

حذف نویز لکه از تصاویر SAR بر پایه ترکیب روش آستانه‌گذاری با تخمین‌زن‌های بیزین MMSE/MAP در حوزه تبدیل کانتورلت

ایرج سرداری^۱، کارشناسی ارشد؛ جلیل سیفعلی هرسینی^۲، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشگاه گیلان - رشت - ایران - iraj.sardari71@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشگاه گیلان - رشت - ایران - harsini@guilan.ac.ir

چکیده: در آنتن گیرنده سیستم SAR تداخل تصادفی بازتاب‌های متفرق شده حاصل از برخورد امواج الکترومغناطیسی با هدف، که به صورت همدوس باهم جمع می‌شوند، باعث ایجاد نویز لکه در تصویر می‌گردد. نویز لکه در تصویر SAR که غالباً به صورت ضرب‌شونده مدل‌سازی می‌شود، باعث کاهش کیفیت تصاویر می‌گردد. در این مقاله در ابتدا روش‌های کاهش نویز لکه مبتنی بر آستانه‌گذاری و نظریه تخمین در حوزه تبدیل کانتورلت فاقد زیرنمونه‌برداری (NSCT)، که از پیچیدگی پایین و سرعت پیاده‌سازی بالایی برخوردار هستند، معرفی شده‌اند. در روش‌های آستانه‌گذاری مرسوم ضرایب تبدیل زیر یک آستانه به صفر نگاشته می‌شوند و این درحالی است که ممکن است اطلاعات مفیدی از تصویر در این ضرایب وجود داشته باشد. در ادامه با هدف بهره‌گیری هم‌زمان از مزیت سادگی روش آستانه‌گذاری و دقت بالای فیلترهای بیزین، ایده استفاده از یک روش ترکیبی حذف لکه ارائه شده است که براساس آن ضرایب NSCT با دامنه کوچک‌تر از آستانه با کمک فیلترهای MMSE/MAP تخمین زده شده‌اند. مقایسه کارایی روش حذف لکه ارائه شده با سایر روش‌های مشابه براساس اندیس‌های معتبر آماری روی تصاویر صحنه هدف با نویز مصنوعی و واقعی به‌طور جداگانه، مورد آزمایش و بحث قرار گرفته است. نتایج ارائه شده کارایی بهتر الگوریتم ارائه شده در مقایسه با الگوریتم‌های آستانه‌گذاری و فیلترهای MMSE/MAP، را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رادار دهانه ترکیبی (SAR)، حذف نویز لکه، تخمین‌زن LMMSE، تخمین‌زن MAP، آستانه‌گذاری، تبدیل کانتورلت.

SAR De-speckling using a Combination of Thresholding and MMSE/MAP Bayesian Estimation in Contourlet Transform Domain

I. Sardari¹, MSc; J. Seifali Harsini², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: iraj.sardari71@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: harsini@guilan.ac.ir

Abstract: In the receiver antenna of SAR system electromagnetic waves backscattered from the target surface, add together coherently and random interference of these waves causes the speckle noise in reconstructed SAR images. Speckle may be modeled as a multiplicative noise which degrades the quality of SAR images. In this paper, we first present a review of low-complexity and high-speed despeckling algorithms which are developed based on thresholding and Bayesian estimation in non-sampled contourlet transform (NSCT) domain. In usual thresholding methods when input amplitudes fall below a given threshold they are mapped to zero, however such amplitudes may contain useful information about image details. In order to simultaneously gain the low-complexity property of thresholding and high precision of Bayesian estimators, we then suggest a new thresholding method in which small-amplitude NSCT coefficients are estimated using LMMSE/MAP filters. The performance of despeckling filters is quantitatively evaluated on both simulated data and real SAR image using statistical indexes. The results illustrate the superior performance of the proposed algorithm in comparison with usual thresholding and Bayesian MMSE/MAP filters.

Keywords: Synthetic aperture radar (SAR), de-speckling, LMMSE/MAP estimators, thresholding, contourlet transform.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۳/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۷/۱۷ و ۱۳۹۶/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷

نام نویسنده مسئول: جلیل سیفعلی هرسینی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - رشت - دانشگاه گیلان - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

رادار دهانه ترکیبی (SAR) یک سیستم تصویربرداری با وضوح بالا است که به دلیل استفاده از امواج الکترومغناطیسی، از قابلیت تصویربرداری در وضعیت‌های مختلف آب‌وهوایی با نفوذپذیری بالا برخوردار است [۱-۲]. از این رو SAR به‌عنوان ابزاری مهم در سنجش از راه دور در زمینه‌های نظامی و غیرنظامی مانند نقشه‌برداری و شناسایی هدف شناخته شده است. سیستم رادار امواج الکترومغناطیسی را ارسال می‌نماید و با پردازش همدوس سیگنال‌های برگشتی تصویر هدف را می‌سازد. در پردازش همدوس سیگنال SAR بازتاب‌های متفرق شده حاصل از برخورد امواج الکترومغناطیسی با هدف، به‌صورت همدوس باهم جمع می‌شوند و تداخل تصادفی این امواج باعث ظاهر شدن اغتشاش دانه‌ای موسوم به لکه در تصویر می‌گردد. لکه قابل مدل‌سازی به‌صورت یک نویز ضرب‌شونده است و با توجه به اینکه کیفیت تصاویر SAR را کاهش می‌دهد باعث پیچیدگی در تفسیر این تصاویر می‌شود. از این رو حذف این نویز از اهمیت بالایی برخوردار است.

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای کاهش اثر نویز لکه در تصاویر SAR مطرح شده است [۳]. در مراجع [۴-۵] برای طراحی فیلتر حذف لکه از شاخص‌های آماری محلی تصویر در طول یک پنجره ثابت استفاده شده است. با وجود اینکه این فیلترها در مناطق همگن به خوبی عمل می‌کنند، ولیکن توانایی حفظ جزئیات تصویر (مانند اطلاعات لبه‌ها) را ندارند. در مرجع [۶] از روش بازسازی تصویر مبتنی بر سنجش فشرده^۱ استفاده شده است. در این روش ابتدا از تصویر SAR به‌صورت تصادفی و بدون پیکسل‌تکراری نمونه‌برداری شده است و سپس با بازسازی چند تصویر سنجش فشرده، برای حذف اثر نویز روی یک طول پنجره ثابت از تصاویر میانگین‌گیری انجام می‌شود.

در گروه دیگر مرسوم به روش‌های مبتنی بر تبدیل، طراحی فیلترهای حذف نویز بر پایه نظریه تخمین بی‌زین در حوزه تبدیلیاتی مانند ویولت^۲، کرولت^۳، کانتورلت^۴ و سایر موارد صورت گرفته است [۷-۲۰]. در یک گروه از روش‌های ارائه شده بر پایه تبدیل ویولت، با کمک توزیع آماری پیش‌فرض برای ضرایب تبدیل، تخمین‌زن‌های بی‌زین (MAP/MMSE) ضرایب تبدیل به‌نحوی طراحی شده‌اند که اثر لکه حداقل شود [۷-۱۱]. به‌علاوه، در روش حذف لکه براساس آستانه‌گذاری در حوزه تبدیل ویولت، تعیین آستانه بهینه بی‌زین در هر مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش ضرایب تبدیل در هر مقیاس با یک آستانه^۵ مقایسه می‌شوند و ضرایبی با مقادیر دامنه کمتر از آستانه به مقدار صفر نگاشته می‌شوند. با وجود اینکه تبدیل ویولت به‌صورت چندمقیاسی عمل می‌کند و قادر است که در راستاهای افقی، عمودی و مورب جزئیات تصویر را در چندین سطوح تفکیکی نشان دهد، ولیکن در استخراج اطلاعات ساختارهای انحنادار تصویر توانا نیست [۳]. روش کاهش لکه در حوزه تبدیل کرولت نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۳-۱۴]. تبدیل کرولت یک تبدیل جهت‌دار چندمقیاسی است که با وجود اینکه تحلیل آن به تبدیل ویولت

وابسته است، لیکن در مقایسه با تبدیل ویولت، این تبدیل توصیف بهتری برای لبه‌ها و ساختارهای انحنادار موجود در تصویر ارائه می‌دهد. به‌علاوه، از حوزه تبدیل کانتورلت برای طراحی فیلترهای حذف لکه استفاده شده است [۲۰-۱۵]. تبدیل کانتورلت یک تبدیل چندمقیاسی و چندجهتی است که به‌طور مستقیم روی شبکه‌های (چهارخانه) مستطیلی گسسته تعریف می‌شود. به‌طور خاص تبدیل کانتورلت فاقد زیرنمونه‌برداری^۶ (NSCT) از چندین سطح (مقیاس) و مجموعه فیلترهای جهت‌دار برای نمایش اطلاعات تصویر استفاده می‌کند و قابلیت حفظ لبه‌ها و جزئیات ساختارهای هندسی تصویر مانند خطوط کناره‌نما و بافت‌ها را دارا است [۱۶]. در واقع در شرایطی که داده‌های داده شده در یک قالب نمایش گسسته (مانند پیکسل‌ها در یک تصویر) در اختیار باشند تبدیل کانتورلت نمایش دقیق‌تری از جزئیات تصویر ارائه می‌دهد و قادر است بر برخی از محدودیت‌های تبدیلات ویولت و کرولت غلبه نماید. در مقابل هنگامی که تحلیل در یک حوزه پیوسته با تعداد زیاد نقاط داده مطرح باشد (مانند آنچه در تحلیل ویدیو و متن با آن روبرو هستیم)، تبدیل کرولت توانایی بالاتری در نمایش جزئیات ساختارهای انحنادار در تصویر نشان می‌دهد. مطالعه اخیر در [۲۰] نیز نشان داده است که برای حذف لکه از تصاویر با قابلیت تفکیک نه چندان بالا، تبدیل کانتورلت در مقایسه با تبدیل کرولت عملکرد بهتری دارد. در نگرش غالب برای حذف لکه در حوزه تبدیل کانتورلت، از یک توزیع آماری پیش‌فرض (غالباً توزیع نرمال تعمیم‌یافته) برای ضرایب تبدیل استفاده می‌شود، و بر این اساس بهترین تخمین بی‌زین برای ضرایب تبدیل عاری از لکه به‌دست می‌آید [۱۸-۱۷]. از طرف دیگر به دلیل اینکه توزیع آماری ضرایب تبدیل کانتورلت دارای رفتاری با تغییرات سریع از مقدار بیشینه به مقدار صفر است، نویز لکه را می‌توان با استفاده از روش آستانه‌گذاری سخت روی ضرایب تبدیل کانتورلت به‌طور موثری کاهش داد [۱۶].

