

کاهش اسپکل در تصاویر رادار دریاچه مصنوعی در حوزه‌ی موجک با استفاده از توزیع لاپلاس

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

۱- کاشناس ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

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

۳- استادیار دانشکده جغرافیا، محیط زیست و ژئوماتیک، دانشگاه اوتاوا، کانادا

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۱

چکیده

اسپکل یک پدیده‌ی نویز مانند دانته‌ای است که به‌دلیل ویژگی هم‌دوس بودن سیستم‌های تصویربرداری SAR (Synthetic Aperture Radar) در آن‌ها پدیدار می‌شود. حضور پدیده‌ی اسپکل، تجزیه و تحلیل‌های انسانی و اتوماتیک را پیچیده می‌کند. بر همین اساس کاهش اسپکل در تصاویر SAR، یک مرحله‌ی پیش پردازشی مهم برای بسیاری از کاربردهای مرتبط با سنجش از دور است. کاهش اسپکل در تصاویر SAR، می‌تواند توسط چندمنظرسازی در زمان تشکیل تصویر و یا با استفاده از فیلترهای مکانی پس از تشکیل تصویر انجام شود. اما این روش‌ها دارای برخی محدودیت‌ها مانند کاهش قدرت تفکیک مکانی و از بین رفتن جزئیات تصویر هستند. برای غلبه بر این مشکلات، می‌توان از روش‌های مبتنی بر آنالیز چند تجزیه‌ای مانند تبدیل موجک استفاده نمود. در این مقاله، یک روش کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک با استفاده از نظریه‌ی بی‌زین و بر اساس برآوردگر MAP (Maximum a Posteriori) ارائه شده است. ضرایب بدون نویز موجک حاصل از تصویر لگاریتم گرفته شده و نویز در حوزه‌ی موجک، به ترتیب توسط توابع چگالی احتمال لاپلاس و گوسین مدل شدند. برای مقایسه، روش‌های انقباض ویزو، سور و بی‌زین به کار گرفته شدند. همچنین برای ارزیابی این روش‌ها، از دو نوع داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده و واقعی استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی برای داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده، شاخص PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) و شاخص حفظ لبه‌ی β بود، همچنین شاخص ENL (Equivalent Number of Looks) برای ارزیابی داده‌ی SAR واقعی استفاده شد. نتایج تجربی حاصل از کاهش اسپکل، نشان‌دهنده‌ی عملکرد برتر روش پیشنهادی در کاهش اسپکل و حفظ بهتر جزئیات تصویر SAR بود.

کلیدواژه‌ها: رادار با دریاچه گشایش مصنوعی، کاهش اسپکل، تبدیل موجک، توزیع لاپلاس.

*نویسنده مکاتبه کننده: خیابان کارگر شمالی (امیرآباد)، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی

تلفن: ۰۹۳۵۴۶۸۲۳۸۱

Email : r.farhadiani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سیگنال است. حضور اسپکل در تصاویر SAR سبب کاهش قدرت تفکیک رادیومتریک آن‌ها شده و عملکرد بسیاری از کاربردها مانند تجزیه و تحلیل‌های اتوماتیک و تکنیک‌های استخراج اطلاعات را به شدت کاهش می‌دهد، همچنین حضور پدیده‌ی اسپکل در کاربردهایی که نیاز به مشاهدات چندگانه SAR است (مانند تشخیص تغییرات اتوماتیک چند زمانه^۸) مضر است [۲]. در نتیجه، کاهش اسپکل در تصاویر SAR، یک مرحله‌ی پیش پردازشی مهم برای بسیاری از کاربردهای مرتبط با سنجش از دور محسوب می‌شود. به‌طور کلی، دو روش برای کاهش اسپکل در تصاویر SAR وجود دارد [۳ و ۴]. روش اول، پردازش چند منظری^۹ نام دارد که در زمان تولید تصاویر SAR انجام می‌شود. در این روش، طول مجازی آنتن به چندین بخش کوچک‌تر به نام منظر^{۱۰} تقسیم‌بندی می‌شود و برای هر منظر، یک تصویر مجزا تشکیل خواهد شد و در نهایت جمع غیر همدوس^{۱۱} تمام این تصاویر، تصویری با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر حاصل می‌کند که اسپکل در آن کاهش یافته است. روش دوم، که در آن اسپکل پس از شکل‌گیری تصویر SAR کاهش می‌یابد، استفاده از فیلترهای انطباقی مکانی^{۱۲} است. تاکنون، فیلترهای متعددی مانند فیلتر لی [۳]، فراست [۴]، کوان [۵] و بسیاری دیگر جهت کاهش اسپکل از تصاویر SAR ارائه شده‌اند. به‌طور کلی، فیلترهای مکانی عملکرد مناسبی در کاهش اسپکل از تصاویر SAR داشته، اما عملکرد این فیلترها به شدت وابسته به اندازه و جهت پنجره‌ی مورد استفاده در آنها است، همچنین فیلترهای مکانی محدودیت‌هایی برای حفظ جزئیات تصویر مانند لبه‌ها از خود نشان داده‌اند.

تصاویر راداری با درجه‌ی گشایش مصنوعی^۱، یکی از مهمترین منابع اطلاعاتی برای پایش سطح زمین هستند. سیستم تصویبرداری SAR، یک سیستم همدوس^۲ است که علاوه بر اطلاعات دامنه، اطلاعات فاز بازگشتی را نیز ثبت می‌کند. در این سیستم‌ها، منبع تولیدکننده‌ی انرژی درون سنجنده قرار داشته و این امر سبب عدم وابستگی آنها به خورشید می‌شود. همچنین این سیستم‌ها توانایی تولید و ارسال امواج مایکروویو با طول موج بلند را دارا هستند، در نتیجه تصویبرداری در شب و شرایط آب و هوایی نامساعد از جمله ویژگی‌های این سیستم‌ها به‌شمار می‌آید. همچنین استفاده از امواج با طول موج بلند سبب نفوذ آنها در عوارض مختلف شده و سبب می‌شود تا اطلاعات مفیدی از عوارض به‌دست آید که توسط سیستم‌های نوری قابل حصول نیستند [۱].

