

کاهش اسپکل در تصاویر راداری با دریچه‌ی گشایش مصنوعی در حوزه‌ی موجک با بکارگیری وابستگی‌های درون‌مقیاسی و بین‌مقیاسی

رامین فرهادیانی^{۱*}، عبدالرضا صفری^۲، سعید همایونی^۳

^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

r.farhadiani@ut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

asafari@ut.ac.ir

^۳ استادیار گروه جغرافیا - محیط زیست و ژئوماتیک - دانشگاه آتوا - کانادا

saeid.homayouni@uOttawa.ca

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۶، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۷)

چکیده

تصاویر راداری با دریچه‌ی گشایش مصنوعی (SAR) به طور ذاتی متاثر از پدیده‌ای نویز مانند به نام اسپکل هستند که ماهیت تمامی سیستم‌های همدوس است. حضور اسپکل در تصویر SAR سبب کاهش عملکرد کاربردهایی نظیر طبقه‌بندی، قطعه‌بندی، تشخیص تغییرات و مانند آنها می‌شود، در نتیجه لازم است تا اثر آن کاهش یابد. به طور کلی، دو روش عمده برای کاهش اسپکل در تصاویر SAR وجود دارد، روش چندمنظرسازی در زمان تشکیل تصویر و روش‌های مبتنی بر فیلترهای مکانی پس از تشکیل تصویر و در مرحله پیش پردازش. چندمنظرسازی تصویر سبب کاهش قدرت تفکیک مکانی آن می‌شود، همچنین عملکرد فیلترهای مکانی وابسته به اندازه و جهت پنجره‌ی مورد استفاده در آنها است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، می‌توان از روش‌های مبتنی بر آنالیز چند تجزیه‌ای مانند تبدیل موجک استفاده نمود. در این مقاله، با در نظر گرفتن وابستگی درون‌مقیاسی و بین‌مقیاسی ضرایب موجک و با به کارگیری برآوردگر Maximum a Posteriori (MAP)، روشی برای کاهش نویز ضرایب موجک ارائه شده است. توزیع نویز در حوزه‌ی موجک و ضرایب بدون نویز موجک به ترتیب، توابع چگالی احتمال گوسین دوتایی و توزیع لاپلاس متقارن مدور دوتایی در نظر گرفته شدند. روش پیشنهادی، با فیلترهای مکانی Frost و Lee و همچنین روش‌های حدآستانه‌گذاری VisuShrink، SureShrink و BayesShrink مقایسه شد. برای ارزیابی کمی این روش‌ها از شاخص PSNR و شاخص حفظ لبه‌ی β برای داده‌ی شبیه‌سازی شده و از شاخص ENL برای داده‌ی واقعی استفاده شد. با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های PSNR و β در تصاویر شبیه‌سازی شده، روش پیشنهادی در کاهش اسپکل و حفظ لبه‌های تصویر نسبت به فیلترهای مکانی و روش‌های حدآستانه‌گذاری در حوزه‌ی موجک دارای برتری نسبی بود. همچنین بر اساس شاخص ENL در تصاویر واقعی، می‌توان گفت که روش پیشنهادی برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر روش‌ها در کاهش اسپکل از مناطق همگن از خود نشان داد.

واژگان کلیدی: رادار با دریچه‌ی گشایش مصنوعی، اسپکل، تبدیل موجک، برآوردگر MAP

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

تصاویر راداری با درپچه‌ی گشایش مصنوعی^۱، اطلاعات مفیدی برای کاربردهای متنوع مانند پایش آلودگی‌های نفتی، نظارت بر سطح زمین، مدیریت منابع زمینی، یافتن معادن و مانند آنها فراهم می‌کنند. این سیستم‌ها، توانایی تولید و ارسال امواج الکترومغناطیس در محدوده‌ی میکروویو را دارند، در نتیجه قابلیت تصویربرداری در شب و شرایط آب و هوایی نامساعد را دارا هستند، همچنین به دلیل استفاده از امواج میکروویو در این سیستم‌ها، حضور ابر در منطقه‌ی تصویربرداری مانعی ایجاد نمی‌کند.

در کنار ویژگی‌ها و مزایای ذکر شده برای سیستم‌های تصویربرداری SAR، این سیستم‌ها متأثر از پدیده‌ای نوین مانند به نام اسپکل^۲ هستند که ماهیت تمامی سیستم‌های همدوس^۳ است. حضور پدیده‌ی اسپکل در تصاویر SAR، سبب کاهش عملکرد کاربردهایی نظیر طبقه‌بندی^۴، خوشه‌بندی^۵، قطعه‌بندی^۶ و مانند آنها خواهد شد. در نتیجه لازم است تا اثر این پدیده در تصاویر SAR کاهش یابد. به طور کلی، دو روش برای کاهش اسپکل در تصاویر SAR وجود دارد، چندمنظرسازی^۷ و فیلترهای مکانی [۱].

در فرآیند چندمنظرسازی که در زمان تشکیل تصویر صورت می‌پذیرد، با تقسیم طول آنتن مجازی به چندین بخش کوچکتر، از یک منطقه‌ی مشخص، چندین تصویر مستقل گرفته خواهد شد و جمع غیر همدوس^۸ این تصاویر، تصویری حاصل خواهد کرد که به بهای کاهش قدرت تفکیک مکانی، اثر پدیده‌ی اسپکل نیز در آن کاهش می‌یابد. روش دوم برای کاهش اسپکل، استفاده از فیلترهای مکانی تطبیقی^۹ است. تاکنون فیلترهای مکانی متعددی مانند فیلتر Lee [۱]، Kuan [۲]، Frost [۳]، Gamma MAP [۴]-[۶] و بسیاری دیگر ارائه شده‌اند. همچنین روش‌های کاهش اسپکل دیگر بر اساس خوشه‌بندی تصویر [۷] و فیلتر تطبیقی برای کاهش اسپکل با پنجره تغییرپذیر از لحاظ بعد بر پایه انحراف معیار

نسبی [۸] نیز ارائه شده‌اند. معمولاً فیلترهای مکانی، عملکرد مناسبی در کاهش اسپکل از مناطق همگن از خود نشان داده‌اند، اما بیشتر آنها در حفظ جزئیات تصویر مانند لبه‌ها ناتوان هستند. همچنین عملکرد این فیلترها وابسته به اندازه و جهت پنجره‌ی مورد استفاده در آنها است. برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده برای فیلترهای مکانی، می‌توان از روش‌های مبتنی بر آنالیز چند تجزیه‌ای^{۱۰} استفاده نمود. از اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، تبدیل موجک^{۱۱} به عنوان یک ابزار قدرتمند برای پردازش و تحلیل سیگنال‌های ناپایستا^{۱۲} مورد استفاده قرار گرفت. در تصاویر سنجش از دور، تبدیل موجک نقش مهمی در تحلیل‌های متفاوت مانند تحلیل بافت، فشرده‌سازی تصویر و ادغام دو تصویر با نوع داده‌ی متفاوت بازی می‌کند [۹]، همچنین از این تبدیل به طور وسیعی برای کاهش نویز از تصاویر استفاده شده است. در این مقاله، فرآیند کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک انجام خواهد پذیرفت. به طور کلی، کاهش نویز در حوزه‌ی موجک شامل سه مرحله‌ی زیر است:

۱. اعمال تبدیل موجک
 ۲. دستکاری ضرایب موجک بر اساس یک قانون
 ۳. اعمال تبدیل موجک معکوس
- لازم به ذکر است که روش‌های کاهش نویز در حوزه‌ی موجک برای نویز جمع‌شونده^{۱۳} توسعه یافته‌اند، این در حالی است که اسپکل در تصاویر SAR، دارای ماهیتی ضرب‌شونده^{۱۴} است [۱۰]. بر همین اساس، لازم است تا اسپکل ضرب‌شونده در این تصاویر به نوعی به یک نویز جمع‌شونده تبدیل شود که در این مقاله، این کار بر اساس تبدیل لگاریتم صورت خواهد پذیرفت. یکی از ویژگی‌های مهم موجود در تبدیل موجک، وجود وابستگی‌های درون‌مقیاسی^{۱۵} و بین‌مقیاسی^{۱۶} بین ضرایب جزئیات آن است. لحاظ کردن این وابستگی‌ها می‌تواند سبب بهبود نتایج حاصل از کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک گردد، در نتیجه در این مقاله، یک روش کاهش اسپکل جدید با در نظر گرفتن وابستگی‌های درون‌مقیاسی و بین‌مقیاسی ضرایب