باید توجه نمود که در ادبیات موضوع روش‌های هوشمندانه‌تر و پیچیده‌تری در مقایسه با الگوریتم‌های آستانه‌گذاری و فیلترهای بی‌زین، برای کاهش نویز لکه وجود دارد (در این مورد می‌توان به الگوریتم‌های ارائه‌شده در [۶] و [۱۹] اشاره کرد). با این وجود این نوع الگوریتم‌ها دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی بوده و برای کاربردهای که در آن‌ها سرعت و زمان پیاده‌سازی از اهمیت زیادی برخوردار است، مناسب نیستند. از این جهت الگوریتم‌هایی مانند آستانه‌گذاری و فیلترهای بی‌زین که از پیچیدگی به‌مراتب پایین‌تری برخوردار هستند و در عین حال کارایی حذف نویز قابل قبولی نیز دارند، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۰-۱۶]. ایده اصلی که در این مقاله دنبال می‌شود ترکیب آستانه‌گذاری و فیلترهای بی‌زین در حوزه تبدیل کانتورلت NSCT برای رسیدن به کارایی بهتر در کاهش نویز لکه بدون افزودن چشم‌گیر پیچیدگی محاسباتی و پیاده‌سازی الگوریتم، است. در روش آستانه‌گذاری برای کاهش اثر لکه ضرایب تبدیل NSCT که از یک آستانه کوچک‌تر باشند به صفر نگاشته می‌شوند. هر چند این ضرایب ممکن است اطلاعات

درواقع تخمینی از بازتاب‌پذیری محلی در هر پیکسل است، در فرم معادله (۱) به‌عنوان تصویر مختلط شناخته شده است. از روی تصویر مختلط انواع متفاوتی از تصاویر قابل ساخت هستند که در این میان تصاویری که از روی دامنه A و لگاریتم شدت (توان) $I = A^2$ ساخته می‌شوند دارای تفسیر به‌مراتب ساده‌تری هستند. در این مقاله مدل نویز بر اساس تصویری که از روی دامنه تصویر مختلط ساخته می‌شود مورد آنالیز قرار می‌گیرد. برای N بزرگ و با فرض مولفه‌های متفرق‌ساز مستقل، براساس قضیه حد مرکزی مولفه‌های Z_1 و Z_2 دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس $\sigma^2/2$ خواهند بود و مؤلفه فاز φ نیز مستقل از دامنه و دارای توزیع یکنواخت در بازه $[-\pi, \pi]$ است. در این حالت دامنه $A = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}$ دارای تابع چگالی احتمال (PDF) رایلی به‌صورت زیر است [۱]:

$$p(A) = \frac{2A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma^2}\right) \quad A \geq 0 \quad (2)$$

متغیر تصادفی A دارای میانگین $E[A] = \delta\sqrt{\pi}/2$ و واریانس $\delta^2(1-\pi/4)$ است.

نویز لکه باعث می‌شود که کیفیت تصویر SAR کاهش یابد. بنابراین مطلوب است که قبل از تحلیل تصویر SAR نویز لکه کاهش یابد. معیارهای اصلی که در حذف نویز لکه باید همواره رعایت شود عبارت‌اند از: (۱) کاهش هر چه بیشتر واریانس نویز در نواحی همگن (۲) حفظ جزئیات بافت، لبه و خطوط و (۳) نداشتن هیچ‌گونه عوارض مصنوعی. نویز لکه یک نویز با ماهیت ضرب‌شونده است. اما به‌دلیل این‌که رویه طراحی الگوریتم‌های حذف نویز با مدل جمع‌شونده ساده‌تر است، قبل از اقدام به حذف این نویز، مدل ضرب‌شونده به جمع‌شونده تبدیل می‌شود. در این مقاله از مدل زیر استفاده شده است [۹]:

$$g(n) = f(n) \cdot u'(n) = f(n) + f(n)[u'(n) - 1] \\ = f(n) + f(n) \cdot u(n) = f(n) + v(n) \quad (3)$$

که در آن $n = [n_1, n_2]$ موقعیت پیکسل، $g(n)$ تصویر نویزدار مشاهده شده، $f(n)$ تصویر بدون نویز و $u'(n)$ نویز لکه و مستقل از $f(n)$ را نشان می‌دهند. $v(n) = f(n) \cdot u(n)$ نیز مؤلفه نویز وابسته به سیگنال $f(n)$ در مدل جمع‌شونده است. در فاز شبیه‌سازی (بخش ۴) برای اضافه کردن نویز لکه به یک تصویر بدون نویز ابتدا نمونه‌های نویز لکه $u'(n)$ بر اساس توزیع (۲) و با مقدار متوسط $E[A]$ تولید می‌شوند. سپس نمونه‌های $v(n) = f(n) \cdot u(n)$ از روی نمونه‌های نویز و تصویر بدون نویز قابل محاسبه خواهند بود.

فرض کنید که $W_f(n)$ ، $W_g(n)$ و $W_v(n)$ به ترتیب ضرایب NSCT را برای $f(n)$ ، $g(n)$ و $v(n)$ نشان دهند. به‌دلیل خطی بودن NSCT، معادله (۳) در حوزه تبدیل کانتورلت به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$W_g(n) = W_f(n) + W_v(n) \quad (4)$$

مفیدی از تصویر در خود داشته باشند که با آستانه‌گذاری این اطلاعات از بین می‌رود. بنابراین تفکیک این ضرایب از مولفه‌های نویز و حفظ آن‌ها می‌تواند باعث بهبود کیفیت تصویر بازسازی شده گردد. به‌طور ویژه، یک ایده ترکیبی ارائه شده است که سعی در بهره‌برداری توأم از مزایای روش‌های آستانه‌گذاری (یعنی سادگی پیاده‌سازی) و فیلترهای بی‌زین LMMSE/MAP (یعنی دقت بالای تخمین سیگنال) برای حذف نویز دارد. در این روش برخلاف روش‌های مرسوم آستانه‌گذاری، ضرایب NSCT با دامنه کوچک (زیر یک آستانه) با کمک فیلترهای MMSE/MAP تخمین زده شده‌اند. مقایسه کارایی روش ارائه شده با سایر روش‌های موجود براساس اندیس‌های معتبر که کیفیت حذف نویز را نشان می‌دهند، مورد مطالعه قرار گرفته است و براین اساس مزایا و معایب آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

ساختار این مقاله به شکل زیر است: در بخش دوم مفاهیم مقدماتی شامل مدل‌سازی نویز لکه، تبدیل کانتورلت به همراه مدل آماری ضرایب تبدیل معرفی شده است. در بخش سوم روش پیشنهادی حذف لکه بر پایه ترکیب آستانه‌گذاری و تخمین‌زن بی‌زین در حوزه تبدیل NSCT ارائه شده است. در بخش چهارم نتایج آزمایش‌ها روی تصاویر واقعی SAR با نویز اضافه‌شده و نویز طبیعی ارائه شده‌اند. بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مفاهیم مقدماتی

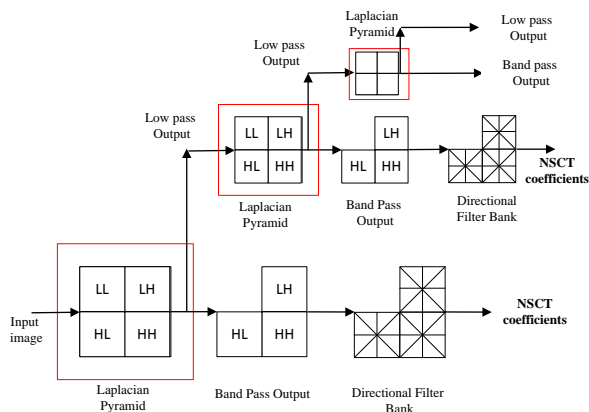
۲-۱ مدل‌سازی آماری نویز لکه

نویز لکه یک نویز ذاتی در سیستم‌های تصویربرداری راداری SAR است. عامل ایجاد این نویز ساختار تصادفی اهداف است که باعث می‌شود سیگنال‌های برگشتی حاصل از برخورد امواج الکترومغناطیسی با هدف باهم تداخل کنند. این تداخل باعث ظاهر شدن دانه‌های ریز و درشت در تصویر می‌گردد. به‌طور دقیق‌تر تفاوت فاز مولفه‌های برگشتی موج الکترومغناطیسی از صحنه هدف (سطح زمین) باعث تداخل مؤلفه‌ها در هنگام تشکیل تصویر SAR به‌عنوان برآیند مولفه‌های برگشتی، می‌شود. در ادامه یک روش ساده برای مدل‌سازی آماری نویز لکه ارائه شده است. هنگامی که موج الکترومغناطیسی با هدف برخورد می‌کند در هر سلول قابل تفکیک از صحنه هدف تعداد متفرق‌سازهای زیادی وجود دارد. در واقع وقتی موج در موقعیت (x, y) از سطح زمین دچار تفرق می‌گردد مولفه‌های فاز $\varphi(x, y)$ و دامنه $A(x, y)$ آن دچار تغییر می‌شوند. در این حالت بازتاب‌پذیری مختلط^۷ در هر سلول تفکیکی به‌صورت زیر برحسب دامنه و فاز N متفرق‌ساز قابل بیان است [۱]:

$$Ae^{j\phi} = \sum_{k=1}^N A_k e^{j\phi_k} \quad (1)$$

که در آن A_k و ϕ_k به ترتیب دامنه و فاز متفرق‌ساز k ام هستند. تصویر SAR از روی مولفه‌های $(Z_1 = A \cos(\varphi), Z_2 = A \sin(\varphi))$ کانال‌های هم‌فاز و تربیعی گیرنده ساخته می‌شود. این تصویر که

۴ ۲ تبدیل کانتورلت فاقد زیرنمونه برداری



شکل ۱: الف) ساختار تبدیل NSCT با تجزیه هرمی در دو مرحله. در هر مرحله از تجزیه با کمک یک جفت فیلتر پایین گذر و بالاگذر، مؤلفه‌های فرکانسی پایین گذر LL، میان گذر HL، LH و HH تولید می‌شوند. این مؤلفه‌ها با عبور از بانک فیلترهای جهت‌دار ضرایب NSCT را تولید می‌کنند (در شکل هر مؤلفه میان گذر به چهار زیرباند تقسیم شده است).

