

ارائه یک روش کاهش اسپکل روی تصاویر رادار با روزنه مصنوعی

میر مجید موسوی^{۱*}، جلال امینی^۲، یاسر مقصودی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس

دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

majid.mousavi@ut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

j.amini@ut.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت آذر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۴)

چکیده

وجود اسپکل در تصاویر رادار امری اجتناب ناپذیر است. نویز اسپکل یک آشفتگی نقطه‌ای است که معمولاً به عنوان نویز ضرب‌شونده در تصاویر تک‌پلاریزه مدل می‌شود. این نویز که وابسته به سیگنال است به دلیل نوسانات فاز سیگنال‌های بازگشتی امواج الکترومغناطیسی بوجود می‌آید که به صورت نقطه نقطه ظاهر می‌شود. حضور اسپکل، تفسیر و آنالیز تصویر را پیچیده‌تر می‌کند و باعث کاهش دسترسی به اطلاعات تصویر می‌شود لذا انتخاب الگوریتم مناسب کاهش نویز اسپکل حائز اهمیت است. در مقاله حاضر ابتدا به توضیح فیلترهای متداول کاهش اسپکل مانند: میانگین، کوان، فراست، لی، لی بهبودیافته و گاما-مپ پرداخته شده، سپس بر طبق ویژگی‌های آماری اسپکل و ویژگی‌های بافتی تصویر SAR یک الگوریتم تطبیقی برای کاهش نویز اسپکل با پنجره تغییرپذیر از لحاظ بعد بر پایه انحراف معیار نسبی پیشنهاد شده است. برای بررسی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و سایر فیلترهای متداول، از یک تصویر شبیه‌سازی شده چهار-دید SAR و دو تصویر واقعی، اخذ شده از دو سنجه هوابرد مختلف، استفاده شد. نتایج تجربی نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش الگوریتم پیشنهادی در حذف اسپکل، همراه با حفظ بسیار خوب ویژگی‌های لبه، اهداف نقطه‌ای و میانگین تصویر نسبت به سایر فیلترها می‌باشد. به عنوان مثال شاخص‌های ENL و SNR برای ناحیه ۱ از تصویر اول به ترتیب ۱۷،۲۲ و ۷،۹۱ بود که بالاتر از مقدار سایر فیلترهای متداول بود.

واژگان کلیدی: رادار با روزنه مصنوعی (SAR)، فیلتر اسپکل، انحراف معیار نسبی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

دوم روش‌های پس‌پردازشی نیز می‌گویند. طی این پروسه از چندین دید از یک منطقه‌ی یکسان که از لحاظ آماری مستقل هستند متوسط‌گیری می‌شود [۵].

تکنیک‌های متنوع و بسیاری برای کاهش اسپیکل در ادبیات پیشنهاد شده است. از میان آنها به فیلتر لی^۴ و مشتقات آن [۷،۶]، فیلتر هندسی^۵ [۸]، فیلتر کوان^۶ [۹]، فیلتر فراست^۷ و مشتقات آن [۱۰]، [۷]، فیلتر گاما-مپ^۸ [۱۱]، فیلترهایی بر اساس تبدیل موجک^۹ به پیروی از مبنای تئوری مالت [۱۳،۱۲] و فیلترهایی بر اساس پیچک [۱۵،۱۴] می‌توان اشاره کرد.

فیلترهای تطبیقی در حوزه مکان به طور گسترده‌تری نسبت به فیلترهای حوزه فرکانس مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فیلتر فراست نوع تطبیقی فیلتر وینر [۱۶] است که مقادیر پیکسل‌ها $I(x,y)$ را، در داخل یک پنجره با اندازه ثابت، با پاسخ ضربه‌ای نمایی $m(x,y)$ کانولوشن می‌کند. فیلترهای لی و کوان، که بر اساس معیار خطای میانگین کمترین مربعات^{۱۳} عمل می‌کنند، هر پیکسل فیلتر شده ترکیب خطی از شدت I مشاهده شده و مقدار شدت متوسط \bar{I} در پنجره متحرک می‌باشد. همه‌ی این فیلترهای تطبیقی به عنوان تابعی از ضریب تغییر^۴ محلی منطبق‌اند و می‌توانند با تعیین مقدار کمینه برای بهتر نرم کردن اسپیکل و انتخاب حد بالایی برای حفظ بافت و اهداف نقطه‌ای^۵ بهبود یابند [۷].

