پایه‌های دیکشنری، نمایش تنک این پنجره‌ها با حل مسئله بهینه‌سازی زیر محاسبه می‌شود. در این مسئله هدف پیدا کردن شبیه‌ترین پایه‌های دیکشنری با هر پنجره از تصویر است.

$$\hat{x} = \arg \min_x \{ \|b - Dx\|_2 \} \text{ Subject to } \|x\|_0 < n \quad (7)$$

در رابطه فوق D ماتریس دیکشنری تشکیل شده، b یک پنجره از تصویر و n یک عدد صحیح است. با توجه به سرعت و دقت مناسب روش OMP در حل مسئله نمایش تنک، برای حل مسئله فوق، از این روش استفاده می‌شود.

همان‌طور که در قبل بیان شد، بزرگ شدن اندازه پنجره‌ها موجب بهبود کیفیت تصویر حذف‌نویز شده می‌شود. با افزایش اندازه پنجره‌های تصویر، حجم محاسبات و حجم حافظه مورد نیاز در بازسازی تصویر افزایش می‌یابد. یکی از ابزارهای کاهش داده با حجم بالا، استفاده از ماتریس نمونه بردار تصادفی است [۳۰]. استفاده از ماتریس نمونه بردار به منظورهای مختلفی در روش‌های مبتنی بر مدل^{۱۵}، انجام می‌گیرد. در برخی روش‌ها از این ماتریس در مدل‌سازی محدودیت‌های فیزیکی مسئله استفاده می‌شود [۳۱]. در برخی شرایط دیگر نیز این ماتریس به منظور کاهش حجم محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج تکنیک حسگری فشرده^{۱۶}، به کمک ماتریس نمونه بردار تصادفی می‌توان داده‌ها را از بعد بالا به داده‌هایی با بعد پایین تبدیل کرد و در عین حال اطلاعات از آن قابل بازیابی خواهد بود. به این منظور، در روش پیشنهادی برای کاهش حجم محاسبات در فرایند بازسازی، از ماتریس نمونه بردار تصادفی استفاده شده و بازیابی سیگنال با استفاده از حل مسئله بهینه‌سازی زیر انجام می‌گیرد:

شده و سایر پایه‌های دیکشنری حذف شده است. به همین دلیل این روش، نسبت به روش PPB و K-SVD مقدار ENL بیشتری دارد و در آن ساختار کلی تصویر به خوبی حفظ شده است. اما به دلیل از دست رفتن بخشی از اطلاعات تصویر، سایر پارامترهای کیفیت تصویر کمتری از دو روش قبل دارد. عملکرد روش پیشنهادی در شکل ۵ (ز) نشان داده شده است. در این شکل، حذف نویز اولیه توسط فیلتر Bilateral با اندازه پنجره ۶ انجام شده است.



شکل ۴: نتیجه روش‌های مختلف حذف نویز (الف) تصویر بدون نویز (ب) تصویر نویزی (ج) Γ -MAP (د) Bilateral (ه) [۱۴] (PPB) (و) [۲۲] (ز) (K-SVD) [۲۵] (ح) روش پیشنهادی

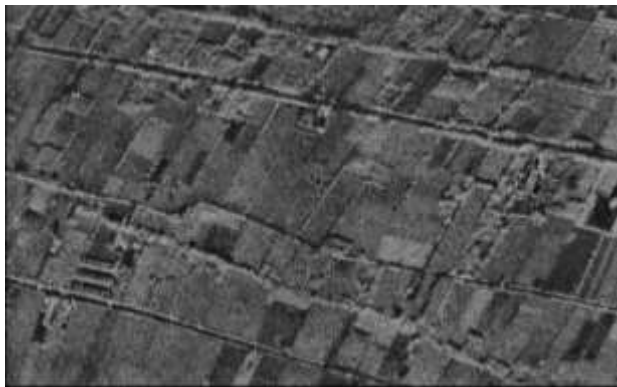
$$ENL = \frac{\mu_{Windowed Image}}{\sigma_{Windowed Image}} \quad (12)$$

$$ESI = \frac{\sum \sum |I_F(i, j) - I_F(i, j+1)|}{\sum \sum |I_N(i, j) - I_N(i, j+1)|} + \frac{\sum \sum |I_F(i, j) - I_F(i+1, j)|}{\sum \sum |I_N(i, j) - I_N(i+1, j)|} \quad (13)$$