هر پیکسل در تصویر SAR شامل تعداد بسیار زیادی از پراکنش‌گر^۳ها است. با توجه به تصادفی بودن مکان هر پراکنش‌گر درون پیکسل زمینی، فاز ناشی از هر یک از پراکنش‌گرها نیز تصادفی خواهد بود. سیستم پردازش‌کننده‌ی SAR، جمع همدوس تمامی دامنه و فازهای موجود در یک پیکسل زمینی را به‌عنوان دامنه و فاز نهایی آن پیکسل ثبت می‌کند. در صورتی که تداخل امواج در پیکسل، سازنده^۴ باشد، پیکسل در تصویر به رنگ روشن دیده می‌شود، در مقابل، اگر تداخل ویرانگر^۵ باشد، پیکسل به رنگ تیره دیده خواهد شد (شکل (۱)). به این تغییرات عمده‌ی درجات خاکستری پیکسل‌های مجاور در تصویر SAR، پدیده‌ی نویز مانند^۶ اسپکل^۷ گفته می‌شود که مستقل از

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

² coherent

³ scatterer

⁴ constructive

⁵ destructive

⁶ noise-like

⁷ speckle

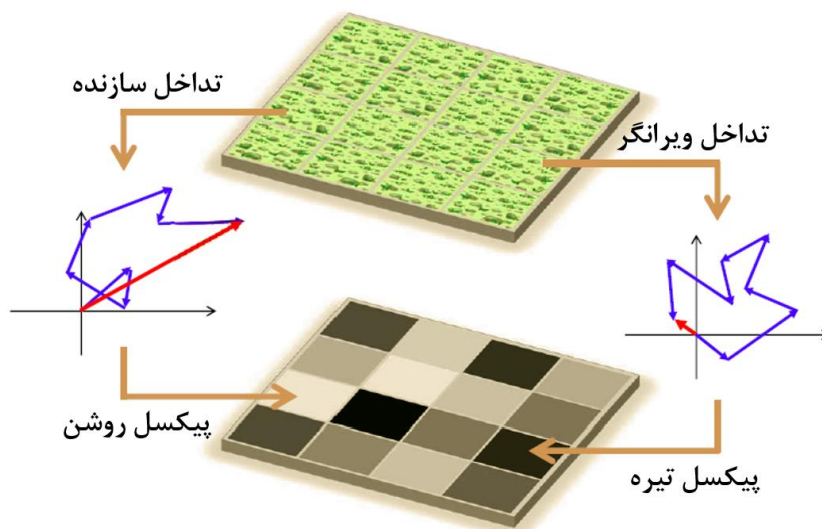
⁸ automatic multitemporal change detection

⁹ multi-look processing

¹⁰ look

¹¹ incoherent

¹² adaptive spatial filters



شکل ۱: پدیده ی اسپکل در تصویر SAR

به طور کلی، می توان فرآیند کاهش اسپکل توسط تبدیل موجک را در سه مرحله ی زیر خلاصه نمود:

۱. اعمال تبدیل مستقیم موجک
 ۲. دستکاری^۵ ضرایب موجک بر اساس یک قانون
 ۳. اعمال تبدیل معکوس موجک
- در یک دسته بندی کلی، دستکاری ضرایب موجک بر اساس دو روش حدآستانه گذاری^۶ ضرایب موجک و کاهش نویز بر اساس نظریه ی بیزین^۷ انجام خواهد شد. در حدآستانه گذاری ضرایب موجک که یک روش غیر خطی [۷] ساده است، ضرایب موجک با یک حدآستانه مقایسه می شوند و بر اساس یک قانون مشخص کاهش خواهند یافت. کاهش نویز بر مبنای نظریه ی بیزین نسبت به روش های حدآستانه گذاری، این امکان را می دهد که به طور موثرتری، نویز را در تصاویر کاهش داد [۸]. در این روش ها، استفاده از یک توزیع^۸ مناسب برای مدل کردن ضرایب بدون نویز موجک حاصل از تصویر لگاریتم گرفته شده از اهمیت بالایی برخوردار است. عموماً، ضرایب موجک یک

یکی از روش های غلبه بر محدودیت های فیلترهای مکانی، استفاده از روش های مبتنی بر آنالیز چند تجزیه ای^۱ است. در این میان، تبدیل موجک^۲ به طور وسیعی در پژوهش های مرتبط با کاهش نویز تصاویر مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون، روش های کاهش نویز متعددی بر اساس تبدیل موجک برای کاهش نویز جمع شونده^۳ ارائه شده اند، این در حالی است که اسپکل در تصاویر SAR دارای ماهیتی ضرب شونده^۴ است [۶]. در نتیجه لازم است تا اسپکل ضرب شونده به یک نویز جمع شونده تبدیل شود. به طور کلی، دو روش برای تبدیل اسپکل ضرب شونده به یک نویز جمع شونده وجود دارد. روش اول، بازنویسی سیگنال مشاهده شده به صورت مجموع یک سیگنال و سیگنال وابسته به نویز است. در روش دوم، برای تبدیل اسپکل ضرب شونده به یک نویز جمع شونده، از تبدیل لگاریتم استفاده می شود [۲]. با اعمال این تبدیل به تصویر sar، می توان فرض نمود که اسپکل ضرب شونده به یک نویز جمع شونده تبدیل می شود.

⁵ manipulate

⁶ thresholding

⁷ Bayesian theory

⁸ distribution

¹ Multi Resolution Analysis (MRA)

² Wavelet transform

³ additive noise

⁴ multiplicative

بخش‌بندی ادامه‌ی مقاله به شرح زیر خواهد بود:
در بخش ۲، مدل‌های آماری مربوط به تصاویر شدت و دامنه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در بخش ۳، مروری مختصر بر مباحث مرتبط با تبدیل موجک انجام خواهد شد. در بخش ۴، به ارائه‌ی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش ۵ عملکرد روش‌های کاهش اسپیکل مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک گسسته برای سیگنال یک بعدی بر اساس فیلتر کردن سیگنال با فیلترهای پایین‌گذر^{۱۲} بالاگذر^{۱۳} و نمونه‌برداری پایین^{۱۴} با فاکتور ۲ انجام می‌شود. فیلتر پایین‌گذر (فیلتر مقیاس^{۱۵}) و فیلتر بالاگذر (فیلتر موجک^{۱۶}) که به ترتیب با $h(k)$ و $g(k)$ نمایش داده می‌شوند، تشکیل یک جفت بانک فیلتر آینه‌ای چهارگانه^{۱۷} را می‌دهند [۹].