تبدیل ویولت و تبدیل NSCT استفاده از تابع گوسی تعمیم یافته با پارامترهای محلی پیشنهاد شده است و در طی آزمایش‌هایی عملکرد صحیح آن مورد تأیید قرار گرفته است [۱۸][۱۲]. متغیر تصادفی X باتوزیع گوسی تعمیم یافته^۴ (GGD) دارای تابع چگالی احتمال زیر است [۱۸]:

$$p_X(x) = \frac{\nu\eta}{2\Gamma(1/\nu)} e^{-(\eta|x-\mu_x|)^\nu} \quad (5)$$

که در آن $\eta = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\Gamma(3/\nu)}{\Gamma(1/\nu)}}$ پارامتر مقیاس نام دارد و به واریانس توزیع مرتبط است، ν پارامتر شکل نامیده می‌شود، μ_x میانگین توزیع است، و $\Gamma(\cdot)$ نیز تابع گاما را نشان می‌دهد. حالت‌های خاص این توزیع به ازاء $\nu=1$ و $\nu=2$ به ترتیب متناظر توزیع لاپلاسین و توزیع گوسی هستند. پارامتر ν از روی معادله غیرخطی زیر به دست می‌آید [۱۸]:

$$\frac{E[X^2]}{E[X^4]} = \frac{\Gamma(3/\nu)}{\sqrt{\Gamma(1/\nu)\Gamma(5/\nu)}} \quad (6)$$

در این رابطه $E(X^2)$ و $E(X^4)$ به ترتیب ممان‌های دوم و چهارم متغیر X را نشان می‌دهند که در مرحله پیاده‌سازی به صورت محلی از روی سیگنال مشاهده شده تخمین زده می‌شوند.

۴ ۲ آستانه‌گذاری در حوزه تبدیل NSCT

در روش آستانه‌گذاری فرض بر این است که بیشتر انرژی سیگنال بر روی تعدادی از ضرایب تبدیل که دامنه بزرگ‌تری دارند متمرکز شده است. بنابراین ضرایب تبدیل با دامنه زیر یک آستانه به عنوان مؤلفه‌های نویز تلقی می‌شوند. براین اساس حذف نویز با انقباض^۱ ضرایب تبدیل زیر آستانه به سمت مقدار صفر صورت می‌گیرد. آستانه‌گذاری می‌تواند به دو روش آستانه‌گذاری نرم و سخت انجام گیرد [۱۶][۱۲]. برای حذف نویز در حوزه تبدیل NSCT، در روش آستانه‌گذاری مرسوم یکی از نگاشت‌های نشان داده شده در شکل ۲ برای تبدیل ضریب $W_g(n)$

تبدیل کانتورلت یک تبدیل چندمقیاسی و چندجهتی است که به دلیل استفاده از عملگرهای فشرده‌ساز و گسترده‌ساز دارای خاصیت انتقال-ثابت^۵ نیست [۱۵]. به عبارت دیگر در هر مرحله از تبدیل تعداد ضرایب تغییر می‌کند. برای حصول خاصیت انتقال-ثابت تبدیل کانتورلت فاقد زیرنمونه برداری با حذف عملگرهای فشرده‌ساز و گسترده‌ساز معرفی شده است [۱۶]. در NSCT با افزایش افزونگی تعداد ضرایب در هر مرحله از تبدیل با تعداد ضرایب سیگنال ورودی برابر است و به این دلیل این تبدیل دارای خاصیت انتقال-ثابت است. ساختار تبدیل NSCT شامل دو قسمت است: ۱) ساختار هرمی فاقد زیرنمونه برداری که دارای خاصیت چندمقیاسی است، و ۲) مجموعه فیلترهای جهت‌دار که خاصیت چندجهتی را تحقق می‌بخشند. براین اساس این تبدیل قابلیت حفظ لبه‌ها و جزئیات ساختارهای هندسی تصویر مانند خطوط کناره‌ها و بافت‌ها را دارا است.

۴ ۲ ساختار هرمی فاقد زیرنمونه برداری

ساختار هرمی این تبدیل با استفاده از مجموعه فیلترهای بالاگذر و پایین گذر ایجاد می‌شود. در این تبدیل عملگرهای فشرده‌ساز و گسترده‌ساز حذف شده است و کار این عملگرها با تغییر فرکانس فیلترهای هر شاخه جبران می‌گردد. در هر مرحله از تجزیه، سیگنال به دو قسمت بالاگذر و پایین گذر تقسیم می‌گردد. به طور خاص در مرحله j ام، تجزیه بر اساس فیلتر پایین گذر دوبعدی $H_0(z)$ در باند $[-(\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ و فیلتر بالاگذر $H_1(z) = 1 - H_0(z)$ در باند $[-(\pi/2^{j-1}), (\pi/2^{j-1})]^2 \setminus [-(\pi/2^j), (\pi/2^j)]^2$ انجام شده است ($z = [z_1, z_2]^T$). شکل ۱ ساختار کلی تبدیل کانتورلت فاقد زیرنمونه برداری را برای تجزیه هرمی در دو مرحله نشان می‌دهد.

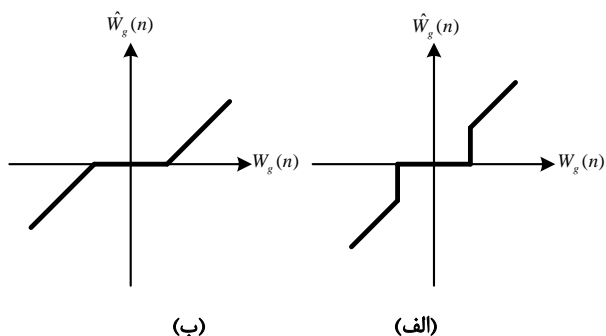
۴ ۲ مجموعه فیلترهای جهت‌دار

برای تقسیم بندی هر یک از زیرباندهای (مؤلفه‌های فرکانسی) به دست آمده از ساختار هرمی، از فیلترهای جهت‌دار استفاده شده است. با توجه به اینکه تصویر دارای دو بعد است بعد از اینکه مؤلفه‌های فرکانس پایین و بالا از هم جدا شدند، با استفاده از فیلترهای جهت‌دار مؤلفه‌های فرکانسی دو بعد نیز در هر زیرباند از هم تفکیک شده و با مرزهای فرکانسی مشخصی جدا می‌شوند. در نمونه نشان داده شده در شکل ۱، هر مؤلفه فرکانسی حاصل از تجزیه هرمی در صفحه فرکانسی دوبعدی به چهار زیرباند تقسیم شده است.

۴ ۲ توزیع گوسی تعمیم یافته

برای تخمین ضرایب کانتورلت عاری از نویز بر اساس تخمین زن MAP به یک مدل آماری که بر اساس آن PDF ضرایب تبدیل مشخص شود، نیاز است. در ادبیات موضوع برای مدل سازی توزیع آماری ضرایب

$$\sigma_{W_g(n)}^2 = E[W_g^2(n)] - [E[W_g(n)]]^2 \approx \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W_g(n)]_{i,j}^2 - \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W_g(n)]_{i,j} \quad (12)$$



شکل ۲: نگاشت ورودی-خروجی $\hat{W}_g(n) = R.W_g(n)$ در (الف) آستانه‌گذاری سخت، و (ب) آستانه‌گذاری نرم. R با روابط (۸) و (۹) تعیین می‌شود.

براین مبنا واریانس تصویر بدون نویز برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{W_f(n)}^2 = \max(\sigma_{W_g(n)}^2 - \sigma_{W_v}^2, 0) \quad (13)$$

۳ روش پیشنهادی حذف لکه

همچنان که در قسمت ۲-۴ بیان شد، روش آستانه‌گذاری علی‌رغم اینکه از پیاده‌سازی ساده‌ای برخوردار است ولیکن دارای نقاط ضعف مشخصی نیز هست. در این روش ضرایب کوچک‌تر از مقدار آستانه به صفر نگاشته می‌شوند. هرچند این ضرایب ممکن است اطلاعات مفیدی از تصویر را در خود داشته باشند که با آستانه‌گذاری این اطلاعات از بین می‌رود. این مسئله به نوبه خود می‌تواند به مات شدن تصویر و از دست رفتن اطلاعات لبه‌ها منجر شود. بنابراین تفکیک این ضرایب از مولفه‌های نویز و حفظ آن‌ها می‌تواند باعث بهبود کیفیت تصویر بازسازی شده گردد. ایده روش پیشنهادی به این صورت قابل بیان است که در الگوریتم آستانه‌گذاری به جای نگاشت ضرایب زیر آستانه به مقدار صفر، از تخمین‌زن‌های بی‌زیان LMMSE/MAP برای تخمین ضرایب تبدیل در ناحیه زیر آستانه استفاده شود. این به آن معنا است که فرم تابع نگاشت آستانه‌گذاری در محدوده ورودی زیر آستانه براساس یک رویه بهینه‌سازی استخراج خواهد شد.

با توجه به اینکه از تخمین‌زن‌های بی‌زیان LMMSE/MAP به عنوان بلوک‌های پایه‌ای در روش پیشنهادی استفاده شده است، در این بخش ابتدا روابط فرم‌بسته‌ای برای تخمین‌زن‌های بی‌زیان استخراج شده است.

۴ تخمین‌زن MAP

در این زیربخش تخمین‌زن MAP برای ضرایب کانتورلت بدون نویز از روی ضرایب نویزدار استخراج شده است. تخمین MAP از تابع چگالی احتمال شرطی ضرایب بدون نویز به صورت زیر استفاده می‌کند [۹]:

$$\hat{w}_f = \arg \max_{w_f} p(w_f | w_g) \quad (14)$$

با استفاده از قانون بی‌زیان و لگاریتم‌گیری رابطه زیر به دست می‌آید:

به $\hat{W}_g(n)$ به کار می‌رود. رابطه ورودی-خروجی نگاشت آستانه‌گذاری با پارامتر وزن R به صورت زیر است [۱۶]:

$$\hat{W}_g(n) = R.W_g(n) \quad (7)$$

در آستانه‌گذاری سخت با مقدار آستانه λ داریم:

$$R = \begin{cases} 0, & |W_g(n)| < \lambda \\ 1, & |W_g(n)| \geq \lambda \end{cases} \quad (8)$$

در آستانه‌گذاری سخت اگر مقدار ضریب از مقدار آستانه به دست آمده بزرگ‌تر باشد تغییری در آن ایجاد نمی‌شود. در آستانه‌گذاری نرم ضرایب بزرگ‌تر از مقدار آستانه به اندازه مقدار ثابتی جابجا می‌شوند. در این حالت ضریب وزن به صورت زیر قابل بیان است:

$$R = \begin{cases} 0, & |W_g(n)| < \lambda \\ 1 - \frac{\lambda}{|W_g(n)|}, & |W_g(n)| \geq \lambda \end{cases} \quad (9)$$