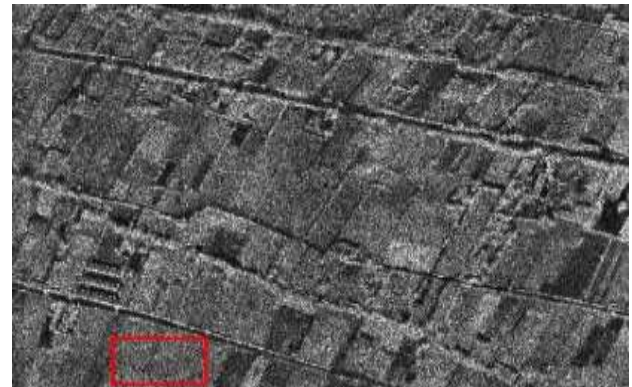
برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی، تصویر Barbara که به نویز لکه آغشته است در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ (ب)، این تصویر را نشان می‌دهد. نتیجه استفاده از روش‌های حذف نویز مبتنی بر پنجره‌ای کردن تصویر، در این شکل نشان داده شده است. با توجه به شکل (ج) مشاهده می‌شود در روش PPB، نویز به خوبی حذف شده است اما بعضی از ساختارهای موجود در تصویر از دست رفته است. از مقایسه شکل‌های (د) و (ه) مشاهده می‌شود روش K-SVD و [۲۵]، ساختارهای تصویر را حفظ کرده‌اند اما روش [۲۵] به دلیل انتخاب پایه‌های مناسب و پر استفاده در بازسازی تصویر، نویز کمتری دارد. نتیجه استفاده از روش پیشنهادی در شکل ۴ (و) نشان داده شده است. در این تصویر، مقدار n در رابطه (۷) برابر ۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود با حفظ ساختار تصویر، نویز نواحی ناهمگن به خوبی حذف شده است. به بیان دیگر مهم‌ترین توانایی روش پیشنهادی، حذف نویز مناسب همراه با حفظ جزئیات، در نواحی ناهمگن تصویر است. مقدار PSNR برای شکل‌های ۴ (ج) - (ه) به ترتیب، ۲۷/۳، ۲۷/۲، ۲۷/۳ و ۲۷/۸ dB است و روش پیشنهادی بیشترین مقدار PSNR را دارد.

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی روی تصویر SAR، شکل ۵ (الف) در نظر گرفته می‌شود. این تصویر در باند X و ابعاد آن ۲۰۰×۱۵۰۰ است. نتیجه استفاده از روش‌های مختلف حذف نویز و روش پیشنهادی در این شکل نشان داده شده است. پارامترهای سنجش کیفیت این تصاویر در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول، پارامتر ENL روی پنجره قرمز رنگ تصویر محاسبه شده است.

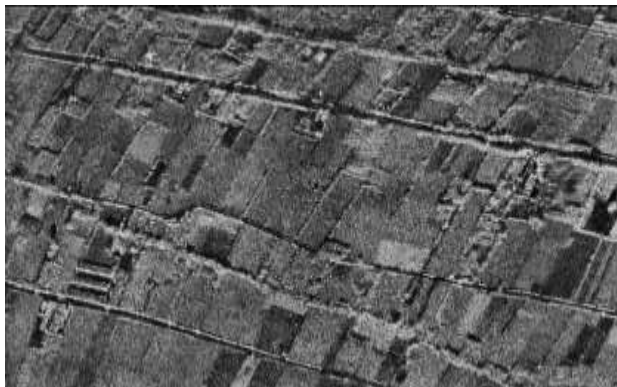
پنجره استفاده شده در روش Γ -MAP، با ابعاد ۷×۷ است. با توجه به نتایج جدول مشاهده می‌شود این روش، قادر به حفظ مناسب جزئیات تصویر نیست و قابلیت حفظ لبه در آن وجود ندارد. فیلتر Bilateral عملکرد مناسبی در حذف نویز نواحی همگن تصویر دارد اما به دلیل عدم حذف نویز مناسب از نواحی ناهمگن، مقدار PSNR و SSIM پایینی دارد. نتیجه استفاده از روش‌های مبتنی بر پنجره‌ای کردن تصویر در شکل ۵ (د) - (و)، نشان داده شده است. در این روش‌ها، اندازه پنجره‌های تصویر، ۱۵×۱۵ در نظر گرفته شده است. روش PPB به دلیل استفاده از اطلاعات پنجره‌های مشابه، نسبت به سایر روش‌ها بیشترین مقدار PSNR و SSIM را دارد. در روش K-SVD، حذف نویز وابسته به تخمین توان نویز در رابطه (۴) است. به دلیل وجود خطا در تخمین مقدار دقیق نویز، مقداری از نویز در تصویر باقی مانده است و نسبت به روش PPB مقدار SSIM و PSNR کمتری دارد اما لبه‌ها و خطوط در آن حفظ شده و مقدار ENL بیشتری دارد. در روش [۲۵]، پایه‌های پر استفاده در ساخت تصویر حفظ