^۱ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۲ speckle

^۳ coherent

^۴ classification

^۵ clustering

^۶ segmentation

^۷ multilooking

^۸ incoherent summation

^۹ adaptive

^{۱۰} Multi Resolution Analysis (MRA)

^{۱۱} wavelet transform

^{۱۲} non-stationary

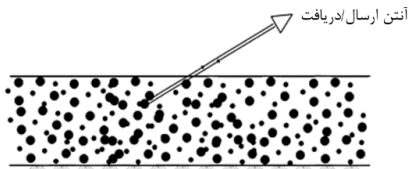
^{۱۳} additive noise

^{۱۴} multiplicative

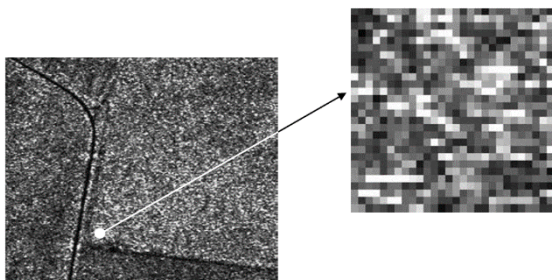
^{۱۵} Intra-scale

^{۱۶} Inter-scale

تصویری از یک منطقه‌ی همگن کشاورزی را نشان می‌دهد که متأثر از پدیده‌ی اسپکل است. حضور پدیده‌ی اسپکل در تصاویر SAR سبب کاهش قدرت تفکیک رادیومتریک آنها شده و عملکرد بسیاری از کاربردهای سنجش از دوری را کاهش می‌دهد، در نتیجه لازم است تا اثر این پدیده در تصویر SAR کاهش یابد.



شکل ۱- توزیع پراکنش‌گرهای درون یک پیکسل زمینی [۱۰]



شکل ۲- پدیده‌ی اسپکل در یک منطقه‌ی کشاورزی [۱۲]

۲-۱- مدل آماری اسپکل

همانطور که ذکر گردید، اسپکل در تصاویر SAR به صورت ضرب‌شونده مدل می‌شود [۱۰] که رابطه‌ی آن به صورت زیر است:

$$I(x, y) = S(x, y) \cdot \eta(x, y) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، $I(x, y)$ تصویر آلوده به اسپکل، $S(x, y)$ تصویر عاری از اسپکل و $\eta(x, y)$ اسپکل است. در ادامه، برای وضوح بیشتر مختصات پیکسلی (x, y) از رابطه‌ی (۱) حذف خواهد شد. برای تبدیل اسپکل ضرب‌شونده به یک نویز جمع‌شونده از تبدیل لگاریتم استفاده می‌شود. پس از اعمال تبدیل لگاریتم به دو طرف رابطه‌ی (۱)، داریم:

$$\bar{I} = \bar{S} + \bar{\eta} \quad (2)$$

در این رابطه، \bar{I} ، \bar{S} و $\bar{\eta}$ به ترتیب برابر با لگاریتم I ، S و η هستند. استفاده از تبدیل لگاریتم سبب تغییر مدل‌های آماری در نظر گرفته شده برای تصویر SAR خواهد شد.

جزئیات موجک بر اساس برآوردگر MAP^۱ ارائه خواهد شد. توزیع در نظر گرفته شده برای نویز در حوزه‌ی موجک و ضرایب بدون نویز موجک، به ترتیب توزیع گوسین دوتایی^۲ و توزیع لاپلاس متقارن مدور دوتایی^۳ هستند. همانطور که ذکر گردید، در روش ارائه شده، اسپکل ضرب‌شونده توسط اعمال تبدیل لگاریتم بر روی تصویر SAR به یک نویز جمع‌شونده تبدیل خواهد شد. استفاده از تبدیل لگاریتم سبب می‌شود تا میانگین اسپکل لگاریتم گرفته شده اریب^۴ باشد، در نتیجه برای تصحیح این میانگین اریب، میانگین اسپکل لگاریتم گرفته شده از تصویر خروجی حاصل از تبدیل موجک معکوس کسر خواهد گردید [۱۱].

۲- اسپکل در تصاویر SAR

پدیده‌ی اسپکل، به دلیل ماهیت همدوس سیستم‌های تصویربرداری SAR بوجود می‌آید. منظور از سیستم‌های همدوس، سیستم‌هایی است که علاوه بر اطلاعات دامنه، اطلاعات فاز موج بازگشتی را نیز ثبت می‌کنند. هر پیکسل از تصویر SAR شامل تعداد زیادی پراکنش‌گر^۵ است که به طور تصادفی در آن توزیع شده‌اند (شکل ۱). هر یک از این پراکنش‌گرها دامنه و فاز متفاوتی را در پاسخ به سیگنال ارسالی توسط سنجنده‌ی SAR تولید می‌کنند. سیستم پردازش‌کننده‌ی SAR، جمع همدوس تمام دامنه‌ها و فازهای بازگشتی را به عنوان دامنه و فاز نهایی پیکسل ثبت می‌کند. با توجه به تصادفی بودن مکان هر پراکنش‌گر، فاز ناشی از هر یک از آنها نیز متفاوت خواهد بود که سبب می‌شود تا برهم‌کنش^۶ درون پیکسل نیز تصادفی باشد. در صورتی که این برهم‌کنش سازنده^۷ باشد، منجر به تولید سیگنال با دامنه‌ی بزرگ خواهد شد و پیکسل در تصویر SAR به رنگ روشن دیده می‌شود. در مقابل، اگر برهم‌کنش ویرانگر^۸ باشد، پیکسل به رنگ تیره دیده خواهد شد. با در نظر گرفتن تمامی حالت‌های بین این دو حالت، یک ساختار نمک و فلفلی در تصویر SAR ایجاد می‌شود که به آن اسپکل گفته می‌شود. شکل (۲)،

^۱ Maximum A Posteriori (MAP) estimator

^۲ bivariate Gaussian

^۳ bivariate circular symmetric Laplace

^۴ biased

^۵ scatterer

^۶ interaction

^۷ instructive

^۸ distractive

$$E[p_{\sqrt{T}}(\bar{\eta})] = 0.5 * (\psi(L) - \ln(L)) \quad (9)$$

$$var[p_{\sqrt{T}}(\bar{\eta})] = 0.25 * \psi(1, L)$$

در روابط بالا، $\psi(L)$ نشان‌دهنده‌ی تابع دی‌گاما است. همچنین $\psi(1, L)$ نشان‌دهنده‌ی تابع پلی‌گامای درجه اول L است.