با توجه به اینکه تصویر یک سیگنال دو بعدی است، لازم است تا تبدیل موجک یک بعدی برای سیگنال دو بعدی نیز تعمیم یابد. تبدیل موجک دو بعدی، به راحتی توسط تبدیل موجک یک بعدی قابل پیاده‌سازی است. برای این کار، در هر مرحله از تجزیه‌ی موجک، فیلتر مقیاس و فیلتر موجک بر روی سطرها و ستون‌های سیگنال دو بعدی یا همان تصویر اعمال می‌شوند. پیاده‌سازی به این روش، پیاده‌سازی سطر-ستون^{۱۸} نامیده می‌شود که حاصل آن در هر مرحله از تجزیه، چهار زیر بانک^{۱۹} است. این چهار زیر بانک بر اساس محتوای فرکانسی آنها، شامل یک زیر بانک

تصویر، دارای توزیع غیر گوسین^۱ بوده و علاوه بر متقارن بودن^۲، حول صفر دارای یک قله‌ی نوک تیز^۳ بوده و دنباله‌دار^۴ هستند [۹]. تاکنون توزیع‌های گوناگونی برای مدل کردن ضرایب بدون نویز موجک و نویز در حوزه‌ی موجک در نظر گرفته شده‌اند. در [۱۰]، یک روش کاهش اسپیکل با استفاده از برآوردگر map^۵ و بکارگیری توزیع پایدار آلفا^۶ برای ضرایب بدون نویز موجک و توزیع گوسین برای نویز در حوزه‌ی موجک ارائه شده است. در [۱۱]، توزیع ضرایب بدون نویز موجک و نویز، توزیع گوسین معکوس نرمال^۷ در نظر گرفته شده‌اند، همچنین از برآوردگر map استفاده شده است. در [۱۲]، با استفاده از توزیع کوشی^۸ برای ضرایب بدون نویز موجک و توزیع گوسین برای نویز و توسط برآوردگر mmae^۹، روشی برای کاهش اسپیکل ارائه شده است؛ همچنین این پژوهش بر اساس برآوردگر map نیز در [۱۳] توسعه داده شده است. در [۱۴] با در نظر گرفتن مدل مارکوف پنهان بردار پایه^{۱۰} و توزیع گوسین، به‌ترتیب برای ضرایب بدون نویز موجک و نویز در حوزه‌ی موجک، روشی برای کاهش اسپیکل ارائه شده است. در این مقاله، از تابع چگالی احتمال لاپلاس^{۱۱} که یک توزیع نوک‌تیز و دنباله‌دار است، برای مدل کردن ضرایب بدون نویز موجک استفاده شده است، همچنین توزیع نویز در حوزه‌ی موجک، توزیع گوسین

در نظر گرفته شده است.

¹ non-Gaussian

² symmetric

³ sharply peaked around zero

⁴ heavy tails

⁵ Maximum a Posteriori (MAP) estimator

⁶ Alpha-stable distribution

⁷ normal inverse Gaussian distribution

⁸ Cauchy distribution

⁹ Minimum Mean Absolute Error (MMAE)

¹⁰ Vector-based Hidden Markov

¹¹ Laplace distribution

¹² low-pass

¹³ high-pass

¹⁴ sub sampling

¹⁵ scale filter

¹⁶ wavelet filter

¹⁷ Quadrature Mirror Filter (QMF) banks

¹⁸ row-column implementation

¹⁹ subband

ترتیب مولفه‌های مربوط به اسپکل ضرب‌شونده و یک نویز جمع‌شونده باشند، می‌توان نوشت [۱۰]:
رابطه (۱) $I(x, y) = S(x, y) \cdot \eta_m(x, y) + \eta_a(x, y)$
در رابطه‌ی (۱)، مولفه‌ی مربوط به نویز جمع‌شونده قابل صرف نظر نمودن است، در نتیجه با حذف این مولفه، داریم:

$$I(x, y) = S(x, y) \cdot \eta_m(x, y) \quad (۲)$$

در ادامه، توزیع‌های مربوط به تصاویر تک منظر و L منظر شدت^۶ و دامنه^۷ (یا جذر شدت^۸) معرفی خواهند خوانند شد. اسپکل در تصویر شدت تک منظر، دارای توزیع نمایی^۹ است، همچنین در تصویر شدت L منظر، اسپکل دارای توزیع گاما^{۱۰} با میانگین واحد و واریانس $1/L$ است. تابع چگالی احتمال این توزیع به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$p_I(\eta_m) = L^L \eta_m^{L-1} e^{-L\eta_m} / \Gamma(L) \quad (۳)$$

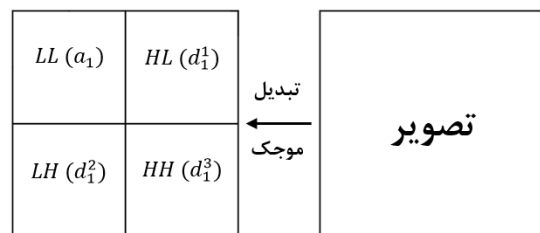
که در رابطه‌ی (۳)، $L \geq 1$ و $\eta_m \geq 0$ هستند و $\Gamma(\cdot)$ نشان‌دهنده‌ی تابع گاما است.

اسپکل در تصویر دامنه‌ی تک منظر که به صورت \sqrt{I} تعریف می‌شود، از توزیع رابلی^{۱۱} تبعیت می‌کند. همچنین در تصویر دامنه‌ی L منظر دارای توزیع χ با $2L$ درجه آزادی است که تابع چگالی احتمال آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$p_{\sqrt{I}}(\eta_m) = 2L^L \eta_m^{2L-1} e^{-L\eta_m^2} / \Gamma(L) \quad (۴)$$

در پژوهش‌های مرتبط با کاهش نویز، بیشتر الگوریتم‌های ارائه شده برای نویز گوسین جمع‌شونده توسعه یافته‌اند. همانطور که پیشتر توضیح داده شد، می‌توان از تبدیل لگاریتم برای تبدیل اسپکل ضرب‌شونده به نویز جمع‌شونده استفاده نمود. با اعمال تبدیل لگاریتم به روابط (۳ و ۴)، توابع چگالی احتمال

تقریب^۱ LL_j و سه زیر باند جزئیات^۲ LH_j ، HL_j و HH_j می‌شوند، که در آن، L و H به ترتیب نشان‌دهنده‌ی فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر است (شکل (۲)). با توجه به اینکه زیر باند تقریب LL_j شامل اطلاعات فرکانس پایین سیگنال می‌شود، بیشتر اطلاعات سیگنال در این زیر باند خواهد بود، در حالی که، زیر باندهای جزئیات LH_j ، HL_j و HH_j به ترتیب شامل اطلاعات فرکانس بالا یا جزئیات سیگنال در جهات افقی^۳، عمودی^۴ و قطری^۵ هستند. لازم به ذکر است که زیر باند تقریب LL_j ، به عنوان ورودی برای تجزیه در مرحله‌ی $z + 1$ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲)، نحوه‌ی بخش‌بندی زیر باندهای حاصل از تبدیل موجک را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نحوه‌ی بخش‌بندی زیر باندهای تقریب و جزئیات در تبدیل موجک