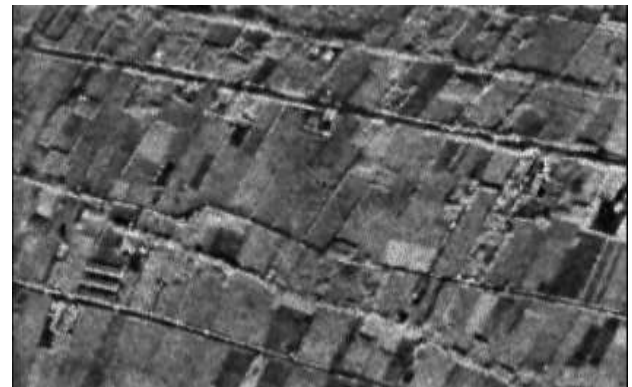
(ب)



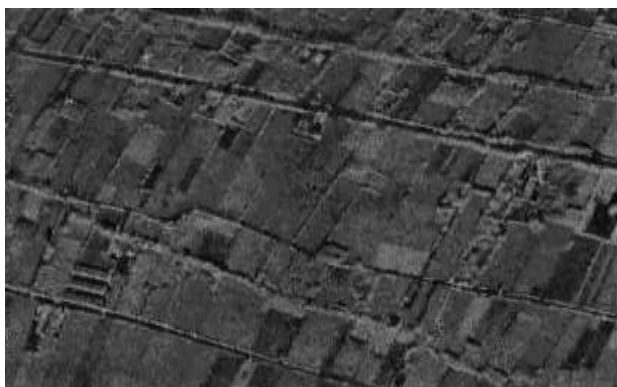
(الف)



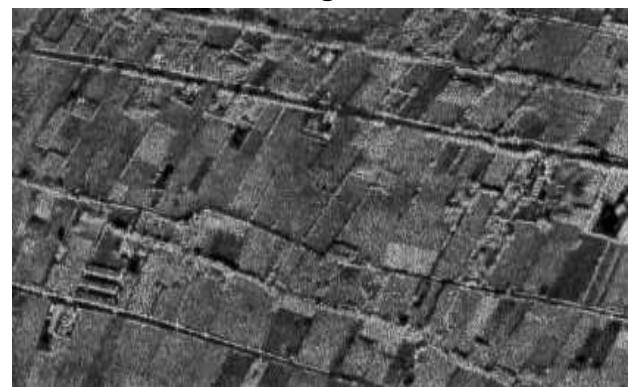
(د)



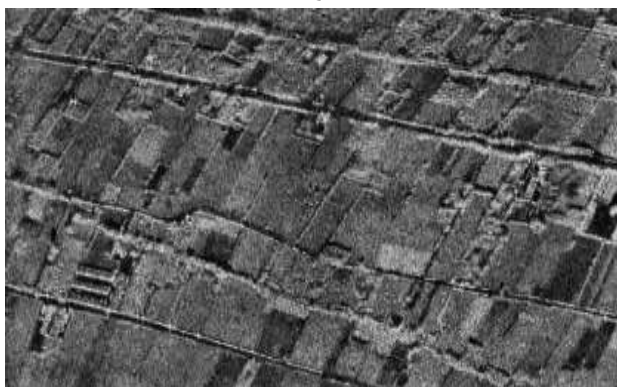
(ج)



(و)



(ه)



(ح)



(ز)

شکل ۵: عملکرد روش‌های مختلف حذف نویز روی داده واقعی (الف) تصویر SAR نویزی (ب) Γ -MAP (ج) Bilateral (د) PPB (ه) K-SVD (و) [۲۵] (ز) روش پیشنهادی با $(n=5)$ (ح) روش پیشنهادی با $(n=1)$