۳- تبدیل موجک

Morlet و Grossman در سال ۱۹۸۴ [۱۵]، رابطه‌ی تبدیل موجک پیوسته را ارائه کردند. تبدیل موجک انتگرالی تابع $x \in L^2(R)$ نسبت به موجک ψ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$W_x(u, s) = \langle x, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt = x * \bar{\psi}_s(u) \quad (10)$$

که در آن

$$\bar{\psi}_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) \quad (11)$$

در این رابطه، u و s به ترتیب پارامترهای انتقال^۶ و مقیاس^۷ نامیده می‌شوند و ψ^* نشان‌دهنده‌ی مزدوج مختلط^۸ تابع ψ است. با توجه به اینکه تبدیل موجک پیوسته، یک تبدیل افزونه است، لازم است تا از نسخه‌ی گسسته شده‌ی آن استفاده نمود. این کار توسط گسسته‌سازی پارامترهای مقیاس و انتقال روی یک شبکه‌ی گسسته‌ی زمان-مقیاس که منجر به مجموعه‌ای از توابع پایه‌ی پیوسته می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفته [۱۷] و اندیس‌گذاری این شبکه با z و n انجام می‌شود. به این ترتیب، گسسته‌سازی پارامترهای u و s به صورت زیر خواهد بود:

$$s = s_0^j \quad (12)$$

$$u = nu_0 s_0^j$$

با در نظر داشتن رابطه‌ی بالا، سری موجک سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه‌ی (۱۳) خواهد شد:

$$W_x(j, n) = \langle x, \psi_{j,n} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi^* \left(\frac{t - nu_0 s_0^j}{s_0^j} \right) dt \quad (13)$$

^۶ translation

^۷ scale

^۸ complex conjugate

در ادامه، توزیع‌های آماری تصاویر شدت^۱ و جذر شدت^۲ و لگاریتم آنها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

اسپکل در تصویر تک منظر شدت، دارای توزیع نمایی منفی^۳ است. همچنین در تصویر L منظر شدت دارای توزیع گاما با میانگین واحد و واریانس $1/L$ است و تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$p_I(\eta) = \frac{L^L \eta^{L-1} e^{-L\eta}}{\Gamma(L)}, \quad \eta \geq 0, \quad L \geq 1 \quad (3)$$

که در آن، $\Gamma(L)$ نشان‌دهنده‌ی تابع گاما است. با جذر گرفتن از تصویر شدت (که به عنوان تصویر دامنه نیز در نظر گرفته می‌شود)، تصویری حاصل خواهد شد که تصویر جذر شدت نامیده می‌شود. اسپکل در تصویر تک منظر جذر شدت دارای توزیع رایلی^۴ با میانگین $\sqrt{\pi}/2$ است، همچنین تصویر L منظر جذر شدت دارای توزیع ناگاکامی^۵ بوده و تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر خواهد بود [۱۴]:

$$p_{\sqrt{T}}(\eta) = \frac{2L^L \eta^{2L-1} e^{-L\eta^2}}{\Gamma(L)}, \quad \eta \geq 0 \quad (4)$$

که میانگین و واریانس متناظر با آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$E[p_{\sqrt{T}}(\eta)] = \frac{\Gamma(L + 1/2)}{L^{1/2} \Gamma(L)} \quad (5)$$

$$var[p_{\sqrt{T}}(\eta)] = 1 - E^2(p_{\sqrt{T}}(\eta))$$

در صورتی که از تصویر L منظر شدت و یا جذر شدت لگاریتم گرفته شود، توزیع‌های روابط (۳) و (۴) به ترتیب به صورت روابط (۶) و (۷) تغییر خواهند کرد:

$$p_I(\bar{\eta}) = \frac{L^L e^{\bar{\eta}L} e^{-Le^{\bar{\eta}}}}{\Gamma(L)} \quad (6)$$

$$p_{\sqrt{T}}(\bar{\eta}) = \frac{2L^L e^{2\bar{\eta}L} e^{-Le^{2\bar{\eta}}}}{\Gamma(L)} \quad (7)$$

که میانگین و واریانس متناظر با آنها به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$E[p_I(\bar{\eta})] = \psi(L) - \ln(L) \quad (8)$$

$$var[p_I(\bar{\eta})] = \psi(1, L)$$

^۱ intensity

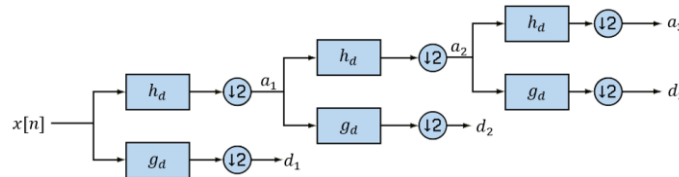
^۲ square-root of intensity

^۳ negative exponential distribution

^۴ Rayleigh

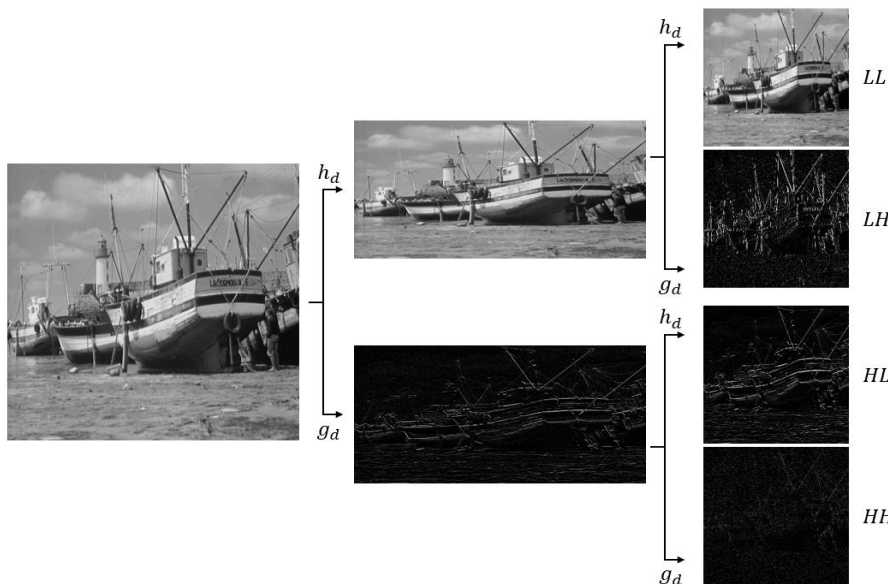
^۵ Nagakami

مشکل، Mallat نخستین کسی بود که ایده‌ی پیاده‌سازی تبدیل موجک توسط بانک فیلتر را ابداع و ارائه نمود. در این روش، ضرایب تقریب و جزئیات موجک را می‌توان توسط فیلتر کردن سیگنال با فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر و در ادامه انجام نمونه‌برداری پایین با فاکتور ۲ محاسبه نمود. شکل (۳)، سه مرحله از تجزیه‌ی سیگنال $x[n]$ را نشان می‌دهد. در این شکل، h_d و g_d به ترتیب نشان‌دهنده‌ی فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر هستند، همچنین a_j و d_j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ضرایب تقریب و جزئیات موجک در مقیاس j هستند.



شکل ۳- تبدیل موجک یک بعدی تا سه مرحله از تجزیه

$m/2$ سطر و n ستون خواهیم داشت. در ادامه، پس از اعمال دوباره‌ی فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر بر روی سطرها و دو زیربند بدست آمده و انجام نمونه‌برداری پایین، چهار زیربند با ابعاد $m/2$ سطر و $n/2$ ستون بدست خواهند آمد. شکل (۴)، نحوه‌ی اعمال تبدیل موجک دو بعدی بر روی تصویر را نشان می‌دهد که در آن LL ضریب تقریب نام‌گذاری می‌شود و شامل اطلاعات فرکانس پایین تصویر است، همچنین LH ضریب موجک عمودی، HL ضریب موجک افقی و HH ضریب موجک قطری نامیده می‌شود و شامل اطلاعات فرکانس بالای سیگنال می‌شوند.