۳- توزیع اسپکل در تصاویر SAR و برآوردگر MAP

۳-۱- مدل آماری اسپکل

ویژگی‌های آماری اسپکل اولین بار در [۱۵ و ۱۶] مورد مطالعه قرار گرفت. تاکنون، مدل‌های متعددی برای اسپکل پیشنهاد شده است، در این میان، پر استفاده‌ترین مدل برای اسپکل، مدل ضرب‌شونده است. در صورتی که $I(x, y)$ تصویر آلوده به اسپکل، $S(x, y)$ تصویر عاری از اسپکل و $\eta_m(x, y)$ و $\eta_a(x, y)$ به

⁶ intensity

⁷ amplitude

⁸ square-root of intensity

⁹ Exponential

¹⁰ Gamma distribution

¹¹ Rayleigh distribution

¹ approximation

² detail

³ horizontal

⁴ vertical

⁵ diagonal

در رابطه‌ی (۱۰)، y ، w و n به ترتیب همان D_S^j ، D_I^j و D_η^j هستند. در صورتی که برآوردگر MAP برای تخمین w در حوزه‌ی موجک نوشته شود، داریم:

رابطه (۱۱)

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

در رابطه‌ی (۱۱)، $p_w(w)$ و $p_{y|w}(y|w)$ به ترتیب توابع چگالی احتمال پیشین^۱ و درست‌نمایی^۲ نامیده می‌شوند [۱۸]. رابطه‌ی (۱۱) همچنین معادل با رابطه‌ی (۱۲) است:

رابطه (۱۲)

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

در رابطه‌ی (۱۲)، $p_w(w)$ و $p_n(y-w)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توابع چگالی احتمال مولفه‌های مربوط به ضرایب بدون نویز موجک و نویز در حوزه‌ی موجک هستند. رابطه‌ی (۱۲) به صورت رابطه‌ی زیر نیز قابل بازنویسی است:

رابطه (۱۳)

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

در این مقاله، توزیع نویز در حوزه‌ی موجک، توزیع گوسین در نظر گرفته شده است که رابطه‌ی توزیع آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p_n(n) = 1/\sqrt{2\pi}\sigma_n \exp(-n^2/2\sigma_n^2) \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۴)، σ_n ، انحراف معیار نویز بوده و یک پارامتر مجهول است که باید تعیین گردد. برای محاسبه‌ی این پارامتر از تخمینگر میانه به صورت زیر استفاده می‌شود [۱۹]:

رابطه (۱۵)

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

در رابطه‌ی (۱۵)، C پارامتری است که میزان نرم‌شدگی^۳ تصویر با اسپیکل کاهش یافته را

اسپیکل لگاریتم گرفته شده به صورت زیر تغییر خواهند کرد [۱۷]:

$$p_I(\bar{\eta}_m) = L^L e^{\bar{\eta}_m L} e^{-L e^{\bar{\eta}_m}} / \Gamma(L) \quad (5)$$

$$p_{\sqrt{I}}(\bar{\eta}_m) = 2L^L e^{2\bar{\eta}_m L} e^{-L e^{2\bar{\eta}_m}} / \Gamma(L) \quad (6)$$

۳-۲- برآوردگر MAP در حوزه‌ی موجک

در صورتی که از طرفین رابطه‌ی (۲)، تبدیل لگاریتم گرفته شود، داریم:

$$I(x, y) = \bar{S}(x, y) + \bar{\eta}_m(x, y) \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷)، $\bar{I}(x, y)$ ، $\bar{S}(x, y)$ و $\bar{\eta}_m(x, y)$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی لگاریتم $I(x, y)$ ، $S(x, y)$ و $\eta_m(x, y)$ هستند. در ادامه، برای وضوح بیشتر، مختصات پیکسلی (x, y) را از رابطه‌ی (۷) حذف خواهیم نمود. در صورتی که z نشان‌دهنده‌ی تعداد مراحل تجزیه‌ی موجک باشد، با توجه به خطی بودن تبدیل موجک، با اعمال آن به رابطه‌ی (۷) خواهیم داشت:

$$A_I^j = A_S^j + A_\eta^j \quad (8)$$

$$D_I^j = D_S^j + D_\eta^j \quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹)، A_x^j و D_x^j به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ضرایب تقریب و جزئیات موجک هستند. با توجه به اینکه نویز جزء اطلاعات فرکانس بالای یک سیگنال محسوب می‌شود، تنها ضرایب جزئیات موجک (یا به اختصار ضرایب موجک) دستخوش تغییر خواهند شد و ضرایب تقریب تغییری نخواهند کرد. در نتیجه با توجه به رابطه‌ی (۹)، هدف بدست آوردن تخمینی از D_S در تمامی سطوح تجزیه‌ی موجک است. در این مقاله، از برآوردگر MAP برای محاسبه‌ی \hat{D}_S استفاده خواهیم نمود.

۴- روش پیشنهادی

در ادامه، برای سادگی، رابطه‌ی (۹) را به صورت زیر تغییر می‌دهیم:

$$y = w + n \quad (10)$$

¹ Prior probability distribution function

² Likelihood probability distribution function

³ smoothing

تغییر خواهند کرد. همانطور که ذکر شد، لازم است تا پارامتر σ از روی ضرایب نویزی موجک تخمین زده شوند. در این مقاله، به جای محاسبه ی پارامتر σ به صورت سراسری^۲، این پارامتر به صورت محلی^۳ و در یک پنجره ی همسایگی با ابعاد $N \times N$ محاسبه خواهد شد [۲۱]. لازم به ذکر است که افزایش ابعاد پنجره ی همسایگی سبب نزدیک شدن مقادیر پارامتر σ به مقدار سراسری آن خواهد شد. با در نظر گرفتن این پنجره ی همسایگی، σ مطابق با رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{(\hat{\sigma}^2(y) - \hat{\sigma}_n^2)_+} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

که در آن، $\hat{\sigma}^2(y)$ به صورت زیر بدست می آید:

$$\hat{\sigma}^2(y) = 1/N^2 \sum_{y_i \in N(k)} y_i^2 \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

و N ، اندازه ی پنجره ی همسایگی $N(k)$ است.