باید توجه نمود که روش آستانه‌گذاری سخت دارای ناپیوستگی در تابع نگاشت خود است و به این دلیل ممکن است اثرات تصنعی غیرمنتظره‌ای را در تصویر بازسازی شده ایجاد کند. این موضوع به خصوص در حالتی که نویز انرژی قابل ملاحظه‌ای داشته باشد اهمیت پیدا می‌کند. اگرچه روش آستانه‌گذاری نرم از نظر بصری تصاویر مطلوب‌تری را ایجاد می‌نماید، ولیکن وجود یک فاصله ثابت مابین ضرایب ورودی و خروجی نگاشت می‌تواند باعث اثرات تیرگی و محوشدگی در تصویر بازسازی شده شود. از طرف دیگر انتخاب مقدار آستانه در این روش از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با پیش فرض توزیع GGD برای ضرایب تبدیل سیگنال و توزیع نرمال برای ضرایب نویز، مقدار آستانه براساس فرمول (۱۰) به مقدار بهینه آستانه بسیار نزدیک است. براین اساس و با کمک فرمول (۴)، تخمین بی‌زیان مقدار آستانه در هر مرحله از تجزیه و برای هر زیرباند به صورت جداگانه طبق فرمول زیر محاسبه می‌گردد [۱۲]:

$$\lambda_{l,k} = \frac{(\sigma_{W_v}^2)_{l,k}}{(\sigma_{W_f})_{l,k}} \quad (10)$$

که $\lambda_{l,k}$ مقدار آستانه، $(\sigma_{W_v}^2)_{l,k}$ واریانس نویز، و $(\sigma_{W_f})_{l,k}$ انحراف معیار ضرایب تبدیل تصویر بدون نویز در مرحله l ام از تجزیه و در زیرباند k ام، را نشان می‌دهند. برای محاسبه عددی مقدار آستانه باید این دو پارامتر محاسبه شوند. برای محاسبه واریانس نویز تخمین میانگین به صورت زیر به کار برده می‌شود [۱۲]:

$$(\sigma_{W_v})_{l,k} = \frac{\text{median}(W_g(n)_{l,k})}{0.6745} \quad (11)$$

برای محاسبه انحراف معیار تصویر بدون نویز، ابتدا واریانس تصویر نویزدار به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

$$\Rightarrow -\frac{(w_g - \hat{w}_f)}{\sigma_{w_v}^2} - \frac{\sqrt{2}}{\sigma_{w_f}} \frac{w_f - \mu_{w_f}}{|\hat{w}_f - \mu_{w_f}|} = 0$$

$$\Rightarrow \hat{w}_f = \begin{cases} w_g - \frac{\sqrt{2}\sigma_{w_v}^2}{\sigma_{w_f}}, & w_g \geq \mu_{w_f} + \frac{\sqrt{2}\sigma_{w_v}^2}{\sigma_{w_f}} \\ w_g + \frac{\sqrt{2}\sigma_{w_v}^2}{\sigma_{w_f}}, & w_g < \mu_{w_f} - \frac{\sqrt{2}\sigma_{w_v}^2}{\sigma_{w_f}} \\ \mu_{w_f}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

۴-۳ تخمین‌زن LMMSE

تخمین‌زن LMMSE به دلیل سادگی و داشتن خطای میانگین مربعات کم مورد توجه است. این تخمین‌زن فقط به همبستگی بین مشاهدات و متغیر مجهول بستگی دارد و محاسبه آن نیازی به داشتن تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی ندارد. فرض کنید $W_f(n)$ و $W_g(n)$ به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب کانتورلت تصویر بدون نویز و تصویر نویزدار باشند. به دلیل اینکه نویز و تصویر ناهمبسته بوده و نویز دارای مقدار متوسط صفر است، تخمین‌زن LMMSE را می‌توان در حوزه کانتورلت به صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$\hat{W}_f(n) = E[W_f(n)] + \frac{\text{cov}(W_f(n), W_g(n))}{\text{var}(W_g(n))} (W_g(n) - E[W_g(n)])$$

$$= E[W_f(n)] + \frac{\sigma_{w_f(n)}^2}{\sigma_{w_f(n)}^2 + \sigma_{w_v(n)}^2} (W_g(n) - E[W_g(n)]) \quad (21)$$

از رابطه (۲۱) مشخص است که تخمین‌زن LMMSE تنها به ممان‌های مرتبه اول و دوم مولفه‌های سیگنال و نویز وابسته است و برای تعیین آن نیازی به دانستن تابع چگالی احتمال توأم نخواهد بود.

۴-۳ محاسبه ممان‌های اول و دوم ضرایب تبدیل NSCT

برای استفاده از تخمین‌زن‌های MAP و LMMSE در معادلات (۲۱) - (۲۰) لازم است که مقادیر ممان‌های اول و دوم ضرایب تبدیل کانتورلت $W_f(n)$ و $W_v(n)$ محاسبه شوند. به دلیل اینکه سیگنال اولیه دریافتی رادار SAR یک فرایند تصادفی است، فرض می‌شود که تنها یکی از تحقق‌های آن (تصویر مورد نظر) در دسترس است. بنابراین نمی‌توان به طور مستقیم ممان‌های آن را محاسبه کرد. با این وجود اگر سیگنال تصویر SAR به صورت محلی فرایندی ایستاد و ارگودیک فرض شود در این صورت می‌توان با کمک متوسط‌های مکانی (به جای آماری) ممان‌های آن را تخمین زد.

الف) متوسط و واریانس $W_v(n)$

به دلیل اینکه نویز $v(n)$ فرایندی با مقدار متوسط صفر است، به سادگی می‌توان نشان داد که بعد از اعمال تبدیل کانتورلت ضرایب $W_v(n)$ نیز دارای مقدار متوسط صفر هستند و بنابراین خواهیم داشت $\sigma_{w_v}^2 = E[W_v^2(n)]$. برای محاسبه ممان دوم متغیر $W_v(n)$ ، در مرجع

$$\hat{w}_f = \arg \max_{w_f} [\log p(w_g | w_f) + \log p_{w_f}(w_f)] \quad (15)$$

حال با توجه به رابطه (۴) می‌توان نوشت:

$$\hat{w}_f = \arg \max_{w_f} [\log p_{w_v}(w_g - w_f) + \log p_{w_f}(w_f)] \quad (16)$$

برای محاسبه کمیت تخمین فوق به PDF متغیرهای نویز و سیگنال نیاز است. مطالعات انجام شده در [۱۸] و [۲۱] اعتبار استفاده از توزیع (۵) برای ضرایب کانتورلت را تأیید می‌کند. به طور خاص لازم است برای هر زیرباند در ابتدا ممان‌های اول، دوم و چهارم مولفه‌های نویز و سیگنال به صورت محلی و با کمک ضرایب تبدیل در یک همسایگی پنجره مربعی تخمین زده شوند. سپس با حل معادله غیرخطی (۶) پارامتر شکل برای هر توزیع به طور جداگانه محاسبه شود. با این وجود، در این مقاله برای محدود کردن بار محاسباتی و به دست آوردن یک جواب در فرم بسته، برای تابع چگالی احتمال ضرایب کانتورلت سیگنال بدون نویز و همچنین ضرایب کانتورلت نویز لکه به ترتیب از توابع توزیع لاپلاسین و گوسی استفاده شده است. البته نتایج حاصل از پیاده‌سازی تخمین‌زن مورد نظر در بخش ۴ نیز تأییدکننده کارایی مناسب این فرض است. برای این منظور تنها کافی است که میانگین و واریانس مولفه‌های نویز و سیگنال به صورت محلی تخمین زده شوند. بنابراین برای PDF متغیرهای تصادفی $W_f(n)$ و $W_v(n)$ به ترتیب توزیع لاپلاسین با متوسط μ_{w_f} و توزیع گوسی با متوسط صفر به شکل زیر به کار برده می‌شوند [۹]:

$$p_{w_f}(w_f) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{w_f}} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|w_f - \mu_{w_f}|}{\sigma_{w_f}}\right) \quad (17)$$

$$p_{w_v}(w_v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{w_v}} \exp\left(-\frac{w_v^2}{2\sigma_{w_v}^2}\right) \quad (18)$$

بر این اساس، با مشتق‌گیری از معادله (۱۶) نقاط بیشینه مطابق رابطه زیر قابل استخراج خواهند بود:

$$\frac{\partial(\log p_{w_v}(w_g - w_f))}{\partial w_f} + \frac{\partial(\log p_{w_f}(w_f))}{\partial w_f} \Big|_{w_f = \hat{w}_f} = 0 \quad (19)$$

با جایگذاری روابط (۱۷-۱۸) در (۱۹) و انجام عمل مشتق‌گیری به صورت زیر، جواب فرم بسته مطابق معادله (۲۰) قابل حصول است:

$$\frac{\partial}{\partial w_f} \left[-\frac{(w_g - w_f)^2}{2\sigma_{w_v}^2} \right] \Big|_{w_f = \hat{w}_f} + \frac{\partial}{\partial w_f} \left[-\frac{\sqrt{2}|w_f - \mu_{w_f}|}{\sigma_{w_f}} \right] \Big|_{w_f = \hat{w}_f} = 0 \quad (20)$$

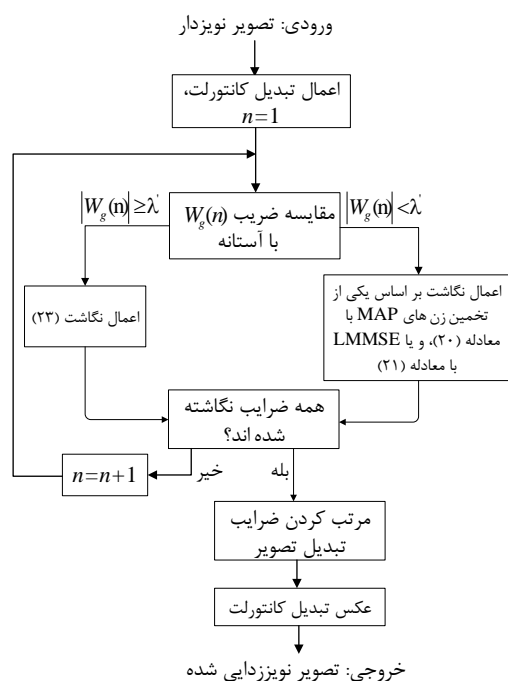
○ اگر $|W_g(n)| \geq \lambda$ باشد آنگاه بسته به این که کدام یک از روش‌های آستانه‌گذاری مرسوم مدنظر باشد، نگاشت زیر اعمال شود:

$$\hat{W}_f(n) = \begin{cases} W_g(n), & HT \text{ is used} \\ \left(1 - \frac{\lambda}{|W_g(n)|}\right) W_g(n), & ST \text{ is used} \end{cases} \quad (23)$$

HT و ST به ترتیب به آستانه‌گذاری سخت و نرم اشاره دارند.