شکل ۴- اعمال تبدیل موجک دو بعدی بر روی تصویر و بدست آوردن زیربندهای تقریب و جزئیات

در صورتی که مقادیر s_0 و u_0 به ترتیب برابر با ۲ و ۱ انتخاب گردند، تبدیل موجک گسسته‌ی سیگنال $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DWT_x(2^j, u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-u}{2^j}\right) dt \quad (14)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۴) می‌توان دریافت که نسخه‌ی گسسته شده‌ی تبدیل موجک، یک سری موجک است که از تبدیل موجک پیوسته نمونه‌برداری کرده است، در نتیجه اطلاعات موجود در آن زائد و اضافی هستند. برای رفع این

با توجه به اینکه تصویر یک سیگنال دو بعدی است، لازم است تا تبدیل موجک برای سیگنال‌های دو بعدی نیز تعمیم یابد. لازم به ذکر است که هر سطر یا ستون از یک تصویر، متشکل از یک سیگنال یک بعدی است، در نتیجه می‌توان با اعمال تبدیل موجک یک بعدی به صورت مجزا بر روی سطرها و ستون‌های یک تصویر، آن را به حالت دو بعدی تعمیم داد. برای اعمال تبدیل موجک دو بعدی بر روی یک تصویر با ابعاد m سطر و n ستون، در ابتدا فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر یک بعدی بر روی ستون‌های تصویر اعمال خواهند شد و پس از آن، نمونه‌برداری پایین صورت خواهد پذیرفت. در این صورت، دو زیربند با ابعاد

$$T_{hard}(w) = \begin{cases} w, & \text{if } |w| > \lambda \\ 0, & \text{if } |w| \leq \lambda \end{cases} \quad (17)$$

در حدآستانه‌گذاری سخت، قدر مطلق ضرایب موجکی که از مقدار حدآستانه بزرگتر هستند حفظ و بقیه‌ی ضرایب به صفر تغییر خواهند کرد.

۴-۱-۲- روش حدآستانه‌گذاری SureShrink

حدآستانه‌گذاری Sure نیز توسط Donoho و Johnstone پیشنهاد شده است. مقدار حد آستانه برای هر زیر باند بر اساس کمینه‌سازی تخمین ریسک اشتاین^۲ به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

$$\lambda_{sure} = \arg \min \left[\sigma_n^2 - \frac{2\sigma_n^2}{n} \#\{k: |y| < T\} + \frac{1}{n} \sum (\min(|y|, T)^2) \right] \quad (18)$$

در رابطه‌ی بالا، n تعداد پیکسل‌های ضریب موجک مورد بررسی، σ_n انحراف معیار نویز، γ ضرایب جزئیات آلوده به نویز، T مقدار حد آستانه و $\#\{k: |y| < T\}$ نشان‌دهنده‌ی تعداد نمونه‌هایی است که مقدارشان کمتر از T می‌باشد. حدآستانه‌ی Sure، بر اساس تابع حدآستانه‌گذاری نرم^۳ به صورت رابطه‌ی (۱۹) اعمال می‌شود:

$$T_{soft}(w) = \begin{cases} \text{sign}(w)(|w| - \lambda)_+, & \text{if } |w| > \lambda \\ 0, & \text{if } |w| \leq \lambda \end{cases} \quad (19)$$

که در رابطه‌ی (۱۹)، $\text{sign}(x)$ همان تابع علامت x است و $(a)_+$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(a)_+ = \begin{cases} a, & \text{if } a \geq 0 \\ 0, & \text{if } a < 0 \end{cases} \quad (20)$$

۴-۱-۳- روش حدآستانه‌گذاری BayesShrink

Chang و همکارانش به منظور یافتن حدآستانه در هر زیر باند، از توزیع گوسین تعمیم یافته^۴ برای مدل کردن هر زیر باند در هر مرحله از تجزیه استفاده نمودند. مقدار حدآستانه در این روش مطابق با رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

$$T = \frac{\sigma_n^2}{\sigma} \quad (21)$$

۴- کاهش اسپیکل در حوزه‌ی موجک

با اعمال تبدیل موجک بر مدل ضرب‌شونده‌ی رابطه‌ی (۱) تا z مرحله خواهیم داشت:

$$y^j = w^j + n^j \quad (15)$$

در رابطه‌ی (۱۵)، γ ضرایب موجک آلوده به نویز، w ضرایب موجک عاری از نویز و n نویز در حوزه‌ی موجک است. همانطور که ذکر شد، با اعمال تبدیل موجک بر روی تصویر، چهار ضریب تولید خواهد شد. ضریب تقریب موجک، شامل اطلاعات فرکانس پایین تصویر است، در حالی که ضرایب جزئیات موجک (یا به اختصار ضرایب موجک)، شامل اطلاعات فرکانس بالای تصویر هستند. با توجه به اینکه نویز جزء اطلاعات فرکانس بالای یک سیگنال محسوب می‌شود، در فرآیند کاهش نویز، ضرایب تقریب دست نخورده باقی می‌مانند و تنها ضرایب جزئیات دستخوش تغییر خواهند شد. بر همین اساس، هدف یافتن تخمینی مناسب از ضرایب بدون نویز موجک است.

۴-۱-۱- مروری بر روش‌های کاهش نویز در حوزه‌ی موجک

در این زیربخش، سه روش حدآستانه‌گذاری ضرایب موجک با نام‌های VisuShrink، SureShrink و BayesShrink مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۱-۱-۱- روش حدآستانه‌گذاری VisuShrink

مقدار حدآستانه در این روش که توسط Donoho و Johnstone پیشنهاد شده است به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۸]:

$$\lambda_{visu} = \sigma_n \sqrt{2 \log M} \quad (16)$$

در رابطه‌ی بالا، σ_n انحراف معیار نویز و M تعداد پیکسل‌های تصویر است. با توجه به رابطه‌ی (۱۶)، می‌توان دریافت که مقدار حدآستانه در این روش وابسته به ابعاد تصویر خواهد بود و افزایش ابعاد تصویر سبب بیش از حد نرم شدن تصویر خواهد شد [۱۹]. برای اعمال این حدآستانه بر ضرایب موجک، از تابع حدآستانه‌گذاری سخت^۱ مطابق با رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

^۲ Stein's Unbiased Risk Estimate (Sure)

^۳ soft thresholding

^۴ Generalized Gaussian distribution

^۱ hard thresholding

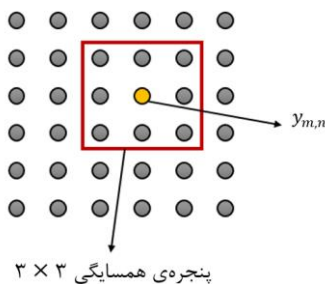
$$\widehat{w}_{m,n} = y_{m,n} \left(1 - \frac{thr^2}{A_{m,n}^2} \right) \quad (22)$$

که در آن، $\widehat{w}_{m,n}$ تخمینی از ضریب بدون نویز موجک است که بر اساس ضریب نویزی $y_{m,n}$ محاسبه می‌گردد، همچنین thr مقدار حد آستانه بوده که باید تعیین گردد. در رابطه‌ی (۲۲)، علامت + به این معناست که مقادیر مثبت پس از حد آستانه گذاری حفظ می‌شوند و مقادیر منفی برابر صفر قرار داده خواهند شد.

همانطور که پیشتر توضیح داده شد، حد آستانه گذاری به این روش، برای سیگنال‌های یک بعدی پیشنهاد شده است، این در حالی است که تصویر یک سیگنال دو بعدی بوده، در نتیجه، لازم است تا این روش برای سیگنال دو بعدی یا همان تصویر نیز تعمیم داده شود. تعمیم این روش برای حالت دو بعدی توسط Chen و Bui صورت پذیرفت [۲۳]. در ادامه، نحوه‌ی حد آستانه گذاری برای سیگنال‌های دو بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در صورتی که $y_{m,n}$ ضریب موجک آلوده به نویز حاصل از تبدیل موجک دو بعدی باشد، همسایگی در نظر گرفته شده برای آن، به صورت یک پنجره‌ی مربعی $B_{i,z}$ به مرکزیت $y_{m,n}$ و با ابعاد $N \times N$ خواهد بود. شکل (۶)، نمونه‌ای از پنجره‌ی همسایگی با ابعاد 3×3 برای ضریب موجکی که باید حد آستانه گذاری شود را نشان می‌دهد. در نتیجه برای حالت دو بعدی داریم:

$$A_{m,n}^2 = \sum y_{m,n}^2 / N^2 \quad (23)$$



شکل ۶- پنجره‌ی همسایگی روی ضریب موجکی که باید حد آستانه گذاری شود.