۴-۱- خلاصه ی الگوریتم پیشنهادی

مراحل الگوریتم پیشنهادی به شرح زیر است:

۱. اعمال تبدیل لگاریتم به تصویر SAR.
۲. اعمال تبدیل موجک مستقیم به تصویر حاصل از مرحله ی ۱، تا z مرحله.
۳. تخمین پارامترهای مجهول $\hat{\sigma}_n$ و $\hat{\sigma}$ بر اساس روابط (۱۵)، (۲۰) و (۲۱).
۴. کاهش نویز در هر یک از زیرباندهای جزئیات موجک توسط رابطه ی (۱۹).
۵. اعمال تبدیل موجک معکوس.
۶. تنظیم میانگین.
۷. اعمال تبدیل نمایی.

تحت تاثیر قرار می دهد و فاکتور نرم کنندگی^۱ نامیده می شود. لازم به توضیح است که فاکتور نرم کنندگی بر اساس محتوای تصویر انتخاب می گردد. در صورتی که این پارامتر عدد کوچکی انتخاب گردد، کاهش اسپکل موثر در تصویر اتفاق نخواهد افتاد، همچنین مقادیر بزرگتر برای این پارامتر سبب بیش از حد نرم شدن تصویر و در نتیجه ی آن، از بین رفتن جزئیات تصویر خواهد شد. با جایگذاری تابع چگالی احتمال نویز رابطه ی (۱۴) در برآوردگر MAP رابطه ی (۱۳) و برابر صفر قرار دادن مشتق این رابطه نسبت به w خواهیم داشت:

$$y - \hat{w}/\sigma_n^2 + \partial/\partial w(\log p_w(w)) = 0 \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

حال نیاز به تعیین تابع چگالی احتمال مربوط به ضرایب بدون نویز موجک است. همانطور که پیشتر توضیح داده شد، توزیع ضرایب جزئیات موجک، یک توزیع نوک تیز و دنباله دار است، بر همین اساس در این مقاله، از توزیع لاپلاس که دارای دو ویژگی ذکر شده است برای مدل کردن ضرایب بدون نویز موجک استفاده خواهیم نمود. تابع چگالی احتمال لاپلاس به صورت زیر تعریف می شود:

$$p_w(w) = 1/\sigma\sqrt{2} \exp(-\sqrt{2}|w|/\sigma) \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه ی (۱۷)، σ انحراف معیار توزیع لاپلاس است و باید تعیین گردد. مشتق لگاریتم رابطه ی (۱۷) نسبت به w به صورت زیر خواهد بود:

$$\partial/\partial w(\log p_w(w)) = -\sqrt{2}/\sigma \cdot \text{sign}(w) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

با جایگذاری رابطه ی (۱۸) در رابطه ی (۱۶) و ساده سازی آن، در نهایت برآوردگر MAP برای تخمین w از روی y به صورت زیر خواهد شد [۲۰]:

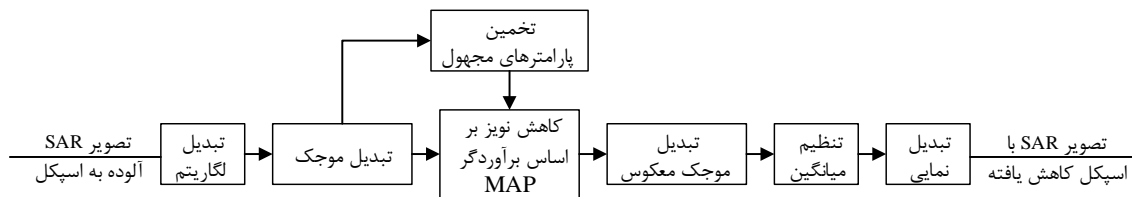
$$\hat{w}(y) = \text{sign}(y) \cdot (|y| - \sqrt{2}\sigma_n^2/\sigma)_+ \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که در رابطه ی (۱۹)، علامت + بیانگر این است که مقادیر مثبت حفظ و مقادیر منفی به صفر

^۲ global

^۳ local

^۱ smoothing factor



شکل ۳: دیاگرام روش پیشنهادی برای کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک

ابعاد پنجره‌ی همسایگی برابر با 5×5 ، 15×15 و 25×25 در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که برای بهبود نتایج حاصل از کاهش اسپکل، از الگوریتم چرخ‌گردان^۶ [۲۵] نیز استفاده شده است. مطابق این الگوریتم، در ابتدا سیگنال نویزی به اندازه‌ی m واحد شیفت دایره‌ای^۷ داده می‌شود، سپس عملیات کاهش نویز انجام خواهد شد و در انتها بر روی سیگنال خروجی، شیفت معکوس اعمال خواهد شد، در نهایت از تمامی سیگنال‌های بدست آمده، میانگین گرفته خواهد شد.

۵-۱- داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده

به داده‌ای که کاربر اسپکل را بر روی آن ایجاد می‌کند، داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده گفته می‌شود. با توجه به عدم دسترسی به داده‌ی عاری از اسپکل در تصاویر SAR واقعی، با شبیه‌سازی تصویر SAR می‌توان روش‌های کاهش اسپکل را به طور دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار داد. تصویر شبیه‌سازی شده در این مقاله، توسط نویسندگان آن و بر اساس مدل ضرب‌شونده‌ی رابطه‌ی (۲) تولید شده‌اند. در این مقاله، از تصویر شبیه‌سازی شده با تعداد منظرهای برابر ۱، ۵، ۹ و ۱۶ استفاده شده است (شکل (۴، الف)). در این حالت، با توجه به در دسترس بودن داده‌ی عاری از اسپکل، از شاخص نسبت حداکثر سیگنال به نویز^۸ (PSNR) و شاخص حفظ لبه‌ی β برای ارزیابی روش‌های کاهش اسپکل استفاده شده است.

شکل (۳)، دیاگرام روش پیشنهادی برای کاهش اسپکل از تصاویر SAR را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که به دلیل استفاده از تبدیل لگاریتم، میانگین اسپکل لگاریتم گرفته شده صفر نخواهد بود، در نتیجه لازم است تا این میانگین اریب تصحیح گردد. برای این کار کفایت تا میانگین اسپکل لگاریتم گرفته شده از تصویر حاصل از اعمال تبدیل موجک معکوس، کسر گردد [۲۲].