پراستفاده‌ترین فیلترهای تطبیقی مورد استفاده شامل فیلترهای لی، کوان، گاما-مپ و لی بهبود یافته است. ویژگی مشترک این فیلترها استفاده از یک پنجره متحرک، تعریف حدآستانه‌هایی برای تصمیم‌گیری و ثابت فرض کردن سیگنال در داخل پنجره و در نتیجه استفاده از آماره‌های محلی مانند میانگین و انحراف معیار برای کاهش نویز اسپیکل می‌باشد. در این مقاله بر اساس آنالیز مبنای تصویربرداری SAR، یک الگوریتم کاهش اسپیکل با پنجره قابل تغییر، بر اساس ضریب تغییر نویز، ارائه

رادار با روزه‌ی مصنوعی^۱ (SAR) یک رادار تصویربرداری ماکروویو فعال است که بر پایه مبنای روزه مصنوعی می‌باشد [۱]. سنسورهای SAR قابلیت تصویربرداری در طول روز و شب و در همه نوع آب و هوا را دارند. طول موج ماکروویوی که در SAR استفاده می‌شود نه تنها از ابرها بلکه از مناطق بارانی و گیاهان نیز عبور می‌کند، و به سبب این ویژگی‌ها اطلاعات بسیار و جدیدی می‌تواند بدست آورد که توسط نور مرئی و مادون قرمز به دست نمی‌آید.

یکی از مشکلات اساسی تصاویر راداری وجود نویز اسپیکل^۲ در این تصاویر است. اسپیکل در تصاویر SAR به دلیل تداخل هم‌دوس امواج انعکاس‌یافته از بسیاری پراکنش‌گرهای اصلی ایجاد می‌شود [۲]. فواصل بین پراکنش‌گرهای اصلی و بخش دریافت‌کننده رادار به دلیل موقعیت تصادفی پراکنش‌گرها تغییر می‌کنند، بنابراین فاصله از پراکنش‌گرها تا رادار تصادفی است. امواجی که از هر پراکنش‌گر دریافت می‌شود اگرچه از لحاظ فرکانس همسان هستند اما دیگر از لحاظ فاز یکسان نیستند. این اثر در تصاویر شدت، پیکسل به پیکسل تفاوت ایجاد می‌کند و باعث ایجاد نویز قابل ملاحظه‌ای در تصاویر می‌شود. نویز اسپیکل پردازش و تفسیر تصاویر SAR را پیچیده‌تر می‌کند، بنابراین به منظور پردازش تصاویر SAR، اسپیکل می‌بایست مهار شود [۱،۳]. روش‌های متنوعی برای حذف نویز اسپیکل وجود دارد. اعمال روش‌های حذف نویز اسپیکل بر تصویر SAR باعث از دست رفتن بخشی از اطلاعات جزئیات و کاهش رزولوشن تصویر (بر حسب نوع روش پیشنهادی) می‌شود. بنابراین، بسیار مهم است که برای استفاده موثر تصاویر SAR نویز اسپیکل را به طور اثربخشی از تصاویر SAR فیلتر نماییم به طوری که اطلاعات جزئیات و رزولوشن تصویر حفظ شود. به طور کلی روش‌های فیلتر کردن اسپیکل در دو دسته

کلاسه‌بندی می‌شوند. یک، متوسط‌گیری چندین دید، که از یک منطقه یکسان به دست می‌آید. این روش همچنین پردازش چند-دیده^۳ نامیده می‌شود. روش دیگر، هموار کردن اسپیکل پس از تشکیل تصویر می‌باشد [۴]. به روش

^۴ Lee

^۵ geometric

^۶ Kuan

^۷ Frost

^۸ gamma-map

^۹ wavelet

^{۱۰} Mallat

^{۱۱} curvelet

^{۱۲} Weiner

^{۱۳} minimum mean square error (MMSE)

^{۱۴} coefficient of variation (CV)

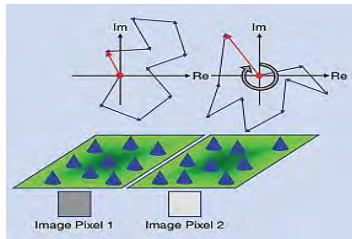
^{۱۵} point targets

^۱ synthetic aperture radar (SAR)

^۲ speckle

^۳ multi look

امواج، پراکنش تارگت‌های تابیده شده و راستای آنتن بستگی دارد.