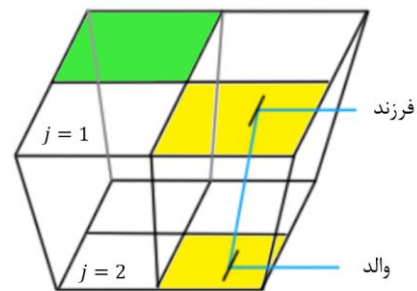
همانطور که ذکر شد، در رابطه‌ی (۲۲)، thr مقدار حد آستانه است که باید تعیین گردد. در ادامه، نحوه‌ی تعیین پارامتر حد آستانه thr توضیح داده خواهد شد.

برای در نظر گرفتن وابستگی‌های بین مقیاسی ضرایب موجک، می‌توان از روش پیشنهاد شده توسط Sendur و

که در رابطه‌ی بالا، σ_n انحراف معیار نویز و σ انحراف معیار توزیع است. برای اعمال این حد آستانه، از تابع حد آستانه گذاری نرم استفاده می‌شود.

۵- روش پیشنهادی

یکی از ویژگی‌های موجود در تبدیل موجک، وجود وابستگی بین ضرایب موجک است که به نام وابستگی‌های درون مقیاسی و بین مقیاسی شناخته می‌شوند. با در نظر گرفتن این وابستگی‌ها، می‌توان به طور موثرتری نویز را در ضرایب موجک کاهش داد. وابستگی ضرایب واقع شده در یک مقیاس مشخص و در یک زیر باند مشخص، وابستگی درون مقیاسی نامیده می‌شود. در حالی که، وابستگی بین دو زیر باند مشخص در دو مقیاس متوالی، وابستگی بین مقیاسی نام دارد (شکل ۵). در ادامه، نحوه‌ی بکارگیری این وابستگی‌های در روش ارائه شده برای کاهش نویز در حوزه‌ی موجک شرح داده خواهد شد.



شکل ۵- وابستگی درون مقیاسی (رنگ سبز) و بین مقیاسی (رنگ زرد) ضرایب موجک

ضرایب موجک در یک پنجره‌ی کوچک دارای وابستگی درون مقیاسی هستند. در صورتیکه یک ضریب موجک در نظر گرفته شود، به احتمال زیاد ضرایب اطراف آن نیز دارای مقادیری مشابه با آن خواهند بود. بر همین اساس، Cai و Silverman [۲۲]، حد آستانه گذاری ضرایب موجک با در نظر گرفتن همسایه‌ی آنها برای سیگنال یک بعدی را پیشنهاد دادند. در ادامه به تشریح این روش پرداخته خواهد شد.

اگر $y_{m,n}$ مجموعه‌ای از ضرایب موجک آلوده به نویز در یک سیگنال یک بعدی باشد، در صورتی که ضرایب نویزی موجک سیگنال یک بعدی باشد، رابطه‌ی حد آستانه گذاری به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$A_{m,n}^2 = y_{m,n-1}^2 + y_{m,n}^2 + y_{m,n+1}^2$$

در رابطه‌ی (۲۸)، $p_w(w)$ و $p_n(y-w)$ به ترتیب توابع چگالی احتمال^۲ مربوط به مولفه‌ی نویز در حوزه‌ی موجک و ضرایب بدون نویز موجک هستند که باید تعیین گردند. تابع چگالی احتمال مربوط به مولفه‌ی نویز، مطابق با توزیع رابطه‌ی (۲۵) است. همچنین تابع چگالی احتمال پیشنهادی برای ضرایب بدون نویز موجک به صورت رابطه‌ی (۲۹) تعریف می‌شود [۲۴]:

$$p_w(w) = \frac{3}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{\sigma} \sqrt{w_1^2 + w_2^2}\right) \quad (29)$$

تابع چگالی احتمال رابطه‌ی (۲۹) توزیع لاپلاس متقارن مدور دوتایی نامیده می‌شود که در آن σ انحراف معیار توزیع بوده و توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{1}{K} \sum y^2\right) - \hat{\sigma}_n^2} \quad (30)$$

که در آن، K برابر تعداد پیکسل‌های ضریب موجک مورد نظر است. با جایگذاری روابط (۲۵) و (۲۹) در رابطه‌ی (۲۸)، برآوردگر MAP برای تخمین ضرایب بدون نویز موجک به صورت رابطه‌ی (۳۱) خواهد شد:

$$\hat{w}_1(y) = \frac{(\sqrt{y_1^2 + y_2^2} - \sqrt{3}\sigma_n^2/\sigma)}{\sqrt{y_1^2 + y_2^2}} \cdot y_1 \quad (31)$$

این رابطه همچنین معادل با رابطه‌ی زیر است:

$$\hat{w}_1(y) = \left(1 - \frac{\sqrt{3}\sigma_n^2/\sigma}{\sqrt{y_1^2 + y_2^2}}\right) \cdot y_1 \quad (32)$$

برای اعمال تابع انقباض^۴ رابطه‌ی (۳۲)، لازم است تا میانگین مقادیر ضرایب والد و فرزند در پنجره‌ی همسایگی محاسبه شود. این کار به صورت زیر انجام می‌شود:

$$A_{m,n} = \frac{\sum((y_1)^2 + (y_2)^2)}{N^2} \quad (33)$$

در نهایت، تخمین ضرایب بدون نویز موجک بر اساس رابطه‌ی زیر انجام خواهد شد [۲۵]:

$$(\hat{w}_1)_{m,n} = (y_1)_{m,n} \left(1 - \frac{(\sqrt{3}\sigma_n^2/\sigma)^2}{A_{m,n}^2}\right)_+ \quad (34)$$

Selesnick [۲۴] استفاده نمود. این روش بر مبنای نظریه‌ی بی‌زین^۱ و در چارچوب برآوردگر MAP توسعه یافته است.

اگر w_2 نشان‌دهنده‌ی والد w_1 باشد (شکل ۵)، می‌توان نوشت:

$$y_1 = w_1 + n_1 \quad (24)$$

$$y_2 = w_2 + n_2$$

که در آن، y_1 و y_2 نشان‌دهنده‌ی ضرایب آلوده به نویز است. به همین ترتیب w_1 و w_2 نشان‌دهنده‌ی ضرایب بدون نویز موجک و n_1 و n_2 نیز نشان‌دهنده‌ی نویز جمع‌شونده در حوزه‌ی موجک است. در صورتی که نویز در حوزه‌ی موجک از توزیع گوسین دوتایی تبعیت کند، خواهیم داشت:

$$p_n(n) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{n_1^2 + n_2^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (25)$$

در رابطه‌ی (۲۵)، σ_n بیانگر انحراف معیار نویز است که با استفاده از یک برآوردگر میانه و به صورت رابطه‌ی زیر تخمین زده می‌شود [۱۸]:

$$\hat{\sigma}_n = C \cdot \frac{\text{median}(|y|)}{0.6745}, y \in HH_1 \quad (26)$$

در رابطه‌ی (۲۶)، C پارامتری به نام فاکتور نرم‌کنندگی^۲ است که میزان نرم‌شدگی تصویر با اسپیکل کاهش یافته را تحت تاثیر قرار داده و باید با توجه به محتوای تصویر انتخاب و تنظیم گردد. در صورتی که این پارامتر عدد بزرگی انتخاب گردد، سبب بیش از حد نرم شدن تصویر خواهد شد. در مقابل، در صورتی که عدد کوچکی انتخاب گردد، ممکن است کاهش اسپیکل بهینه اتفاق نیفتد. در ادامه، نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار حدآستانه بر اساس برآوردگر MAP شرح داده خواهد شد.