○ اگر $|W_g(n)| < \lambda$ باشد آنگاه بسته به این که از کدام یک از تخمین‌زن‌های (۲۰) و یا (۲۱) استفاده شود، $\hat{W}_f(n)$ با استفاده از تخمین‌زن LMMSE یا MAP به دست آید.

۵ - بعد از محاسبه و مرتب نمودن ضرایب NSCT، عکس تبدیل کانتورلت برای بازسازی تصویر اعمال می‌شود.



شکل ۳: الگوریتم روش پیشنهادی حذف نویز لکه با آستانه λ .

جدول ۱: چهار حالت مختلف پیاده‌سازی ممکن در فلوچارت شکل ۳ برحسب نوع تخمین‌زن به کارگرفته شده و نوع آستانه‌گذاری استفاده شده.

نوع تخمین‌زن	آستانه‌گذاری سخت	آستانه‌گذاری نرم
LMMSE	LH	LS
MAP	MH	MS

۴- ارزیابی کارایی روش‌های حذف لکه در تصاویر SAR

شبیه‌سازی و بررسی نتایج برای دو تصویر با ابعاد 512×512 صورت گرفته است. تصویر اول به‌عنوان یک تصویر مرجع بدون نویز انتخاب شده است. برای اهداف ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های حذف لکه، به

[۲۲] پیشنهادی ارائه شده است که براساس آن ابتدا ضرایب $W_v(n)$ برحسب کانولوشن حوزه مکانی $v(n)$ با یک فیلتر میان‌گذر معادل نوشته می‌شوند. در مرحله بعد با اعمال توان دوم بر جمع کانولوشن و سپس محاسبه متوسط آن، نتیجه مورد نظر به دست می‌آید. با این وجود، همچنان که در [۱۱-۱۲] نیز تأیید شده است، یک تخمین ساده‌تر و البته قابل قبول برای مقدار σ_{W_v} از معادله (۱۱) وقتی که روی زیرباند مولفه‌های فرکانس بالای HH (شکل ۱) محاسبه شود، به دست می‌آید.

ب) متوسط و واریانس $W_f(n)$

با توجه به اینکه $E[W_v(n)] = 0$ است بنابراین از رابطه (۴) خواهیم داشت $E[W_f(n)] = E[W_g(n)]$. بنابراین $E[W_f(n)]$ را می‌توان به صورت محلی در هر زیرباند با میانگین‌گیری مکانی از ضرایب $W_g(n)$ به دست آورد. برای محاسبه ممان دوم مطابق رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$E[W_g^2(n)] = E[(W_f(n) + W_v(n))^2] = E[W_g^2(n)] + E[W_v^2(n)] \quad (22)$$

تساوی دوم در رابطه فوق به دلیل استقلال $f(n)$ و $u(n)$ در رابطه (۳) و تساوی $E[u(n)] = 0$ حاصل شده است. براین اساس واریانس ضرایب $W_g(n)$ قابل محاسبه خواهد بود و از فرمول $\sigma_{W_f}^2(n) = \sigma_{W_g}^2(n) - \sigma_{W_v}^2(n)$ واریانس $W_f(n)$ نیز محاسبه می‌شود.

۳ روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی از یکی از نگاشت‌های آستانه‌گذاری سخت و یا نرم (روابط (۸) و (۹)) برای حذف نویز استفاده شده است با این تفاوت که تخمین ضرایب تبدیل در ناحیه زیر آستانه با کمک تخمین‌زن‌های بیزین انجام شده است. در این مورد باید توجه داشت که استفاده از تخمین‌زن LMMSE در (۲۱) به‌عنوان یک نگاشت مستوی و استفاده از تخمین‌زن MAP در (۲۰) به‌عنوان یک نگاشت غیرخطی قابل تفسیر است. با توجه به کارآمد بودن و همچنین سادگی پیاده‌سازی و وجود پارامترهای مورد نیاز برای تخمین‌زن‌های LMMSE/MAP ارائه شده در روابط (۲۰-۲۱)، استفاده از این تخمین‌زن‌ها برای محاسبه ضرایب بدون نویز پیچیدگی محاسباتی بالایی نخواهد داشت. شکل ۳ روند الگوریتم پیشنهادی را نمایش می‌دهد. در این الگوریتم با توجه به نوع آستانه‌گذاری و همچنین نوع تخمین‌زن بیزین مورد استفاده چهار حالت به وجود می‌آید، برای سادگی و پرهیز از تکرار از حروف مخفف مطابق جدول ۱ برای هر کدام از این حالت‌ها استفاده شده است.

مراحل الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زیر است:

- ۱ - تبدیل مدل ضرب‌شونده نویز به مدل جمع‌شونده با فرمول (۳).
- ۲ - اجرای تبدیل NSCT برای دستیابی به زیرباندها و ضرایب تبدیل.
- ۳ - محاسبه پارامترهای مورد نیاز و مقدار آستانه بهینه به روش بیزین در هر زیرباند.
- ۴ - اعمال روش آستانه‌گذاری برای هر یک از ضرایب زیرباندها براساس مقدار آستانه به‌صورت زیر:

در دسترس نباشد مناسب است و در صورتی معتبر است که روش حذف نویز در حفظ مقدار میانگین تصویر عملکرد خوبی داشته باشند. برای ارزیابی مقدار انحراف میانگین تصاویر به دست آمده از پارامتر MPI^4 به صورت زیر استفاده شده است [۶]:

$$MPI = \left| \frac{mean(f_{o,H}) - mean(\hat{f}_H)}{mean(f_{o,H})} \right| \quad (27)$$

که در آن $f_{o,H}$ به ناحیه همگن انتخاب شده از تصویر اولیه با نویز اشاره دارد. مقدار کوچکتر MPI به معنای حفظ بهتر مقدار میانگین است. برای ارزیابی قابلیت حفظ لبه‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف لکه از شاخص ESI^5 استفاده شده است. این شاخص به صورت جداگانه برای دو راستای عمودی و افقی محاسبه می‌شود. برای تصویری با اندازه $M \times N$ پیکسل، ESI در راستاهای افقی و عمودی به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۶]:

$$ESI^h = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |\hat{f}[i, j+1] - \hat{f}[i, j]|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} |f_o[i, j+1] - f_o[i, j]|} \quad (28)$$

$$ESI^v = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |\hat{f}[i+1, j] - \hat{f}[i, j]|}{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N |f_o[i+1, j] - f_o[i, j]|} \quad (29)$$

شاخص ESI بر روی تصویر نویززدایی شده \hat{f} و تصویر اولیه f_o گرفته می‌تواند هم تصویر مرجع بدون نویز و هم تصویر اولیه نویزدار در نظر گرفته شود، قابل محاسبه است [۶]. مقدار بزرگتر ESI به معنای حفظ بهتر جزئیات لبه‌ها است.

۴-۴ ختایج شبیه‌سازی روی تصویر مرجع با نویز اضافه شده

در ادبیات موضوع غالباً تصویر مرجع بدون نویز به صورت مصنوعی ساخته و شبیه‌سازی می‌شود. با این حال نتایج تجربی روی تصاویر شبیه‌سازی SAR نشان می‌دهد که تصاویر مرجع ساختگی برای استدلال در مورد عملکرد حذف لکه فیلترها روی تصاویر واقعی SAR به اندازه کافی مناسب نیستند [۳]. علت این مسئله این است که تصاویر نویزی که با اضافه کردن نویز به تصویر مرجع ساخته می‌شوند ممکن است که از نظر خصوصیات آماری با تصاویر واقعی SAR نویزدار هم‌خوانی نداشته باشند. از این رو انتخاب تصویر مرجع که انعکاس واقعی صحنه هدف را نشان دهد از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل ۴(الف) یک نمونه تصویر دیجیتال هوایی صحنه شهر سان‌فرانسیسکو (San Francisco) را نشان می‌دهد که به عنوان تصویر مرجع بدون نویز مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. این تصویر به عنوان دامنه تصویر مختلط مورد آنالیز قرار می‌گیرد. برای اضافه کردن نویز ابتدا نمونه‌های نویز لکه $u'(n)$ بر اساس توزیع (۲) و با مقدار متوسط $E[A]$ تولید می‌شوند. سپس براساس رابطه (۳) نمونه‌های نویز در مقادیر دامنه تصویر ضرب می‌شوند. بر این اساس یک تصویر SAR در فرمت دامنه همراه با نویز شبیه‌سازی می‌شود.

تصویر اول مطابق فرمول (۳) نویز لکه اضافه شده است. برای تصویر دوم از یک تصویر SAR با نویز لکه واقعی استفاده شده است که با کمک سیگنال دریافتی آنتن گیرنده SAR بازسازی شده است. برای ارزیابی کارایی روش‌های حذف نویز علاوه بر مقایسه بصری، از شاخص‌های شناخته شده‌ای که به صورت کمی قابل محاسبه هستند استفاده شده است. چندین شاخص کارایی برای ارزیابی کیفیت فیلترهای حذف لکه ارائه شده است که به صورت اساسی در دو گروه شاخص‌های با تصویر مرجع و شاخص‌های بدون تصویر مرجع طبقه‌بندی می‌شوند [۲۳]. شاخص‌های با تصویر مرجع عموماً در ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های حذف نویز به کار گرفته می‌شوند و در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تصویر مرجع بدون نویز در دسترس باشد. شاخص‌های بدون تصویر مرجع برای ارزیابی کیفیت حذف لکه از تصاویری مناسب هستند که دسترسی به تصویر بدون نویز آن‌ها مقدور نیست. در مقاله حاضر شاخص‌هایی از هر دو گروه مذکور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از تبدیل NSCT دو مرحله‌ای مطابق شکل ۱ استفاده شده است. به علاوه، در استخراج تخمین‌زن‌های MAP/LMMSE در معادلات (۲۰-۲۱)، برای محاسبه محلی ممان‌های اول و دوم ضرایب تبدیل از پنجره‌ای با ابعاد 11×11 استفاده شده است. استفاده از پنجره متحرکی با ابعاد مذکور دقت مناسبی برای تخمین محلی پارامترهای توابع PDF ضرایب فراهم می‌آورد [۲۴].

۴-۴ معرفی شاخص‌های ارزیابی کیفیت

یک معیار معروف در ارزیابی کیفیت حذف نویز شاخص $PSNR^{11}$ است که براساس مقدار میانگین مربع خطا MSE^{12} تعریف می‌شود. MSE برای یک تصویر $M \times N$ پیکسل به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f[i, j] - \hat{f}[i, j])^2 \quad (24)$$

که در آن \hat{f} به تصویر نویززدایی شده و f به تصویر اصلی بدون نویز اشاره دارند. در این صورت $PSNR$ طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۳]:

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{f_{Peak}^2}{MSE} \right) \quad (25)$$

که در آن f_{Peak} حداکثر مقدار نمونه‌های تصویر را نشان می‌دهد. شاخص $PSNR$ برای شرایطی که تصویر مرجع بدون نویز در دسترس باشد مناسب است و مقدار بزرگتر آن کارایی بهتر حذف نویز فیلتر را نشان می‌دهد.