شکل ۲- توزیع تصادفی پراکنش‌گرها در هر سلول زمینی که باعث می‌شود شدت و فاز حاصله، از هر پیکسل به پیکسل دیگر تغییر کند [۵]

اگر تعداد پراکنش‌گرها به اندازه کافی زیاد باشد، قضیه حد مرکزی اعمال می‌شود [۲] و سیگنال حاصل $(Ae^{j\phi} = Z_1 + jZ_2)$ می‌تواند به عنوان یک سیگنال مختلط دیده شود که قسمت‌های حقیقی و موهومی آن مستقلند و به طور یکسان از توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس $\sigma^2/2$ پیروی می‌کند [۱۸]. تابع چگالی احتمال^۲ توام سیگنال:

$$P_{Z_1, Z_2}(Z_1, Z_2) = \frac{1}{\pi\sigma^2} e^{-\frac{Z_1^2 + Z_2^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

از آنجایی که دامنه A بر اساس تابع چگالی احتمال ریلی^۳ توزیع شده است، pdf آن چنین است:

$$P_1(A) = \left(\frac{2A}{\sigma}\right) \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma}\right), \quad A \geq 0 \quad (3)$$

و برای انرژی یا شدت $I=A^2$ که بر اساس تابع نمایی توزیع شده است، pdf آن چنین است:

$$P_1(I) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\frac{I}{\sigma}\right) \quad I \geq 0 \quad (4)$$

با میانگین $M_1(A) = \sigma$ و واریانس، $var_1(A) = \sigma^2$. پس میانگین شدت مساوی σ است. مطابق [۱۸، ۱۹]، اندازه‌گیری شدت اطلاعاتی درباره ضریب متوسط بازپراکنش^۴ مربوط به هر سلول زمینی را با خود حمل می‌کند. از این رو، برای کاربردهای مشخص علاقه‌مند به استخراج پارامتر σ به عنوان اطلاعات واقعی از سیستم SAR تک‌کاناله هستیم. این پارامتر می‌تواند به عنوان

می‌شود که در مقایسه با فیلترهای متداول تاثیر بصری و کمی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن چهار زیر-پنجره برای پنجره متحرک مناطق همگن به خوبی فیلتر شدند بدون اینکه لبه‌ها تار شوند و جزئیات از دست رود.

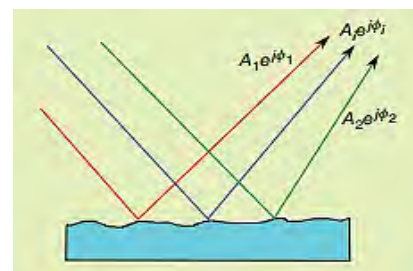
سایر قسمت‌های مقاله: بخش دوم مروری بر مدل نویز اسپکل می‌باشد، بخش سوم به معرفی فیلترهای متداول کاهش نویز اختصاص دارد، بخش چهارم به معرفی مبانی فیلتر پیشنهادی می‌پردازد، بخش پنجم شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی فیلترها را توضیح می‌دهد، بخش ششم به پیاده سازی و ارزیابی نتایج و در بخش آخر، نتیجه‌گیری انجام شده از تحقیق ارائه شده است.

۲- مدل نویز اسپکل

مطابق شکل ۱ در یک سنجنده SAR هر یک از سیگنال‌های دریافتی، مربوط به منطقه‌ی کوچکی است که آن را سلول زمینی^۱ می‌نامیم. اگر فرض کنیم هر سلول زمینی شامل تعدادی تارگت گسسته باشد سیگنال دریافتی می‌تواند به صورت مجموع هم‌دوس از چندین موج پراکنشی دیده شود [۱۷]، یعنی:

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

که A دامنه و ϕ فاز سیگنال دریافتی است.



شکل ۱- مدل پراکنشی اسپکل [۱]

هر یک از دامنه‌های A_k و فازهای ϕ_k قابل مشاهده نیستند زیرا آنها مربوط به پراکنش‌های منفرد در داخل سلول زمینی هستند (شکل ۲) لذا طبیعتاً تعداد زیادی از چنین پراکنش‌هایی در هر سلول رادار وجود دارند. دامنه A_k و فاز ϕ_k به چندین فاکتور از جمله میرایی انتشار

^۲ probability density function (PDF)

^۳ Rayleigh pdf

^۴ average backscattering coefficient

^۱ ground cell

مشکل معمولاً از پنجره های کرنل با ابعاد 3×3 یا 5×5 استفاده می شود [۲۱].