در صورتی که برآوردگر MAP برای رابطه‌ی (۲۴) در حوزه‌ی موجک نوشته شود، خواهیم داشت:

$$\hat{w}(y) = \arg \max_w [p_{y|w}(y|w)p_w(w)] \quad (27)$$

این رابطه، همچنین معادل با رابطه‌ی زیر است:

$$\hat{w}(y) = \arg \max_w [p_n(y-w)p_w(w)] \quad (28)$$

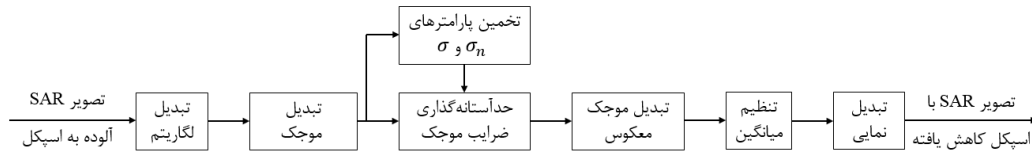
^۲ Probability Distribution Function (PDF)

^۴ shrinkage function

^۱ Bayesian theory

^۲ smoothing factor

اساس لازم است تا تصحیحی بر روی تصویر اعمال گردد. برای این کار، پس از اعمال تبدیل موجک معکوس، و قبل از اعمال تابع نمایی، میانگین اسپیکل لگاریتم گرفته شده از تصویر بدست آمده کسر خواهد گردد [۱۱].



شکل ۷- دیاگرام روش پیشنهادی برای کاهش اسپیکل در تصاویر SAR

شکل (۷)، دیاگرام مربوط به روش پیشنهادی برای کاهش اسپیکل از تصاویر SAR را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است استفاده از تبدیل لگاریتم سبب تغییر آمار در نظر گرفته شده برای تصویر SAR شده و سبب می‌شود تا میانگین اسپیکل لگاریتم گرفته شده، اریب باشد. بر همین

ذکر است که تصویر Noerdlinger در قطبش^۱ HH و تصویر San Francisco متناظر با سومین المان قطری ماتریس C3 معادل با قطبش VV است.

برای ارزیابی داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده از شاخص PSNR^۲ استفاده می‌نماییم که رابطه‌ی محاسبه‌ی آن به صورت زیر است:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255}{MSE} \quad (35)$$

که در آن، MSE مطابق رابطه‌ی (۳۶) محاسبه می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S - \hat{S})^2 \quad (36)$$

در این رابطه، m و n به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد پیکسل‌های تصویر در راستای سطرها و ستون‌ها هستند، همچنین S و \hat{S} نیز به ترتیب تصویر عاری از اسپیکل و تصویر با اسپیکل کاهش یافته هستند. مقادیر بالاتر شاخص PSNR نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر روش کاهش اسپیکل است. با توجه به اهمیت حفظ لبه‌های تصویر در فرآیند کاهش اسپیکل، از شاخص حفظ لبه‌ی β ارائه شده در [۲۸] استفاده می‌نماییم که رابطه‌ی محاسبه‌ی آن به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$\beta = \frac{\Gamma(S - \bar{S}, \hat{S} - \bar{\hat{S}})}{\sqrt{\Gamma(S - \bar{S}, S - \bar{S}) \Gamma(\hat{S} - \bar{\hat{S}}, \hat{S} - \bar{\hat{S}})}} \quad (37)$$

در رابطه‌ی بالا، S و \hat{S} به ترتیب تصاویر فیلتر شده با یک فیلتر بلاگذر (مانند فیلتر لاپلاس) حاصل از تصویر

۶- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش، به بررسی کمی و کیفی روش‌های ارائه شده در این مقاله پرداخته خواهد شد. برای مقایسه‌ی روش پیشنهاد شده، از فیلترهای مکانی Lee و Frost با کرنل 3×3 و همچنین روش‌های حدآستانه‌گذاری VisuShrink و SureShrink و BayesShrink استفاده خواهیم نمود. برای ارزیابی روش‌های کاهش اسپیکل ذکر شده، از داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده و داده‌ی SAR واقعی استفاده شده است. منظور از داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده، داده‌ای است که کاربر اسپیکل را بر روی آن ایجاد نموده است، در نتیجه با در دست داشتن داده‌ی عاری از اسپیکل و داده‌ی آلوده به اسپیکل، می‌توان روش‌های کاهش اسپیکل را مورد ارزیابی قرار داد. لازم به ذکر است که تولید داده‌ی شبیه‌سازی شده در این مقاله بر اساس مدل ضرب‌شونده‌ی رابطه‌ی (۱) و توزیع‌های ذکر شده در بخش ۲-۱ صورت پذیرفته است. به این صورت که در ابتدا تصویر اسپیکل با توجه به نوع تصویر SAR (شدت و یا جذر شدت) تولید شده و در تصویر عاری از اسپیکل ضرب خواهد شد. در این مقاله، از تصویر مبنای Boat که به طور وسیعی در مقاله‌های مرتبط با پردازش تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای شبیه‌سازی داده‌ی SAR استفاده شده است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر روش‌های کاهش اسپیکل، تصویر SAR شبیه‌سازی شده با تعداد منظرهای ۱، ۵، ۹ و ۱۶ در نظر گرفته شده است (شکل ۸، الف). همچنین از تصویر واقعی شدت منطقه‌ی Noerdlinger [۲۶] در باند X و تصویر واقعی دامنه منطقه‌ی San Francisco [۲۷] در باند L به ترتیب گرفته شده توسط ماهواره‌ی TerraSAR-X و سیستم راداری AIRSAR استفاده شده است (شکل ۸، ب و ج). لازم به

^۱ polarization

^۲ Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- (الف) داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده‌ی ۱۶ منظر حاصل از تصویر Boat (ب) Noerdlinger (ج) San Francisco

نتایج حاصل از کاهش اسپکل داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده بر اساس شاخص PSNR و β در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس شاخص PSNR، روش‌های کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک، عملکرد بهتری نسبت به فیلترهای مکانی Lee و Frost داشته‌اند و تنها در تصویر شبیه‌سازی شده‌ی ۱۶ منظر، عملکرد فیلتر Lee از روش VisuShrink بهتر است. روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های مکانی و حوزه‌ی موجک، در تمامی تصاویر شبیه‌سازی شده دارای بیشترین مقادیر PSNR است. با افزایش تعداد منظرهای تصویر، عملکرد روش SureShrink بسیار نزدیک به روش پیشنهادی است. مقادیر حاصل از شاخص حفظ لبه‌ی β نشان‌دهنده‌ی عملکرد برتر روش‌های کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک در حفظ لبه‌های تصویر نسبت به فیلترهای مکانی است. با توجه به مقادیر پایین‌تر پارامتر β در روش VisuShrink می‌توان دریافت که این روش، نسبت به روش‌های SureShrink

مبنا و تصویر با اسپکل کاهش یافته هستند. \bar{K} و \bar{G} نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر میانگین K و G هستند. همچنین Γ به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(a, b) = \sum_{i,j} X(i, j)\bar{X}(i, j) \quad (38)$$

این پارامتر در حالت بهینه نزدیک به یک خواهد بود. برای ارزیابی داده‌ی SAR واقعی، از شاخص ENL^۱ استفاده می‌شود که رابطه‌ی محاسبه‌ی آن به صورت زیر است [۱۱]:

$$ENL = A \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \quad (39)$$

که در این رابطه، A در تصویر شدت برابر با ۱ و در تصویر دامنه برابر با $1 - (4/\pi)$ است. همچنین در این رابطه μ و σ به ترتیب برابر میانگین و انحراف معیار محاسبه شده در یک منطقه‌ی همگن از تصویر با اسپکل کاهش یافته هستند. مقادیر بزرگتر این شاخص، نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر روش مورد استفاده در کاهش اسپکل در مناطق همگن از تصویر است. در محاسبه‌ی شاخص ENL برای داده‌ی SAR واقعی از دو منطقه‌ی همگن در تصاویر مورد نظر استفاده گردیده است.