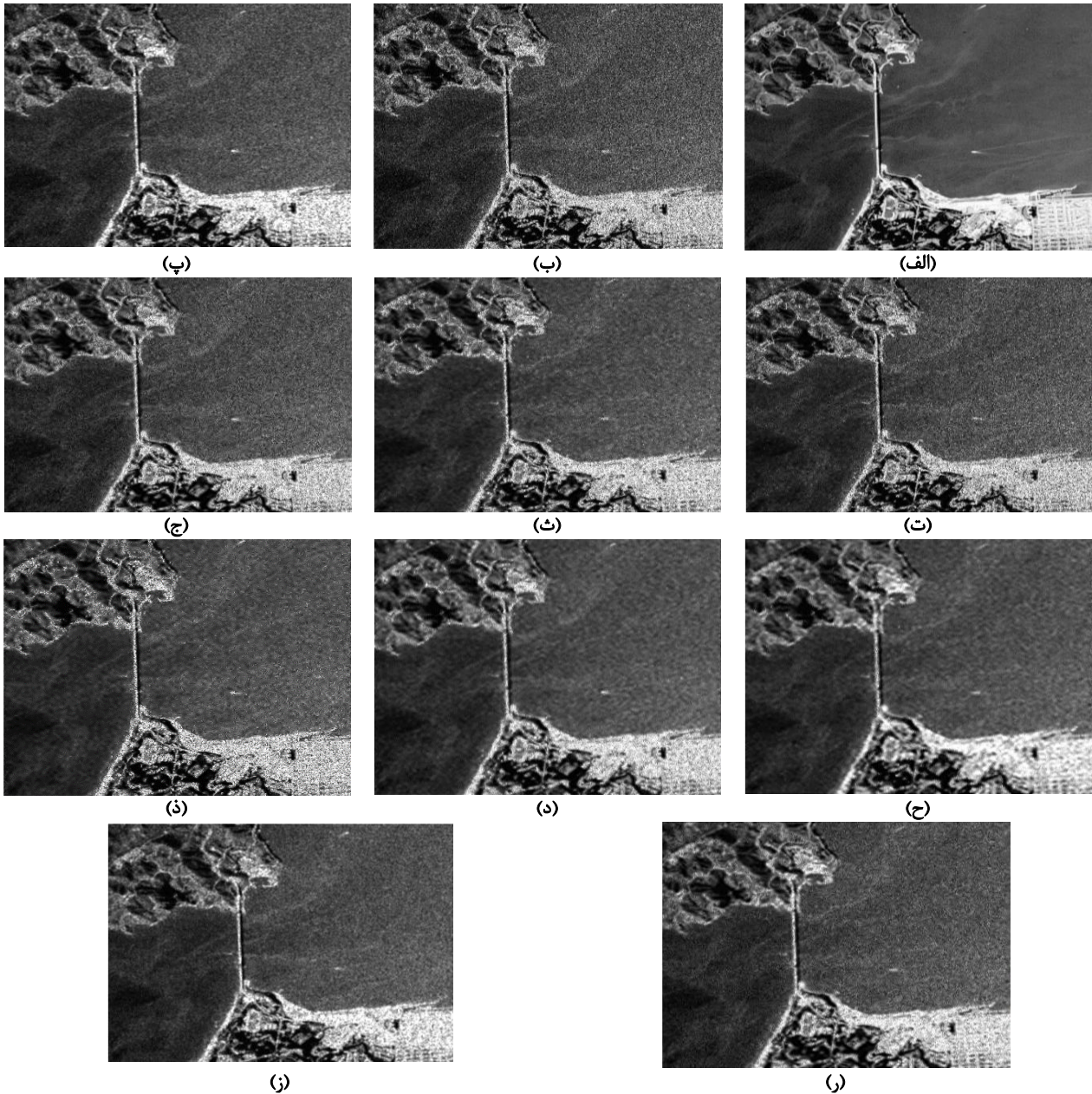
شاخص ENL^{13} سطح نویز لکه در یک ناحیه همگن از تصویر نویززدایی شده را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعریف شده است [۶]:

$$ENL = \frac{(mean(\hat{f}_H))^2}{var(\hat{f}_H)} \quad (26)$$

که در آن \hat{f}_H به تصویر یک ناحیه همگن انتخاب شده از تصویر نویززدایی شده اشاره دارد. مقدار بزرگتر ENL به معنای کیفیت بهتر حذف لکه است. شاخص ENL برای شرایطی که تصویر مرجع بدون نویز

۶ (الف) و (ب) به ترتیب نمودارهای شاخص‌های $PSNR$ ، ESI^h و ESI^v را برحسب مقدار آستانه λ' برای روش‌های مختلف حذف لکه وقتی نویز با متوسط $E[A]=1$ به تصویر مرجع اضافه شده است، نشان

شکل ۴ (ب) یک نمونه از تصویر مرجع با نویز اضافه شده با $E[A]=1$ را نشان می‌دهد. برای ارزیابی کیفیت حذف نویز فیلترهای مختلف دو نمونه نویز نسبتاً قوی و نسبتاً ضعیف با متوسط‌های به ترتیب $E[A]=1$ و $E[A]\approx 0.31$ در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۵ و



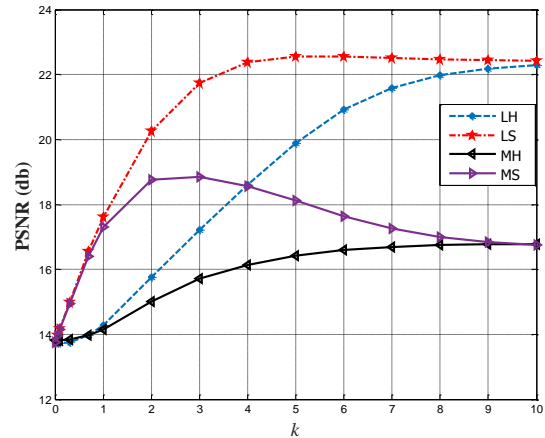
شکل ۴ (الف) تصویر مرجع بدون نویز، (ب) تصویر مرجع با نویز اضافه‌شده با متوسط واحد $E[A]=1$ (معادله (۲) را ببینید)، (پ) حذف نویز با فیلتر LEE، (ت) حذف نویز با آستانه‌گذاری سخت، (ث) حذف نویز با آستانه‌گذاری نرم، (ج) حذف نویز با فیلتر MAP، (ح) حذف نویز با فیلتر LMMSE، (د) حذف نویز با روش پیشنهادی LS، (ذ) حذف نویز با روش پیشنهادی LH، (ر) حذف نویز با روش پیشنهادی MS، (ز) حذف نویز با روش پیشنهادی MH.

می‌دهند. برای بررسی اثر آستانه بر کارایی الگوریتم شکل ۳ مقدار آستانه به صورت $\lambda' = k\lambda$ ($0 \leq k \leq 10$) انتخاب شده است که در آن λ آستانه بیزین در رابطه (۱۰) را نشان می‌دهد. محور افقی در شکل‌های مذکور مقدار k را نشان می‌دهد.

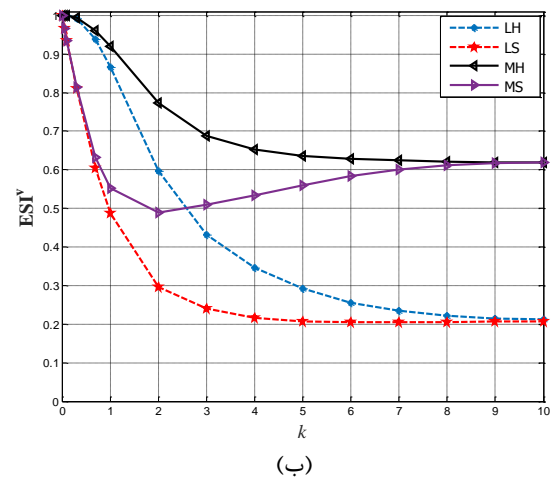
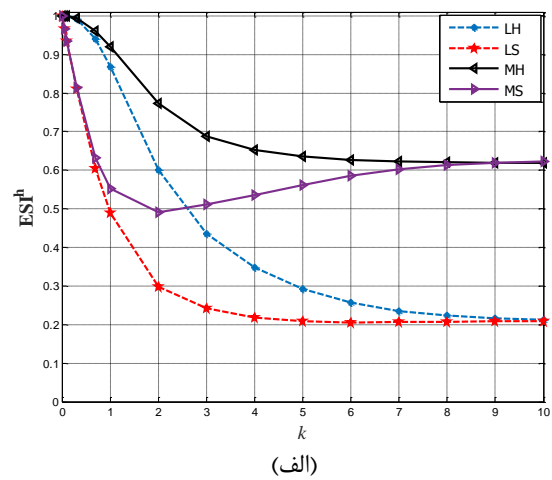
می‌شود. بنابراین در این حالت عملاً یکی از الگوریتم‌های LMMSE (متناظر حالت‌های LH و LS) و یا MAP (متناظر حالت‌های MH و MS) پیاده‌سازی می‌شود. از این‌رو در نقاط ابتدا و انتهای نمودارها مقادیر شاخص‌ها به ترتیب متعلق به تصویر نویزی ورودی الگوریتم و تصاویر خروجی تخمین‌زن‌های LMMSE/MAP خواهند بود. در فاصله $(0 < k < 10)$ یک مصالحه بین شاخص‌های $PSNR$ و ESI برای روش‌های LH و MS مشاهده می‌شود. به این معنا که با افزایش مقدار آستانه شاخص $PSNR$ افزایش و شاخص ESI کاهش می‌یابد (حذف بهتر نویز به از دست دادن بیشتر اطلاعات لبه‌ها می‌انجامد). با این وجود برای روش‌های MS و LS (و به‌طور خاص MS) می‌توان نقاط بیشینه و کمینه‌ای در منحنی‌های $PSNR$ و ESI مشاهده نمود. به‌عنوان یک نتیجه مهم، می‌توان با انتخاب مقدار مناسب آستانه براساس شکل‌های فوق نتایج حذف لکه بهتری در مقایسه با روش‌های آستانه‌گذاری معمولی و روش‌های LMMSE/MAP به دست آورد. برای روشن شدن بهتر این ادعا در جداول ۲ و ۳ نتایج $PSNR$ و ESI به ترتیب برای دو مقدار متفاوت قدرت نویز لکه با پارامترهای $\sigma = 2/\sqrt{\pi}$ (نویز نسبتاً قوی متناظر با $E[A]=1$) و $\sigma = \sqrt{0.125}$ (نویز نسبتاً ضعیف متناظر با $E[A] \approx 0.31$)، نشان داده شده است. این نتایج بر روی تصاویر خروجی فیلترهای مختلف محاسبه شده‌اند که در شکل‌های ۴(ب) تا ۴(ز) نشان داده شده‌اند. علت استفاده از دو قدرت مختلف نویز لکه این است که کارایی الگوریتم‌های حذف لکه در سطوح مختلف قدرت نویز آشکار شود. به‌علاوه، در استخراج مقادیر شاخص‌ها در جداول ۲ و ۳ و نمایش تصاویر در شکل ۴ از آستانه متناظر $k=2$ استفاده شده است که براساس منحنی‌های شکل‌های ۵ و ۶ مصالحه مناسبی بین شاخص‌های $PSNR$ و ESI را نشان می‌دهد (نقطه بیشینه منحنی $PSNR$ در روش MS متناظر با $k=2$ است). لازم به ذکر است که سه ردیف انتهایی جداول ۲ و ۳ مقادیر شاخص‌ها را برای $k=0$ و $k=10$ نشان می‌دهند. در حالت $k=0$ که متناظر نقطه ابتدایی منحنی‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ است، خروجی الگوریتم شکل ۳ با ورودی نویزی آن برابر است. در حالت $k=10$ که متناظر نقطه انتهایی منحنی‌ها است، خروجی الگوریتم شکل ۳ تقریباً با خروجی روش تخمین بی‌بین برابر است.