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش، برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در کاهش اسپکل از تصاویر SAR، آن را بر روی داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده و واقعی پیاده‌سازی می‌نماییم. همچنین برای مقایسه، روش‌های انقباض ویزو^۱ [۱۹]، سور^۲ [۲۳] و بیز^۳ [۷] بکار گرفته خواهند شد. با توجه به اینکه موجک با طول بلندتر و منظم‌تر، منجر به کاهش اسپکل موثرتری خواهد شد [۲۴]، بر همین اساس در این مقاله، در پیاده‌سازی روش‌های کاهش اسپکل از موجک سیملت ۸ استفاده شده است. همچنین برای کاهش موثرتر اسپکل از تصاویر SAR، تصاویر تا ۵ مرحله تجزیه شده‌اند. فاکتور نرم‌کنندگی برای داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده^۴ و واقعی^۵ به ترتیب برابر با ۱ و ۱.۵ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین برای بررسی تاثیر ابعاد پنجره‌ی همسایگی برای محاسبه‌ی پارامتر σ در میزان کاهش اسپکل از تصاویر،

¹ VisuShrink

² SureShrink

³ BayesShrink

⁴ simulated SAR data

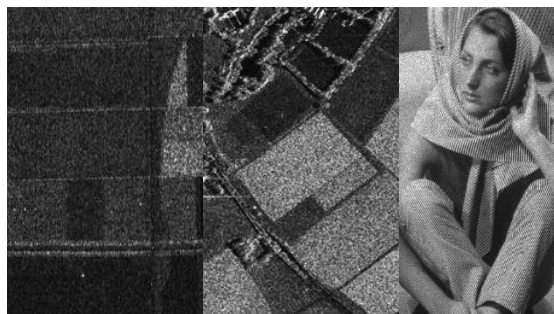
⁵ real SAR data

⁶ cycle spinning

⁷ circular shift

⁸ Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

تصویر طی فرآیند کاهش اسپکل، از شاخص حفظ لبه ی β ارائه شده در [۲۶] نیز استفاده می‌نماییم. این شاخص در حالت بهینه نزدیک به یک است. جدول (۱)، مقادیر به دست آمده از شاخص‌های PSNR و β را نشان می‌دهد. مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های PSNR و β ، نشان‌دهنده ی عملکرد برتر روش پیشنهادی در کاهش اسپکل از تصاویر با تعداد منظرهای متفاوت و حفظ لبه‌های آن نسبت به روش‌های انقباض ویزو، سور و بیز است. همان‌طور که از این جدول مشخص است، روش ویزو نسبت به سایر روش‌ها در کاهش اسپکل و حفظ لبه‌های تصویر ضعیف‌تر عمل نموده است. همچنین با توجه به این جدول، در بیشتر موارد، پنجره ی همسایگی با ابعاد کوچکتر، نتایج بهتری را در کاهش اسپکل در روش پیشنهادی حاصل کرده است. شکل (۵)، نتایج حاصل از کاهش اسپکل در تصویر SAR شبیه‌سازی شده ی ۱۶ منظر را نشان می‌دهد.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۴: الف) تصویر SAR شبیه‌سازی شده ی ۱۶ منظر
ب) نوردلینگر ج) فلوند

رابطه ی محاسبه ی شاخص PSNR به صورت زیر است:

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} 255^2 / \text{MSE} \quad (22)$$

که در آن

$$\text{MSE} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S - \hat{S})^2 \quad (23)$$

است. در این رابطه، S و \hat{S} به ترتیب تصویر عاری از اسپکل و تصویر پس از کاهش اسپکل هستند. همچنین m و n نشان‌دهنده ی تعداد پیکسل‌های تصویر در راستای سطرها و ستون‌های آن می‌باشد. مقادیر بالاتر شاخص PSNR نشان‌دهنده ی عملکرد بهتر روش کاهش اسپکل است. با توجه به اهمیت حفظ لبه‌های

جدول ۱: مقادیر حاصل از شاخص‌های PSNR و β

۱۶L=		۹L=		۵L=		۱L=		روش‌های کاهش اسپکل
β	PSNR	β	PSNR	β	PSNR	β	PSNR	
۰.۷۴۶	۲۶.۹۹	۰.۶۳۳	۲۵.۴۵	۰.۴۹۱	۲۴.۱۴	۰.۱۹۲	۲۱.۶۸	انقباض ویزو
۰.۸۶۸	۲۹.۵۲	۰.۸۰۸	۲۷.۹۰	۰.۷۲۲	۲۶.۲۶	۰.۲۵۵	۲۲.۰۱	انقباض سور
۰.۸۴۴	۲۹.۱۵	۰.۷۸۹	۲۷.۶۵	۰.۷۱۳	۲۶.۱۵	۰.۳۱۳	۲۲.۲۸	انقباض بیز
۰.۸۹۷	۳۰.۵۶	۰.۸۵۳	۲۸.۹۱	۰.۷۸۶	۲۷.۲۵	۰.۳۳۲	۲۲.۴۵	روش پیشنهادی ۵×۵
۰.۸۹۲	۳۰.۱۸	۰.۸۴۹	۲۸.۵۷	۰.۷۸۷	۲۶.۹۵	۰.۴۵۱	۲۲.۶۷	روش پیشنهادی ۱۵×۱۵
۰.۸۸۸	۲۹.۹۹	۰.۸۴۳	۲۸.۳۵	۰.۷۹۹	۲۶.۷۱	۰.۴۴۲	۲۲.۴۰	روش پیشنهادی ۲۵×۲۵



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵: الف) نتایج حاصل از کاهش اسپکل در تصویر SAR شبیه‌سازی شده‌ی ۱۶ منظر

الف) انقباض ویزو ب) انقباض سور ج) انقباض بیز د) روش پیشنهادی ۵×۵

مربوط به قطبش^۵های افقی-افقی^۶ هستند. با توجه به اینکه در داده‌ی SAR واقعی، تصویر عاری از اسپکل در دسترس نیست، از شاخص تعداد منظرهای معادل^۷ (ENL) برای ارزیابی عملکرد روشهای کاهش اسپکل در مناطق همگن استفاده می‌نماییم. این شاخص مطابق با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$ENL = A(\mu/\sigma)^2 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

۵-۲- داده‌ی SAR واقعی

در این مقاله، از تصویر شدت منطقه‌ی نوردلینگر^۱ [۲۷] و تصویر دامنه‌ی منطقه‌ی فلولند^۲ [۲۸] به ترتیب گرفته شده توسط ماهواره‌ی تراسار ایکس^۳ در باند ایکس و سیستم راداری ایرسار^۴ در باند ال استفاده شده است. شکل (۴)، برشی از این تصاویر را نشان می‌دهد. هر دو تصویر استفاده شده در این مقاله