۲-۳- فیلتر Lee

در این فیلتر اگر وریانس در یک منطقه بالا باشد (نزدیک لبه‌ها) هموار کردن اعمال نخواهد شد، و اگر وریانس در یک منطقه پایین یا ثابت باشد هموار کردن اعمال می‌شود. فیلتر لی بر اساس مدل نویز اسپکل ضرب‌شونده است. این فیلتر از فرض توزیع گوسی برای نویز در تصویر SAR استفاده می‌کند. ابتدا تصویر SAR را با یک مدل خطی تقریب زده و سپس خطای میانگین کمترین مربعات به آن اعمال می‌شود [۲۲].

۳-۳- فیلتر Kuan

در روشی که توسط کوان ارائه شده مدل نویز ضرب‌شونده ابتدا به مدل نویز افزایشی مستقل از سیگنال تبدیل می‌شود. سپس شرایط MMSE به این مدل اعمال می‌شود. معادله فیلتر همانند فیلتر لی است اما با تابع وزن متفاوت [۲۳].

۴-۳- فیلتر Frost

فیلتر فراست [۱۰] نسبت به فیلترهای لی و کوان متمایز است از این لحاظ که بازتاب حاصله از سطح، با کانون‌لش تصویر مشاهده شده و پاسخ ضربه سیستم SAR تخمین زده می‌شود. فیلتر حاصله بعد از برخی ساده سازی‌ها می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$m(t) = e^{-K C_I^2(t_0)|t|} \quad (9)$$

۵-۳- فیلترهای Enhanced Lee

مطابق لوپز [۷] در این فیلتر تصویر به سه کلاس تقسیم می‌شود. اولین کلاس مربوط به مناطق همگن است که اسپکل به سادگی با اعمال یک فیلتر پایین‌گذر حذف می‌شود. دومین کلاس مربوط به مناطق ناهمگن است که اسپکل در حین حفظ بافت می‌بایست کاهش یابد. و سومین کلاس مربوط به اهداف نقطه‌ای منفرد است که در این مورد، فیلتر می‌بایست مقدار مشاهداتی را حفظ کند.

ضریب بازپراکنش راداری^۱ یک سلول مشاهداتی در نظر گرفته شود. pdf سیگنال دریافتی می‌تواند به صورت زیر فرموله شود:

$$P_{I|\sigma}(I|\sigma) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{I}{\sigma}} \quad (5)$$

یا:

$$I = \sigma u \quad (6)$$

به طوری که u دارای توزیع نمایی است:

$$P_u(u) = e^{-u} \quad (7)$$

رابطه ۶ مدل ضربی اسپکل نامیده می‌شود. شدت تصاویر SAR در حالت چند-دید می‌شود:

$$I_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_1(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i)^2 + y(i)^2) \quad (8)$$

به طوری که $x(i)$ و $y(i)$ قسمت‌های حقیقی و موهومی i امین دید می‌باشند. از این رو $x(i)$ و $y(i)$ مستقلاً از توزیع گوسی پیروی می‌کنند. بسیار واضح است که NI_N دارای توزیع کای-اسکویر^۲ با درجه آزادی $2N$ می‌باشد [۲۰]. دامنه برای حالت N -دید از معادله (۸) \sqrt{NI} می‌شود که دارای توزیع کای^۳ با درجه آزادی $2N$ می‌باشد.

۳- فیلترهای متداول کاهش اسپکل

در این بخش ابتدا مروری بر فیلترهای متداول مورد استفاده در تصاویر تک‌کاناله خواهیم پرداخت و سپس فیلتر پیشنهادی این مقاله را ارائه می‌شود.

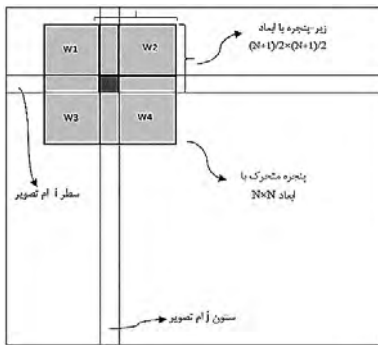
۱-۳- فیلتر میانگین (Box Filter)