جدول ۲. شاخص‌های کارایی $PSNR$ ، ESI^h و ESI^v برای فیلترهای مختلف حذف لکه با نویز نسبتاً قوی ($E[A]=1$)، $\sigma = 2/\sqrt{\pi}$

Image Under Test	PSNR	ESI^h	ESI^v
Noisy Image	۱۳/۷۸	۱	۱
Lee Filter [4]	۲۲/۴	۰/۲۳	۰/۲۲
Hard Thresholding (HT)	۱۴/۳	۰/۸۶	۰/۸۶
Soft Thresholding (ST)	۱۷/۶	۰/۴۸	۰/۴۸
MAP	۱۶/۷	۰/۶۲	۰/۶۲
LMMSE	۲۲/۴۵	۰/۲۰	۰/۲۰



شکل ۵: PSNR بر حسب k برای روش‌های مختلف حذف لکه وقتی نویز با متوسط $E[A]=1$ به تصویر مرجع اضافه شده است ($\lambda' = k\lambda$).



شکل ۶: ESI بر حسب k برای روش‌های مختلف حذف لکه وقتی نویز با متوسط $E[A]=1$ به تصویر مرجع اضافه شده است. الف) ESI^h ، ب) ESI^v .

در الگوریتم شکل ۳ مقدار $k=0$ ($\lambda = 0$) تنها شاخه متناظر با تصمیم $|W_g(n)| \geq \lambda'$ انتخاب می‌شود و عملاً خروجی الگوریتم با ورودی آن برابر است (تصویر خروجی برابر تصویر نویزی ورودی الگوریتم است). از طرف دیگر، برای مقادیر بزرگ k ($k \approx 10$) در بیشتر موارد شاخه متناظر با تصمیم $|W_g(n)| < \lambda'$ در الگوریتم انتخاب

هستند: (۱) در سطح پایین تر قدرت نویز روش MAP از هر نظر بهتر از LMMSE عمل می‌کند؛ (۲) روش‌های LH و LS هر دو بهتر از LMMSE عمل می‌کنند؛ (۳) بالاترین مقدار PSNR به‌وسیله روش LS ایجاد شده است. در انتها لازم به ذکر است که با توجه به قدرت بالای نویز لکه در سناریوی $E[A]=1$ ، عملاً تفاوت بصری تصاویر نویززدایی شده در شکل ۴ قابل ملاحظه نیست.

بنابراین استفاده از مقادیر کمی شاخص‌ها در جداول ۲ و ۳ برای قضاوت در مورد کارایی الگوریتم‌های به‌کار رفته، دقت بهتری را فراهم می‌کند.

۴-۴ ختایج شبیه‌سازی روی تصاویر واقعی SAR با نویز طبیعی

شکل ۷ یک تصویر واقعی SAR با نویز لکه طبیعی ایجاد شده در حین تصویربرداری را نشان می‌دهد. برای بررسی کارایی روش‌های حذف نویز نواحی همگن A و B (نشان داده شده روی تصویر) برای محاسبه شاخص ENL مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جدول ۴ شاخص‌های ENL و ESI را برای روش‌های مختلف حذف لکه نشان می‌دهد. محاسبه شاخص MPI نیز نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این شاخص برای تصویر خروجی حاصل از فیلتر LMMSE و به ترتیب برابر 0.024 و 0.028 در نواحی A و B، خواهد بود (شاخص MPI محاسبه‌شده برای تصاویر خروجی سایر فیلترهای حذف لکه از این مقادیر کوچک‌تر هستند که به دلیل کمبود جا گزارش نشده‌اند). براین اساس روش‌های حذف نویز موردنظر در حفظ مقدار میانگین تصویر عملکرد خوبی دارند. با توجه به نتایج جدول ۴ موارد زیر قابل بیان هستند: (۱) روش‌های LS و LH از هر دو جنبه حذف نویز (ENL بالاتر) و حفظ اطلاعات لبه‌ها (ESI بزرگ‌تر) از روش LMMSE بهتر عمل کرده‌اند؛ (۲) روش MH به‌صورت جزئی بهتر از MAP عمل کرده است و این در حالی است که پیچیدگی محاسباتی پیاده‌سازی این روش به‌مراتب از روش MAP پایین‌تر است (در روش MAP لازم است پارامترهای توابع چگالی احتمال به‌صورت محلی برای تمامی ضرایب تخمین زده شوند)؛ (۳) روش‌های ترکیبی در مقایسه با ST و HT تنها از یک جنبه بهتر عمل کرده‌اند. مثلاً LH و MH در مقایسه با HT به ترتیب شاخص‌های ENL و ESI را بهبود بخشیده‌اند.

LH($k=2$)	۱۵/۷۵	۰/۶۰	۰/۶۰
LS($k=2$)	۲۰/۳	۰/۳۰	۰/۳۰
MH($k=2$)	۱۵	۰/۷۷	۰/۷۸
MS($k=2$)	۱۸/۷۸	۰/۵۱	۰/۵۲
LS, MS ($k=0$)	۱۳/۷۸	۱	۱
LS($k=10$)	۲۲/۴۲	۰/۲۰۷	۰/۲۰۷
MS($k=10$)	۱۶/۷۶	۰/۶۲۲	۰/۶۲۰

جدول ۳. شاخص‌های کارایی PSNR، ESI^h و ESI^v برای فیلترهای

مختلف حذف لکه با نویز نسبتاً ضعیف ($E[A] \approx 0.31$ ، $\sigma = \sqrt{0.125}$)

Image Under Test	PSNR	ESI^h	ESI^v
Noisy Image	۲۳/۸	۱	۱
Lee Filter [4]	۲۸/۲	۰/۳۳	۰/۳۲
Hard Thresholding (HT)	۲۴/۵	۰/۸۶	۰/۸۶
Soft Thresholding (ST)	۲۷/۲	۰/۵۳	۰/۵۱
MAP	۲۶/۲	۰/۶۸	۰/۶۷
LMMSE	۲۵/۲	۰/۲۹	۰/۲۷
LH($k=2$)	۲۵/۷	۰/۶۲	۰/۶۱
LS($k=2$)	۲۸/۳	۰/۳۸	۰/۳۸
MH($k=2$)	۲۴/۹	۰/۸۰	۰/۸۰
MS($k=2$)	۲۷/۵	۰/۵۶	۰/۵۵
LS, MS ($k=0$)	۲۳/۸	۱	۱
LS($k=10$)	۲۵/۱۷	۰/۲۸۷	۰/۲۷۱
MS($k=10$)	۲۶/۱۴	۰/۶۷۸	۰/۶۶۹

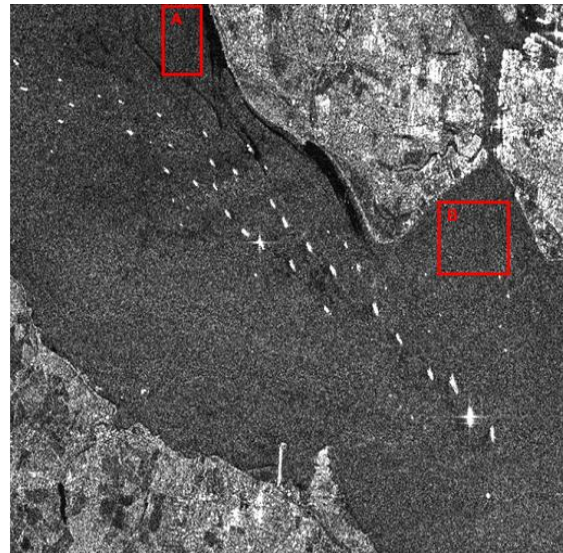
نتایج زیر از جدول ۲ قابل استنتاج هستند: (۱) در مقایسه روش‌های ترکیبی با روش‌های ST و HT می‌توان دید که روش MS در هر دو جنبه حذف نویز ($PSNR$ بالاتر) و حفظ اطلاعات لبه‌ها (ESI بزرگ‌تر) از روش ST بهتر عمل کرده است. این در حالی است که هیچ‌کدام از روش‌های LMMSE و MAP در هر دو جنبه بهتر از ST عمل نمی‌کنند؛ (۲) روش LS در مقایسه با ST تنها $PSNR$ را بهبود بخشیده است و ESI را کاهش داده است؛ (۳) روش‌های LH و MH در مقایسه با HT تنها $PSNR$ را بهبود بخشیده‌اند و ESI را کاهش داده‌اند؛ (۴) روش MH در مقایسه با MAP تنها ESI را بهبود بخشیده است و $PSNR$ را کاهش داده است؛ (۵) روش MS در مقایسه با MAP تنها $PSNR$ را بهبود بخشیده است و ESI را کاهش داده است؛ (۶) روش‌های LH و LS در مقایسه با LMMSE تنها ESI را بهبود می‌دهند و $PSNR$ کمتری را فراهم می‌آورند؛ (۷) به‌علاوه، در مقایسه روش‌های MAP و LMMSE به‌کار گرفته شده می‌توان مشاهده کرد که روش LMMSE مقدار $PSNR$ بالاتری را ایجاد می‌کند اما روش MAP لبه‌ها را بهتر حفظ می‌کند (ESI بالاتر). همچنین از جدول ۳ استنتاج‌های مشابهی قابل استخراج هستند. عمده تفاوت‌ها به‌صورت زیر قابل بیان

LMMSE/MAP بهره می‌برد. ایده اصلی به کار رفته در این روش تفکیک ضرایب NSCT تصویر از مولفه‌های نویز در محدوده زیر آستانه و حفظ آن‌ها جهت بهبود کیفیت تصویر بازسازی شده است. به علاوه، با ارائه توابع ساده در فرم بسته برای تخمین‌زن‌های بی‌زین از افزایش چشم‌گیر پیچیدگی محاسباتی و پیاده‌سازی الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های آستانه‌گذاری معمول، جلوگیری به عمل آمده است.