¹ Nördlinger

² Flevoland

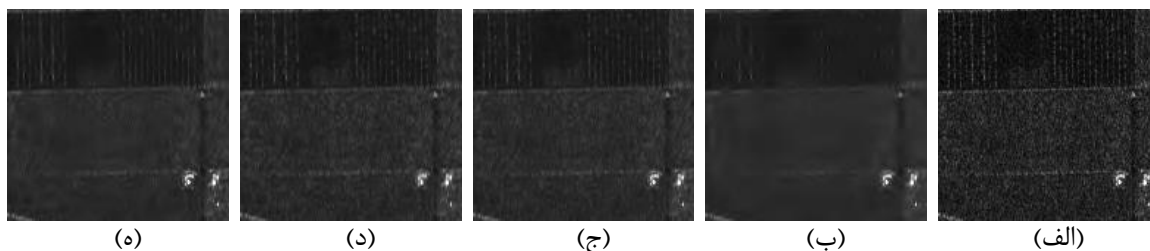
³ TerraSAR-X

⁴ AIRSAR

⁵ polarization

⁶ HH

⁷ Equivalent Number of Looks (ENL)



شکل ۶: قسمتی از تصویر فلولند

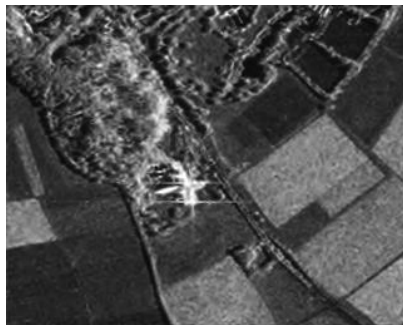
الف) تصویر آورده به اسپکل ب) انقباض ویزو ج) انقباض سور د) انقباض بیز ه) روش پیشنهادی

در کاهش اسپکل از مناطق همگن تصویر نسبت به دیگر روش‌ها بهتر عمل نموده است، اما این روش سبب بیش از حد نرم شدن تصویر و از بین رفتن برخی جزئیات در تصویر نیز شده است. برای بررسی دقیق‌تر، شکل (۶)، برشی از تصویر SAR واقعی منطقه‌ی فلولند را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که روش انقباض ویزو سبب بیش از حد نرم شدن تصویر SAR و در نتیجه‌ی آن از بین رفتن برخی جزئیات تصویر شده است. بر اساس جدول (۲) می‌توان دریافت که عملکرد روش‌های انقباض سور و بیز مشابه با یکدیگر بوده، اما روش انقباض سور در کاهش اسپکل مقداری بهتر عمل نموده است. روش پیشنهادی نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به روش‌های انقباض سور و بیز داشته و در کاهش اسپکل بهتر عمل نموده است. شکل (۷)، نتایج حاصل از کاهش اسپکل در تصاویر SAR واقعی را نشان می‌دهد.

در رابطه‌ی (۲۴)، μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار تصویر در یک منطقه‌ی همگن از آن است، همچنین مقدار پارامتر A برای تصویر شدت و دامنه به ترتیب برابر با 1 و $1 - (4/\pi)$ است [۲۲]. مقادیر بالاتر شاخص ENL نشان‌دهنده‌ی کاهش موثرتر اسپکل در مناطق همگن تصویر است. در این مقاله، از دو منطقه‌ی همگن برای محاسبه‌ی شاخص ENL استفاده شده است. جدول (۲)، نشان‌دهنده‌ی مقادیر به دست آمده از دو منطقه‌ی همگن در تصاویر نوردلینگر و فلولند است. با توجه به این جدول، روش انقباض ویزو دارای بالاترین مقادیر شاخص ENL نسبت به سایر روش‌ها است. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، شاخص ENL صرفاً برای ارزیابی میزان کاهش اسپکل در یک منطقه‌ی همگن از تصویر استفاده می‌شود و در مورد حفظ جزئیات تصویر طی فرآیند کاهش اسپکل اطلاعاتی حاصل نمی‌کند. بر همین اساس، می‌توان دریافت که روش انقباض ویزو

جدول ۲: مقادیر حاصل از شاخص ENL

منطقه‌ی ۲	منطقه‌ی ۱	منطقه‌ی ۲	منطقه‌ی ۱	
فلولند		نوردلینگر		روش‌های کاهش اسپکل
۲.۸۵	۲.۷۷	۴.۳۵	۴.۸۸	تصویر نویزی
۴۶.۲۱	۹۲.۵۶	۱۲۵.۰۸	۱۵۶.۳۶	انقباض ویزو
۲۷.۶۵	۱۵.۳۶	۲۷.۲۸	۲۸.۴۴	انقباض سور
۲۲.۰۸	۱۲.۵۲	۲۴.۵۷	۲۵.۱۷	انقباض بیز
۴۰.۱۸	۲۳.۵۱	۷۲.۳۰	۹۴.۰۷	روش پیشنهادی ۵×۵
۳۲.۸۰	۲۲.۲۵	۵۱.۶۵	۷۰.۵۰	روش پیشنهادی ۱۵×۱۵
۳۲.۳۹	۲۱.۰۱	۴۸.۸۸	۷۲.۲۲	روش پیشنهادی ۲۵×۲۵



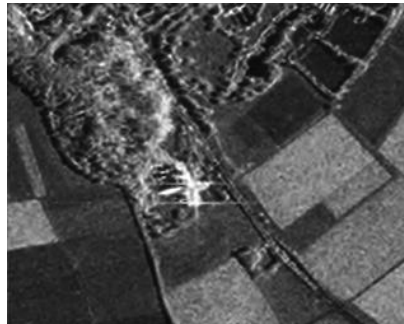
(ب)



(الف)



(د)



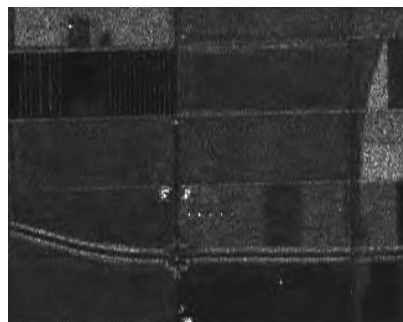
(ج)



(ز)



(ه)



(ط)



(ح)

شکل ۷: نتایج حاصل از کاهش اسپیکل در تصاویر SAR واقعی مناطق نوردلینگر و فولوند
الف، ه) انقباض ویزو ب، ز) انقباض سور ج، ح) انقباض بیز د، ط) روش پیشنهادی ۵×۵