فیلتر میانگین یک فیلتر متوسط‌گیری ساده است که پیکسل مرکزی را با مقدار میانگین پیکسل‌ها در یک پنجره جایگزین می‌کند. این فیلتر توانایی خوبی در هموار کردن نویز دارد. با این وجود، یکسان برخورد کردن عمل متوسط‌گیری باعث می‌شود که یک کاهش رزولوشن در اطراف لبه‌های تیز داشته باشیم. برای کم کردن این

^۱ radar cross section (RCS)

^۲ chi square distribution

^۳ chi distribution



شکل ۳- نمایش پنجره متحرک و زیر-پنجره‌های آن در یک تصویر SAR

برای یک پنجره متحرک با ابعاد $N \times N$ ، تعداد کل پیکسل‌های هر زیر-پنجره $(N+1) \times (N+1)/4$ است. هدف پارتیشن بندی، تلاش برای جستجو کردن و خارج کردن مناطقی می‌باشد که احتمالاً شامل جزئیات یا لبه‌ها است، که خروجی آن حفظ جزئیات و لبه‌ها در حین فرایند فیلتر کردن می‌باشد. انحراف معیار نسبی هر زیر-پنجره طبق رابطه ۲۷ محاسبه می‌شود $C_x(w(i)) (i = 1, \dots, 4)$.

$$C_x(w(i)) = \frac{\sqrt{\text{var}(i)}}{\bar{I}(i)}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (10)$$

در اینجا به جای یک پنجره و یک مقدار، دارای چهار زیر-پنجره کوچک‌تر و چهار مقدار برای مقایسه هستیم. اگر هر چهار زیر-پنجره در مناطق همگن قرار داشته باشند و لبه یا هدف نقطه‌ای در آنها قرار نداشته باشد فیلتر میانگین را به عنوان بهترین برآوردکننده به کل پنجره اعمال می‌کنیم. فیلتر میانگین در هموار کردن خوب است و زمانی که پنجره فیلتر بزرگ باشد، عملکرد همواری بهتر دارد. اگر تمام زیر-پنجره‌ها به نوعی دارای لبه یا هر اطلاعاتی باشد که از فرکانس بالا برخوردار باشد، می‌بایست اندازه پنجره را کاهش و جستجو را ادامه داده تا بتوانیم مناطقی را با پنجره جدید برای فیلتر کردن خارج کنیم، و این برای حفظ اطلاعات بافت و لبه نیز می‌باشد.

برای تصمیم‌گیری در موقعیت‌های بالا نیاز به تعریف حدآستانه است. طبق لی و پوتیر [۲۳] مقدار ضریب تغییر نویز اسپکل برای شدت تصویر SAR از رابطه $\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{N}}$ (تعداد دیدها) به دست می‌آید. اگر انحراف معیار نسبی زیر-پنجره‌ها از σ_u کمتر باشد یعنی منطقه همگن است اما اگر بزرگتر از مقدار گفته شده باشد نشان‌دهنده وجود عارضه‌ای با فرکانس بالا مانند لبه است. برای انتخاب یا خارج کردن زیر-پنجره‌ای که احتمالاً از منطقه ناهمگن تشکیل شده

با مقایسه این فیلتر بهبودیافته با فیلتر لی، می‌توان مشاهده کرد که در دو کلاس منطقه همگن و کلاس هدف نقطه‌ای منفرد، خروجی مجبور است به ترتیب مساوی مقدار میانگین و مقدار مشاهداتی بدون اعمال فیلتر باشد.

۳-۶- فیلتر Gamma-Map

کوان [۲۳] بر مبنای بیشینه سازی احتمال پسین^۱ فیلتر مپ را با در نظر گرفتن اینکه تغییرات شدت تصاویر SAR از توزیع گوسی پیروی می‌کند ارائه داد. لویز [۱۱] فیلتر مپ را با فرض اینکه تصویر از توزیع گاما پیروی می‌کند و با انتخاب دو حد آستانه بهبود داد و فیلتر گاما-مپ را ارائه داد.