لازم به ذکر است که در پیاده‌سازی روش‌های کاهش اسپکل، از موجک سیملت ۸ استفاده شده است و تصاویر تا پنج مرحله تجزیه شده‌اند، همچنین فاکتور نرم‌کنندگی در داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده برابر با ۱ و در داده‌ی واقعی مناطق Noerdlinger و San Francisco برابر با ۱٫۵ در نظر گرفته شده است. همچنین پنجره‌ی همسایگی در روش ارائه شده، دارای ابعاد 3×3 است. برای بهبود نتایج حاصل از کاهش اسپکل توسط تبدیل موجک، از الگوریتم چرخ گردان [۲۹] نیز استفاده گردیده است. مطابق این الگوریتم، در هر مرحله، سیگنال نویزی به اندازه‌ی M واحد شیفت دایره‌ای^۲ داده می‌شود، سپس عملیات کاهش نویز انجام شده و در انتها سیگنال تخمین زده شده مجدداً شیفت معکوس داده خواهد شد. در انتها از تمام سیگنال‌های با نویز کاهش یافته، متوسط گرفته خواهد شد.

^۱ Equivalent Number of Looks (ENL)

^۲ circular shift

اسپیکل در مناطق همگن از تصویر خواهد بود. اما لازم به ذکر است که مقادیر بالاتر شاخص ENL در روش VisuShrink صرفاً نشان‌دهنده عملکرد بهتر این روش در کاهش اسپیکل از مناطق همگن بوده و نشان‌دهنده حفظ جزئیات تصویر نخواهد بود. همانگونه که از شکل (۱۰) مشخص است، روش VisuShrink سبب بیش از حد نرم شدن تصویر و از بین رفتن برخی جزئیات آن مانند لبه‌ها در تصویر شده است، این در حالی است که روش‌های دیگر توانایی حفظ جزئیات تصویر را دارا هستند. همچنین با دقت در شکل (۱۱) می‌توان دریافت که روش VisuShrink سبب نرم شدن و از بین رفتن منطقه‌ی شهری در تصویر منطقه‌ی San Francisco شده است. پس از روش VisuShrink، روش پیشنهادی دارای بالاترین مقادیر ENL نسبت به فیلترهای مکانی Lee و Frost و روش‌های SureShrink و BayesShrink است.

BayesShrink و روش پیشنهادی سبب نرم شدن تصویر و در نتیجه‌ی آن، از بین رفتن برخی جزئیات تصویر شده است، این در حالی است که روش پیشنهادی در بیشتر موارد در حفظ لبه‌های تصویر نسبت به تمامی روش‌ها موفق‌تر عمل نموده است. شکل (۹)، تصاویر حاصل از کاهش اسپیکل در تصویر شبیه‌سازی شده‌ی ۱۶ منظر را نشان می‌دهد. جدول (۲)، نشان‌دهنده نتایج مقادیر حاصل از شاخص ENL برای مناطق San Francisco و Noerdlinger است. با توجه به مقادیر بدست آمده برای شاخص ENL در دو منطقه‌ی همگن از تصویر، می‌توان دریافت که روش‌های کاهش اسپیکل در حوزه‌ی موجک، نسبت به فیلترهای مکانی، عملکرد مناسب‌تری را از خود در کاهش اسپیکل از مناطق همگن نشان داده‌اند. همچنین با توجه به این جدول می‌توان دریافت که روش VisuShrink در هر دو تصویر واقعی دارای بالاترین مقادیر شاخص ENL است و این به معنای کاهش موثرتر

جدول ۱- مقادیر حاصل از شاخص PSNR و β

$L = 16$		$L = 9$		$L = 5$		$L = 1$		روش‌های کاهش اسپیکل
β	PSNR	β	PSNR	β	PSNR	β	PSNR	
۰.۶۰۱	۲۹.۰۳	۰.۵۰۵	۲۷.۴۵	۰.۳۹۶	۲۵.۶۳	۰.۱۶۸	۱۸.۹۹	Lee
۰.۴۴۹	۲۸.۱۵	۰.۴۰۹	۲۷.۰۸	۰.۳۶۴	۲۵.۵۵	۰.۲۲۸	۱۸.۹۱	Frost
۰.۶۵۹	۲۸.۸۰	۰.۶۰۵	۲۷.۶۶	۰.۵۴۰	۲۶.۳۷	۰.۳۲۶	۲۲.۸۴	VisuShrink
۰.۷۴۱	۳۰.۴۱	۰.۶۸۱	۲۹.۰۰	۰.۶۰۹	۲۷.۵۲	۰.۲۱۶	۲۲.۹۰	SureShrink
۰.۷۱۹	۲۹.۹۶	۰.۶۶۷	۲۸.۶۱	۰.۶۰۶	۲۷.۲۲	۰.۳۹۰	۲۳.۴۲	BayesShrink
۰.۷۳۴	۳۰.۴۲	۰.۶۸۶	۲۹.۰۷	۰.۶۲۸	۲۷.۶۷	۰.۴۵۷	۲۳.۴۷	روش پیشنهادی



(ج)



(ب)



(الف)



(و)



(د)



(د)

شکل ۹- (الف) Lee (ب) Frost (ج) VisuShrink (د) SureShrink (ه) BayesShrink (و) روش پیشنهادی

جدول ۲- مقادیر حاصل از شاخص ENL

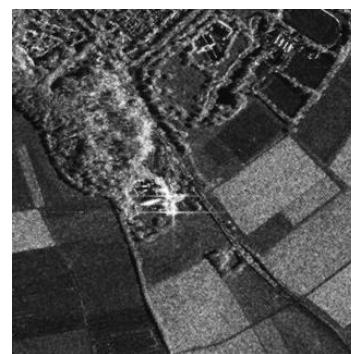
منطقه ۲	منطقه ۱	روش های کاهش اسپیکل	منطقه ۲	منطقه ۱	روش های کاهش اسپیکل
San Francisco (AIRSAR)			Noerdlinger (TerraSAR-X)		
۶,۵۱	۷,۵۵	Lee	۱۰,۴۸	۱۳,۱۰	Lee
۱۳,۸۷	۱۶,۶۹	Frost	۲۴,۸۷	۳۱,۷۴	Frost
۱۵۷,۳۹	۱۰۹,۶۴	VisuShrink	۱۲۳,۶۷	۱۴۳,۸۷	VisuShrink
۱۴,۵۴	۱۸,۳۶	SureShrink	۳۰,۸۹	۳۸,۸۳	SureShrink
۱۵,۱۶	۱۹,۳۱	BayesShrink	۲۶,۴۴	۳۳,۰۷	BayesShrink
۲۶,۷۶	۳۴,۵۷	روش پیشنهادی	۴۵,۵۰	۷۱,۱۲	روش پیشنهادی



(ج)



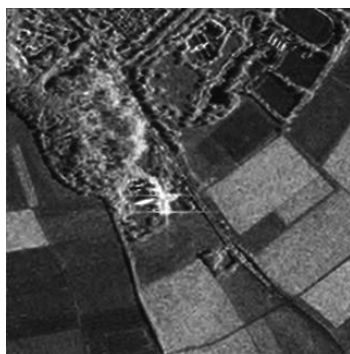
(ب)



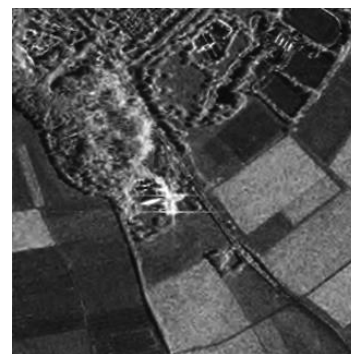
(الف)



(ز)

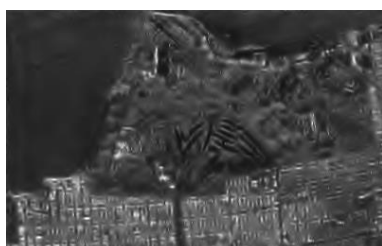


(ه)

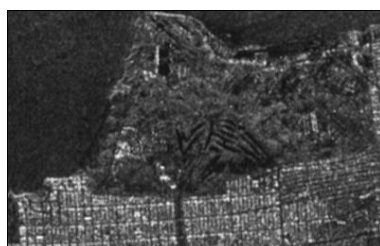


(د)