برای ارزیابی روش‌های کاهش اسپکل، از شاخص PSNR و شاخص حفظ لبه‌ی β برای داده‌ی SAR شبیه‌سازی شده و از شاخص ENL برای داده‌ی SAR واقعی استفاده شد. نتایج تجربی حاصل از شاخص‌های ذکر شده، نشان‌دهنده‌ی عملکرد برتر روش پیشنهادی در کاهش اسپکل از تصاویر و حفظ بهتر جزئیات تصویر بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کاهش اسپکل در حوزه‌ی موجک بر اساس برآوردگر MAP ارائه شد. توزیع ضرایب بدون نویز موجک تصویر لگاریتم گرفته، توزیع لاپلاس در نظر گرفته شد. همچنین، توزیع نویز در حوزه‌ی موجک، توزیع گوسین در نظر گرفته شد. برای مقایسه‌ی عملکرد روش کاهش اسپکل پیشنهادی، از روش‌های انقباض ویزو، سور و بیز استفاده شد.

مراجع

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 1, no. 1, pp. 6–43, 2013.
- [2] F. Argenti, A. Lapini, T. Bianchi, and L. Alparone, "A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 6–35, 2013.
- [3] J.-S. Lee, "Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images," *Opt. Eng.*, vol. 25, no. 5, p. 255636, 1986.
- [4] 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 Trans. Pattern Anal. Mach. intell.*, no. 2, pp. 157–166, 1982.
- [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.*, no. 2, pp. 165–177, 1985.
- [6] C. Oliver and S. Quegan, *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing, 2004.
- [7] S. G. Chang, B. Yu, and M. Vetterli, "Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression," *IEEE Trans. Image Proc.*, vol. 9, no. 9, pp. 1532–1546, 2000.
- [8] B. Vidakovic, *Statistical modeling by wavelets*, vol. 503. John Wiley & Sons, 2009.
- [9] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. intell.*, no. 7, pp. 674–693, 1989.
- [10] A. Achim, P. Tsakalides, and A. Bezerianos, "SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 8, pp. 1773–1784, 2003.
- [11] S. Solbo and T. Eltoft, "Homomorphic wavelet-based statistical despeckling of SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 4, pp. 711–721, 2004.
- [12] M. I. H. Bhuiyan, M. O. Ahmad, and M. N. S. Swamy, "A new homomorphic Bayesian wavelet-based MMAE filter for despeckling SAR images," in *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2005, pp. 4935–4938.
- [13] M. I. H. Bhuiyan, M. O. Ahmad, and M. N. S. Swamy, "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, 2007.
- [14] M. Amini, M. O. Ahmad, and M. N. S. Swamy, "SAR Image despeckling using vector-based hidden Markov model in wavelet domain," in *IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Eng. (CCECE)*, 2016, pp. 1–4.

- [15] H. H. Arsenault and G. April, "Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 66, no. 11, pp. 1160–1163, 1976.
- [16] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 66, no. 11, pp. 1145–1150, 1976.
- [17] [17] H. Xie, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "Statistical properties of logarithmically transformed speckle," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 3, pp. 721–727, 2002.
- [18] D. Gleich and M. Datcu, "Gauss–Markov model for wavelet-based SAR image despeckling," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 365–368, 2006.
- [19] D. L. Donoho and J. M. Johnstone, "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage," *Biometrika*, vol. 81, no. 3, pp. 425–455, 1994.
- [20] L. Sendur and I. W. Selesnick, "Bivariate shrinkage functions for wavelet-based denoising exploiting interscale dependency," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 11, pp. 2744–2756, 2002.
- [21] L. Sendur and I. W. Selesnick, "Bivariate shrinkage with local variance estimation," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 438–441, 2002.
- [22] H. Xie, L. E. Pierce, and F. T. Ulaby, "SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 10, pp. 2196–2212, 2002.
- [23] D. L. Donoho and I. M. Johnstone, "Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage," *J. Amer. Stat. Assoc.*, vol. 90, no. 432, pp. 1200–1224, 1995.
- [24] H. Guo, J. E. Odegard, M. Lang, R. A. Gopinath, I. W. Selesnick, and C. S. Burrus, "Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R," in *Proc. 1st Int. Conf. on Image Process.*, 1994, vol. 1, pp. 75–79.
- [25] R. R. Coifman and D. L. Donoho, "Translation-invariant de-noising," in *Wavelets and Statistics*, Springer, 1995, pp. 125–150.
- [26] F. Sattar, L. Floreby, G. Salomonsson, and B. Lovstrom, "Image enhancement based on a nonlinear multiscale method," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 6, no. 6, pp. 888–895, 1997.
- [27] "German Aerospace Center." [Online]. Available: <http://www.dlr.de/>
- [28] "European Space Agency." [Online]. Available: <https://earth.esa.int/web/polsarpro/data-sources/sample-datasets>.



Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images in Wavelet Domain Using Laplace Distribution

Ramin Farhadiani^{*1}, Abdolreza Safari², Saeid Homayouni³

- 1- Ms.c of remote sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Assistant professor in Department of Geography, University of Ottawa, Canada

Abstract

Speckle is a granular noise-like phenomenon which appears in Synthetic Aperture Radar (SAR) images due to coherent properties of SAR systems. The presence of speckle complicates both human and automatic analysis of SAR images. As a result, speckle reduction is an important preprocessing step for many SAR remote sensing applications. Speckle reduction can be made through multi-looking during the image formation or using spatial filters as a preprocessing step. However, these methods have some limitations such as a decrease in spatial resolution or smoothening of details and edges. To overcome these problems, Multi-Resolution Analysis (MRA), such as wavelet transform, should be used. In this paper, a despeckling method based on the Bayesian theory and Maximum a Posteriori (MAP) estimator in the wavelet domain was proposed. The noise-free wavelet coefficients of the logarithmically transformed image and the noise in the wavelet domain were modeled based on the Laplace and Gaussian distributions respectively. VisuShrink, SureShrink, and BayesShrink methods were also implemented and applied to both simulated and real SAR data for comparison purpose and to assess the proposed method. PSNR and beta edge preserving index were used to evaluate the performance of simulated SAR data, while ENL was employed to evaluate the real SAR data. Experimental results of despeckling showed the superior performance of the proposed method in suppressing the speckle efficiently and preserving better the spatial details in the SAR image

Key words: Synthetic Aperture Radar, Speckle Reduction, Wavelet Transform, Laplace Distribution.