جدول ۲: زمان اجرای روش‌های مختلف بر حسب ثانیه

روش	Γ -MAP	Bilateral	PPB	[۲۵]	K-SVD	روش پیشنهادی (n=۵)
زمان (ثانیه)	۱۵۸	۶۵	۳۰۱۷	۲۳۲ ۱	۳۲۱۰	۴۱۳

در این شبیه‌سازی، ماتریس نمونه‌بردار، اندازه داده‌ها را به مقدار ۵۰ درصد کاهش داده است. با توجه به نتایج حسگری فشرده، به شرط تصادفی بودن دیکشنری در رابطه (۸) برای برقراری شرط RIP، لازم است داشته باشیم:

$$K > C S \ln\left(\frac{N}{S}\right) \quad (14)$$

در رابطه فوق s مرتبه تنکی سیگنال و C عددی ثابت است. شکل ۶، تأثیر تغییر اندازه ماتریس نمونه‌بردار را در تغییرات PSNR نرمالیزه شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود کاهش اندازه داده تا حدود ۳۰ درصدی، تغییر قابل توجهی در PSNR ایجاد نمی‌کند. چنانچه ماتریس نمونه‌بردار، داده‌ها را به مقدار کمتر از ۳۰ درصد اندازه‌شان تبدیل کند، PSNR شروع به افت می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از تکنیک نمایش تنک، روش جدیدی در حذف نویز از تصاویر SAR ارائه شد. در این روش، ابتدا نویز تصویر به کمک یک روش ساده حذف می‌شود و در گام بعد جزئیات حذف شده به کمک تکنیک نمایش تنک، بازیابی شده و به تصویر قبل، اضافه می‌شود. در این روش، تکنیک SR روی نواحی ناهمگن تصویر اعمال می‌شود و همچنین ماتریس نمونه‌بردار تصادفی، حجم داده‌ها را در بازسازی تصویر کاهش می‌دهد. به همین دلیل، زمان اجرا، کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد تصویر ساخته شده در زمان کمتر و با کیفیت بهتر از سایر روش‌ها است. در این روش می‌توان نواحی مورد علاقه را با در نظر گرفتن معیار مناسب انتخاب، و تأثیر آن نواحی را در تصویر نهایی افزایش داد. علاوه بر این، می‌توان از اطلاعات تصاویر SAR مشابه بهره گرفت و از ساختارهای آن در پایه‌های دیکشنری بهره گرفت. باقی‌ماندن مقداری از نویز در تصویر، به‌خصوص در نواحی همگن، از چالش‌های روش پیشنهادی است که با در نظر گرفتن همبستگی مکانی و شباهت بین پنجره‌های تصویر، می‌توان تا حد مناسبی بر این چالش فائق آمد.

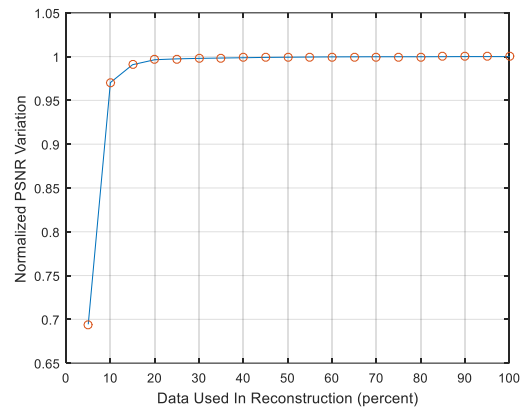
همچنین مقدار n در رابطه (۷)، برای بازیابی پنجره‌های تصویر برابر ۵ در نظر گرفته شده است. در این شکل، ماتریس نمونه‌بردار تصادفی، اندازه داده‌ها را به ۵۰ درصد کاهش داده است. با توجه به اینکه در این روش، دیکشنری، بر اساس نواحی ناهمگن تصویر شکل می‌گیرد، لبه‌ها و خطوط در تصویر بازیابی شده به خوبی حفظ شده‌اند و ESI این تصویر نسبت به سایر روش‌ها مقدار بیشتری است. همچنین با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود مقدار PSNR و SSIM در روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است. حفظ جزئیات تصویر و حذف نویز در روش پیشنهادی، توسط پارامتر n در رابطه (۷) کنترل می‌شود. چنانچه در فرایند بازسازی پنجره‌ها، n عدد بزرگی باشد، جزئیات تصویر حفظ شده و مقادیر PSNR، SSIM افزایش می‌یابد اما نویز در تصویر و به‌خصوص در نواحی همگن باقی می‌ماند و موجب کاهش ENL می‌شود. شکل ۵ (ح) تصویر بازسازی شده را به‌ازای $n=1$ نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر پارامترهای سنجش کیفیت این دو تصویر در جدول ۱ مشاهده می‌شود کاهش n موجب کاهش SSIM، PSNR و ESI شده اما مقدار ENL افزایش یافته است. به‌طور معمول انتخاب n در روش پیشنهادی براساس مصالحه بین حفظ جزئیات تصویر و حذف نویز انجام می‌شود. مقداردهی ۳ یا ۵ به n ، به تصویری با حفظ جزئیات مناسب و حذف نویز کافی منجر می‌شود.