نتایج آزمایش‌های ارائه شده نشان می‌دهد که: (۱) فیلترهای مبتنی بر تخمین‌زن LMMSE به طور مشخص توانایی بهتری برای حذف نویز نشان می‌دهند (مقادیر شاخص PSNR و ENL بالاتری ایجاد می‌کنند)؛ (۲) فیلترهای مبتنی بر تخمین‌زن MAP از توانایی بالاتری برای حفظ جزئیات تصویر مانند لبه‌ها برخوردار هستند (مقدار شاخص ESI بالاتری فراهم می‌آورند)؛ (۳) یک مصالحه بین کیفیت حذف نویز و حفظ جزئیات تصویر (مانند لبه‌ها و بافت تصویر) در روش‌های مختلف حذف لکه وجود دارد که براساس روش ارائه شده به طور دقیقی قابل توصیف است. در واقع انتخاب فیلتر مناسب برای حذف لکه باید براساس انتخاب نقطه مناسب مصالحه مورد اشاره صورت گیرد. به عنوان کار آتی پیشنهاد می‌شود با تعریف یک تابع مطلوبیت چندهدفی و سپس با حداکثر کردن این تابع هدف، مقدار مناسب آستانه به دست آید. به علاوه، از تخمین‌زن‌های با دقت بالاتر مانند آنچه در [۱۸] و [۲۲] ارائه شده است، می‌توان برای جایگزینی توابع ساده به کار رفته در این تحقیق (روابط (۲۱-۲۰)) بهره برد.

مراجع

- [1] C. Oliver, and S. Quegan, *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, SciTech Publishing, Raleigh, NC USA, 2004.
- [۲] رحیم انتظاری و علی جبار رشیدی، «استخراج تصویر از اهداف حرکت غیریکنواخت در رادار دهانه ترکیبی معکوس»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۴۰۰-۳۹۱، تابستان ۱۳۹۶.
- [3] F. Argenti, A. Lapini, T. Bianchi, 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, Sep. 2013.
- [4] J. S. Lee, L. Jurkevich, P. Dewaele, P. Wambacq, and A. Oosterlinck, "Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review," *Remote Sensing Reviews*, vol. 8, no. 4, pp. 313-340, 1994.
- [5] D. T. Kuan, A. A. Sawchuk, T. C. Strand and P. Chavel, "Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependent noise," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 7, no. 2, pp. 165-177, March 1985.
- [6] M. Iqbal, J. Chen, W. Yang, P. Wang and B. Sun, "SAR image despeckling by selective 3D filtering of multiple compressive reconstruction images," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 134, pp. 209-226, 2013.
- [7] M. I. H. Bhuiyan, M. O. Ahmad, and M. N. S. Wamy, "Spatially adaptive wavelet-based method using the Cauchy prior for denoising the SAR images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 500-507, April 2007.



شکل ۷: تصویر واقعی SAR که در آن شناورهای موجود در سطح آب تنگه قابل رؤیت هستند. نواحی A و B برای محاسبه شاخص ENL مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

لازم به ذکر است که در حالت کلی انتخاب آستانه می‌تواند با به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی چندهدفی به این صورت انجام گیرد. به عبارت دیگر ابتدا با وزن‌دهی مناسب به شاخص‌های ENL و ESI، یک تابع مطلوبیت چندهدفی تعریف شود و سپس با حداکثر کردن این تابع هدف مقدار مناسب آستانه (k) به دست آید. هرچند این موضوع خارج از ظرفیت مقاله حاضر است و بنابراین در محاسبات جدول ۴ مقادیر مناسب برای آستانه طوری انتخاب شده‌اند که تنها بیشترین مقادیر شاخص ENL را ایجاد کنند.

جدول ۴: مقادیر ENL و ESI بعد از اعمال فیلتر روی تصویر شکل ۷.

Performance Metric →	ENL		Edge Save Index	
	A	B	ESI^h	ESI^v
Image Under Test↓				
Noisy Image	۸/۸	۱۲	۱	۱
Lee Filter [4]	۳۰/۳	۶۱/۱	۰/۳۴	۰/۳۲
Hard Thresholding (HT)	۳۸/۲	۵۲/۷	۰/۵۴	۰/۵۷
Soft Thresholding (ST)	۴۶/۲	۱۰۴	۰/۲۶	۰/۲۷
MAP	۱۷/۵	۲۵/۲	۰/۶۷	۰/۶۷
LMMSE	۴۳/۹	۹۴/۷	۰/۲۳	۰/۲۴
LH($k=2$)	۴۴/۱	۹۸	۰/۳	۰/۳۱
LS($k=1$)	۴۴/۲	۹۷	۰/۲۹	۰/۳
MH($k=2$)	۱۷/۵۲	۲۵/۳	۰/۶۹	۰/۶۹۵
MS($k=0.7$)	۲۱/۱	۳۳/۴۵	۰/۵۱	۰/۵۱

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای ادامه کار

در این مقاله یک روش آستانه‌گذاری بهبودیافته برای کاهش نویز لکه از تصاویر SAR در حوزه تبدیل NSCT ارائه گردید که در محدوده ورودی زیر آستانه از نگاهی مبتنی بر تخمین‌زن‌های بی‌زین

- IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 10, pp.3089-3101, Oct. 2006.
- [17] D. X. Zhang, Q. W. Gao and X. P. Wu, "Bayesian-based speckle suppression for SAR image using contourlet transform," Journal of electronic science and technology of china, vol. 6, no. 1, pp. 79-82, March 2008.
- [18] F. Argenti, T. Bianchi, G. M. Di Scarfizzi, and L. Alparone, "LMMSE and MAP estimators for reduction of multiplicative noise in the nonsubsampling contourlet domain," Elsevier Signal Process., vol. 89, no. 10, pp. 1891-1901, Oct. 2009.
- [19] J. J. J. Babu, and G. F. Sudha, "Non-subsampled contourlet transform based image denoising in ultrasound thyroid images using adaptive binary morphological operations," IET Computer Vision, vol. 8, no. 6, pp. 718-728, Dec. 2014.
- [20] A. Rajshree, D. Venkataprasad, T. Joel and R. Sivakumar, "Comparative performance analysis of speckle reduction using curvelet and contourlet transform for medical images", Middle-East Journal of Scientific Research, vol. 24, pp. 88-95, 2016.
- [21] D. D.-Y. Po and M. N. Do, "Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform," IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 6, pp. 1610-1620, June 2006.
- [22] F. Argenti, T. Bianchi, and L. Alparone, "Multiresolution MAP despeckling of SAR images based on locally adaptive generalized Gaussian pdf modeling," IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 11, pp. 3385-3399, Nov. 2006.
- [23] S. G. Dellepiane and E. Angiati, "Quality assessment of despeckled SAR images," IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens., vol. 7, no. 2, pp. 691-707, Sept. 2014.
- [24] R. Touzi, "A review of speckle filtering in the context of estimation theory," IEEE Trans. Geo. And Remote Sensing, vol. 40, no. 11, pp. 2392-2404, Nov. 2002.
- [8] T. Bianchi, F. Argenti and L. Alparone, "Segmentation based MAP despeckling of SAR images in the undecimated wavelet domain," IEEE Trans. Geo. And Remote Sensing, vol. 46, no. 9, pp. 2728-2742, Sep. 2008.
- [9] F. Argenti, T. Bianchi, A. Lapini, and L. Alparone, "Fast MAP despeckling based on Laplacian-Gaussian modeling of wavelet coefficients," IEEE Geosci. Remote Sensing Lett., vol. 9, no. 1, pp. 13-17, Jan. 2012.
- [10] H. Chen, Y. Zhang, H. Wang, and C. Ding, "Stationary-wavelet based despeckling of SAR images using two-sided generalized gamma models," IEEE Geosci. Remote Sensing Lett., vol. 9, no. 6, pp. 1061-1065, Nov. 2012.
- [11] H. Rabbani, M. Vafadust, P. Abolmaesumi, and S. Gazor, "Speckle noise reduction of medical ultrasound images in complex wavelet domain using mixture priors," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 55, no. 9, pp. 2152-2160, Sept. 2008.
- [12] S. G. Chang, B. Yu, and M. Vetterli, "Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression," IEEE Trans. Image Process., vol. 9, no. 9, pp. 1532-1546, Sept. 2000.
- [13] J. L. Starck, E. Candes, and D. Donoho, "The curvelet transform for image denoising," IEEE Trans. Image Process., vol. 11, no. 6, pp. 670-684, June 2002.
- [۱۴] منیره کوشش و غلامرضا اکبری‌زاده، «الگوریتم حذف Speckle با قابلیت حفظ لبه برای تصاویر سنجش از دور رادار روزنه ترکیبی با استفاده از تبدیل چند مقیاسه Curvelet و آستانه‌گذاری وقتی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحه ۱۶۱-۱۵۳، زمستان ۱۳۹۴.
- [15] M. Do and M. Vetterli, "The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation," IEEE Trans. Image Processing, vol.14, no.12, pp. 2091-2106, Dec. 2005.
- [16] A. L. Da Cunha, J. Zhou, M. N. Do, "The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and application,"

زیرنویس‌ها

- ¹ Compressive sensing
- ² Wavelet Transform
- ³ Curvelet Transform
- ⁴ Contourlet
- ⁵ Threshold
- ⁶ Non-subsampled contourlet transform (NSCT)
- ⁷ Complex refectionivity
- ⁸ Shift invariant
- ⁹ Generalized Gaussian distribution (GGD)
- ¹⁰ Shrinkage
- ¹¹ Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)
- ¹² Mean square error (MSE)
- ¹³ Equivalent number of looks (ENL)
- ¹⁴ Mean preservation index (MPI)
- ¹⁵ Edge save index (ESI)