شکل ۱۰- الف) Lee (ب) Frost (ج) VisuShrink (د) SureShrink (ه) BayesShrink (و) روش پیشنهادی



(ج)



(ب)



(الف)



(ز)



(ه)



(د)

شکل ۱۱- الف) Lee (ب) Frost (ج) VisuShrink (د) SureShrink (ه) BayesShrink (و) روش پیشنهادی

۷- نتیجه گیری

به کار گرفته شد. نتایج تجربی حاصل از شاخص‌های ذکر شده نشان‌دهنده عملکرد برتر روش‌های کاهش اسپکل حوزه‌ی موجک نسبت به فیلترهای مکانی و عملکرد رضایت‌بخش روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها در کاهش اسپکل از تصاویر SAR بود. به عنوان نمونه، مقادیر حاصل از شاخص PSNR و β در تصویر شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۳۰,۴۲ و ۰,۷۳۴ بود. همچنین مقدار شاخص ENL محاسبه شده در دو ناحیه برای منطقه‌ی Noerdlinger برابر با ۷۱,۱۲ و ۴۵,۵۰ بود. مقدار این شاخص برای منطقه‌ی San Francisco برابر با ۳۴,۵۷ و ۲۶,۷۶ بود. با توجه به اینکه تبدیل موجک، تصویر مورد نظر را تنها در سه جهت افقی، عمودی و قطری تجزیه می‌کند، می‌توان جهت بهبود نتایج حاصل از کاهش اسپکل از تبدیل Curvelet به جای تبدیل موجک استفاده نمود. همچنین می‌توان از توزیع‌های دیگری همچون توزیع لاپلاس برای مدل کردن ضرایب بدون نویز موجک استفاده نمود.

در این مقاله، روشی برای کاهش اسپکل از تصاویر SAR در حوزه‌ی موجک ارائه شد. در ابتدا برای تبدیل اسپکل ضرب‌شونده به یک نویز جمع‌شونده، از تصویر SAR لگاریتم گرفته شد. در ادامه پس از محاسبه‌ی انحراف معیار نویز و انحراف معیار توزیع در نظر گرفته شده برای ضرایب جزئیات موجک، حد‌آستانه‌گذاری این ضرایب صورت پذیرفت. سپس با اعمال تبدیل موجک معکوس و تنظیم میانگین و در نهایت اعمال تبدیل نمایی، تصویر SAR با اسپکل کاهش یافته حاصل شد. برای مقایسه و ارزیابی عملکرد روش ارائه شده از فیلترهای مکانی Lee و Frost به همراه روش‌های حد‌آستانه‌گذاری VisuShrink، SureShrink و BayesShrink استفاده شد. همچنین دو نوع داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده و واقعی جهت ارزیابی به کار گرفته شدند. برای ارزیابی داده‌ی شبیه‌سازی شده از شاخص‌های PSNR و شاخص حفظ لبه‌ی β استفاده شد. همچنین شاخص ENL برای ارزیابی عملکرد روش‌های کاهش اسپکل در کاهش اسپکل از مناطق همگن

مراجع

- [1] Lee, Jong-Sen. (1986). "Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images." *Optical Engineering*. vol. 25, no. 5, pp. 636-645.
- [2] Kuan, D. T., Sawchuk, A. A., Strand, T. C. and Chavel. P. (1985). "Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-7, no. 2, pp. 165-177.
- [3] Frost, V. S., Stiles, J. A., Shanmugan, K. S. and Holtzman, J. C. (1982). "A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 2, pp. 157-166.
- [4] Baraldi. A and Parmiggiani. F. (1995) "A refined Gamma MAP SAR speckle filter with improved geometrical adaptivity" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 5, pp. 1245-1257.
- [5] Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., and Laur, H. (1990) "Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images." *10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 2409-2412
- [6] Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., and Laur, H. (1993) "Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images." *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 9, pp. 1735-1758.
- [7] Janalipour, M., Mohammadzadeh, A., and Maghsoudi, Y. (2015) "Proposing A New Method for Reduction of Speckle Phenomenon By Using Clustering in Single Channel Radar Image." *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 139-150.
- [8] Mousavi, M., Amini, J., and Maghsudi, Y. (2015) "Proposal Speckle Reduction Algorithm for Sar Images." *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 189-202.
- [9] Ishida, T., Itagaki, S., Sasaki, Y., and Ando. H. (2004) "Application of wavelet transform for extracting edges of paddy fields from remotely sensed images." *International Journal of Remote Sensing*. vol. 25, no. 2, pp. 347-357.
- [10] Oliver, C., and Quegan. A. (1998) "Understanding Synthetic Aperture Radar Images."
- [11] Xie, H., Pierce, L. E., and Ulaby, F. T. (2002) "SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. vol. 40, no. 10, pp. 2196-2212.

- [12] Richards, J. A. (2009). "Remote sensing with imaging radar."
- [13] Xie, H., Pierce, L. E., and Ulaby, F. T. (2002) "Statistical properties of logarithmically transformed speckle." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. vol. 40, no. 3, pp. 721–727.
- [14] Bianchi, T., Argenti, F., Lapini, A., and Alparone, L. (2013) "Amplitude vs intensity Bayesian despeckling in the wavelet domain for SAR images." *Digital Signal Processing*. vol. 23, no. 5, pp. 1353–1362.
- [15] Grossmann, A., and Morlet, J. (1984) "Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape." *SIAM journal on mathematical analysis*, vol. 15, no. 4, pp. 723–736.
- [16] Daubechies, I. (1992) "Ten lectures on wavelets." *SIAM*. vol. 61.
- [17] Daubechies, I. (1990) "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis," *IEEE transactions on information theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961–1005.
- [18] Donoho, D.L. and Johnstone, J.M. (1994) "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage." *Biometrika*, vol. 81, no. 3, pp. 425–455.
- [19] Yuan, X., and Buckles, B. P. (2004) "Subband noise estimation for adaptive wavelet shrinkage." *17th international conference on pattern recognition*, vol 4, pp 885–888
- [20] Donoho, D. L., & Johnstone, I. M. (1995) "Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage." *Journal of the american statistical association*. vol. 90, no. 432, pp. 1200–1224.
- [21] Chang, S. G., Yu, B., and Vetterli, M. (2000) "Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression." *IEEE transactions on image processing*, vol. 9, no. 9, pp. 1532–1546.
- [22] Cai, T. T., and Silverman, B. W. (2001) "Incorporating information on neighbouring coefficients into wavelet estimation," *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series B*, pp. 127–148.
- [23] Chen, G. Y., Bui, T. D., and Krzyzak, A. (2005) "Image denoising using neighbouring wavelet coefficients." *Integrated Computer-Aided Engineering*. vol. 12, no. 1, pp. 99–107.
- [24] Sendur, L., & Selesnick, I. W. (2002) "Bivariate shrinkage functions for wavelet-based denoising exploiting interscale dependency." *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 50, no. 11, pp. 2744–2756.
- [25] Kittisuwan, P., and Asdornwised, W. (2008) "Wavelet-based image denoising using NeighShrink and BiShrink threshold functions." *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, vol. 1, pp. 497–500.
- [26] "German Aerospace Center." [Online]. Available: <http://www.dlr.de/eo/en/DesktopDefault.aspx/tabid-6695/%0A10983-read-10126/gallery-1/gallery-read-Image.1.3751/>.
- [27] "European Space Agency." [Online]. Available: <https://earth.esa.int/web/polsarpro/data-sources/sample-datasets>.
- [28] Sattar, F., Floreby, L., Salomonsson, G., and Lovstrom, B. (1997) "Image enhancement based on a nonlinear multiscale method," *IEEE transactions on image processing*, vol. 6, no. 6, pp. 888–895.
- [29] Coifman, R. R., and Donoho, D. L. (1995) "Translation-invariant de-noising." *Springer, New York, NY*, vol. 103, pp. 125–150.