جدول ۱: پارامترهای کیفیت تصاویر شکل ۵

ENL	ESI	SSIM	PSNR	
۳۰/۷	۰/۲۰	۰/۹۱	۲۱/۹	Γ -MAP
۵۸/۳	۰/۲۳	۰/۷۹	۲۲/۱	Bilateral
۱۹/۳	۰/۲۵۱۷	۰/۹۷۶۱	۲۶/۲۲	PPB
۲۳/۴	۰/۲۶	۰/۹۵۵	۲۵/۳۵	K-SVD
۴۱/۲	۰/۲۲	۰/۹۵۲	۲۵/۰۲	[۲۵]
۱۸/۶	۰/۲۶۵۷	۰/۹۷۷	۲۶/۸۳	پیشنهادی (n=۵)
۲۳/۱	۰/۲۱۲۹	۰/۹۷۰۴	۲۵/۵	پیشنهادی (n=۱)

جدول ۲ زمان اجرای این روش‌ها را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، از یک رایانه با ۶GB RAM و پردازنده اینتل ۵ هسته‌ای با فرکانس ۲/۵GHz استفاده شده است و روش‌ها در محیط نرم‌افزار Matlab 2015 b پیاده‌سازی شده‌اند. با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود روش پیشنهادی نسبت به روش‌های PPB، K-SVD و [۲۵] زمان اجرای بسیار پایین‌تری دارد. علاوه بر این، در روش پیشنهادی، حل مسئله نمایش تنک، با در نظر گرفتن قید محدودیت تنکی هر پنجره انجام می‌شود و در نتیجه نیازی به تخمین توان نویز نیست.

- median filter,” *6th Image and Signal Processing (CISP)*, pp. 224-228, 2013.
- [13] Li, C.-L. Wang, P.-P. Huang and W.-D. Yu, “SAR image despeckling using a space-domain filter with alterable window,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, pp. 263-267, 2013.
- [14] 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, pp. 2661-2672, 2009.
- [15] J. Chen, Y. Chen, W. An, Y. Cui, and J. Yang, “Nonlocal filtering for polarimetric SAR data: A pretest approach,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 1744-1754, 2011.
- [16] M. H. Alkinani and M. R. El-Sakka, “Patch-based models and algorithms for image denoising: a comparative review between patch-based images denoising methods for additive noise reduction,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 1, p. 58, 2017.
- [17] J. Mairal, F. Bach, J. Ponce, G. Sapiro and A. Zisserman, “Non-local sparse models for image restoration,” *12th International Conference on IEEE Computer Vision*, pp. 2272-2279, 2009.
- [18] F. Argenti and L. Alparone, “Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2363-2374, 2002.
- [19] S. Parrilli, M. Poderico, C. V. Angelino and L. Verdoliva, “A nonlocal SAR image denoising algorithm based on LMMSE wavelet shrinkage,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, pp. 606-616, 2012.
- [۲۰] کوشش منیره و اکبری زاده غلامرضا، “الگوریتم حذف Speckle با قابلیت حفظ لبه برای تصاویر سنجش از دور رادار روزنه ترکیبی با استفاده از تبدیل چند مقیاسه Curvelet و آستانه گذاری وفقی،” *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۴، ۱۵۳-۱۶۱، زمستان ۱۳۹۴.
- [21] L. Gagnon and A. Jouan, “Speckle filtering of SAR images: a comparative study between complex-wavelet-based and standard filters,” in *Wavelet Applications in Signal and Image Processing*, pp. 80-92, 1997.
- [22] M. Elad and M. Aharon, “Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries,” *IEEE Transactions on Image processing*, vol. 15, pp. 3736-3745, 2006.
- [23] H. Rabbani and S. Gazor, “Image denoising employing local mixture models in sparse domains,” *IET Image Processing*, vol. 4, pp. 413-428, 2010.
- [24] D.-A. Huang, L.-W. Kang, Y.-C. F. Wang, and C.-W. Lin, “Self-learning based image decomposition with applications to single image denoising,” *IEEE Transactions on multimedia*, vol. 16, pp. 83-93, 2014.
- [25] C.W. Sang and H. Sun, “Two-Step Sparse Decomposition for SAR Image Despeckling,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp.1263-1267, 2017.
- [26] D. L. Donoho and M. Elad, “Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via ℓ_1 minimization,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 100, pp. 2197-2202, 2003.
- [27] Gribonval, Rémi and Morten Nielsen. “Sparse representations in unions of bases.” *IEEE transactions on Information theory* vol49, pp 3320-3325,2003.



شکل ۶: تغییرات PSNR نرمالیزه شده با تغییر اندازه ماتریس نمونه برداری

مراجع

- [1] A. Moreira, “Synthetic aperture radar (SAR): principles and applications,” *4th Advanced Training Course in Land Remote Sensing*, 2013.
- [2] T. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. Chipman, *Remote sensing and image interpretation*: John Wiley & Sons, 2014.
- [3] T. K. Sjogren, V. T. Vu, M. I. Pettersson, A. Gustavsson and L. M. Ulander, “Moving target relative speed estimation and refocusing in synthetic aperture radar images,” *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*, vol. 48, pp. 2426-2436, 2012.
- [4] A. Schmitt, “Multiscale and Multidirectional Multilooking for SAR Image Enhancement,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 5117-5134, 2016.
- [5] R.L.Morrison, M.N. Do and D. C. Munson, “SAR image autofocus by sharpness optimization: A theoretical study,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, pp. 2309-2321, 2007.
- [6] A.Shafiei, E.Yazdani and M.Beheshti, “SAR Speckle Reduction and Image Reconstruction Using Compressed,” *Journal of Radar*, vol. 4, no.2, pp.19-29, 2016.
- [7] A. Lopes, R. Touzi, and E. Nezry, “Adaptive speckle filters and scene heterogeneity,” *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, pp. 992-1000, 1990.
- [8] D. Kuan, A. Sawchuk, T. Strand, and P. Chavel, “Adaptive restoration of images with speckle,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, pp. 373-383, 1987.
- [9] V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, and J. C. Holtzman, “A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise,” *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, pp. 157-166, 1982
- [10] A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi and H. Laur, “Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images,” *10th Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 2409-2412, 1990.
- [11] W. Zhang, F. Liu, and L. Jiao, “SAR image despeckling via bilateral filtering,” *Electronics letters*, vol.45, pp. 781-783, 2009.
- [12] J. Zhu, J. Wen and Y. Zhang, “A new algorithm for SAR image despeckling using an enhanced Lee filter and

- [30] A. Eftekhari, M. Babaie-Zadeh and H. A. Moghaddam, "Two-dimensional random projection," *Signal processing*, vol. 91, pp. 1589-1603, 2011.
- [31] W. Qiu, E. Giusti, A. Bacci, M. Martorella, F. Berizzi, H. Zhao, *et al.*, "Compressive sensing-based algorithm for passive bistatic ISAR with DVB-T signals," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 51, pp. 2166-2180, 2015.
- [28] T. Lu, S. Li, L. Fang, and J. A. Benediktsson, "SAR Image Despeckling Via Structural Sparse Representation," *Sensing and Imaging*, vol. 17, p. 2, 2016.
- [29] H. Xie, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "Statistical properties of logarithmically transformed speckle," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 721-727, 2002.

زیر نویس ها

- | | |
|---|--|
| ¹¹ Orthogonal Matching Pursuit | ¹ Speckle Noise |
| ¹² Iterative Hard Thresholding | ² Scatterer |
| ¹³ Discrete Cosine Transform | ³ Multi Look |
| ¹⁴ Bias Correction | ⁴ Patch |
| ¹⁵ Model Based | ⁵ Wavelet |
| ¹⁶ Compressive Sensing | ⁶ Sparse Representation |
| ¹⁷ Peak Signal Noise Ratio | ⁷ Atom |
| ¹⁸ Structure Similarity | ⁸ Underdetermined |
| ¹⁹ Equivalent Number Look | ⁹ NP hard |
| ²⁰ Edge Save Index | ¹⁰ Restrict Isometry Property |