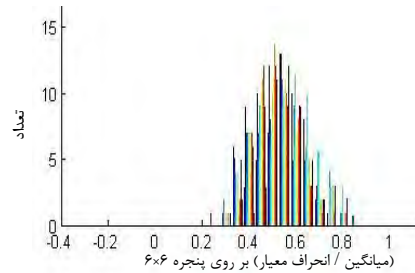
۴- الگوریتم پیشنهادی کاهش نویز

قاعده‌ی اصلی در فیلتر کردن اسپکل، انتخاب پیکسل‌ها از مناطق همگن می‌باشد. برای مناطق همگن که لبه یا هدف نقطه‌ای نداریم مقدار حاصل از عمل میانگین‌گیری از پیکسل‌های همسایه‌ی پیکسل مرکزی بهترین تخمین بدون خطا از مقدار اصلی می‌باشد. برای مناطق غیرهمگن باید دقت بیشتری در عمل فیلتر نمودن داشت چون علاوه بر نویز که باید هموار شود، لبه‌ها، بافت‌ها و اهداف نقطه‌ای نیز وجود دارند که می‌بایست حفظ شوند. در این الگوریتم ابتدا مناطقی که تصور می‌شود در آنها اطلاعاتی با فرکانس بالا مانند لبه‌ها حضور دارند خارج و باقی مناطق را ادغام می‌کنیم و این قدم اول در حفظ لبه می‌باشد. سپس بر اساس آنالیز الگوریتم‌های موجود، از فیلتر لی بهبودیافته، که در بخش قبل به توضیح آن پرداخته شد، استفاده می‌کنیم. مشابه فیلترهای قبلی از یک پنجره متحرک برای ارزیابی کاهش نویز استفاده می‌شود با این تفاوت که پنجره متحرک را که بر روی هر پیکسل توقف می‌نماید را به چهار زیر-پنجره $w(i) (i=1,2,3,4)$ تقسیم می‌نماییم (مطابق شکل ۳).

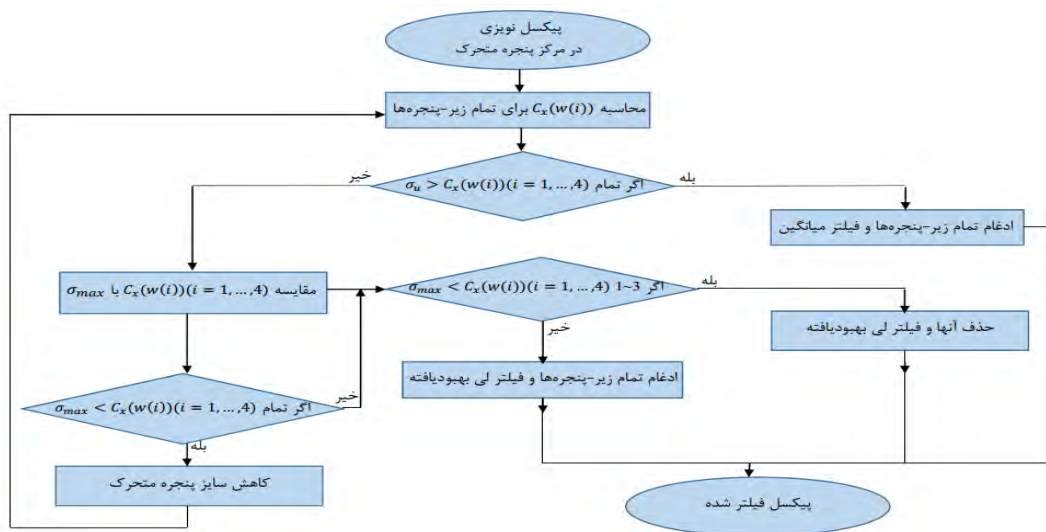
^۱ maximizing a posteriori (MAP)

شکل ۴ توزیع حاصل از مقادیر انحراف معیار نسبی بر پنجره متحرک ۶×۶، برای یک منطقه همگن در تصویر را نمایش می‌دهد. هر چقدر مقادیر انحراف معیار نسبی به عدد σ_{max} نزدیک باشد نشان‌دهنده آن است که پیکسل فوق در محدوده عوارض خطی یا لبه‌ها یا اهداف نقطه‌ای قرار دارد. اگر انحراف معیار نسبی تمام چهار همسایگی بزرگتر از σ_{max} باشند، اندازه پنجره را کاهش می‌دهیم. اما اگر یک یا دو و یا سه زیر-پنجره دارای انحراف معیار نسبی بزرگتر از σ_{max} باشد. آن زیر-پنجره(ها) را از پنجره متحرک خارج می‌کنیم و فیلتر لی بهبودیافته را بر آن اعمال می‌کنیم. روند الگوریتم پیشنهادی را می‌توان در شکل ۵ مشاهده نمود.

است باید حدآستانه بالا σ_{max} تعریف شود. مانند ضریب تغییر نویز به آسانی تعیین نمی‌شود. در واقع از لحاظ تئوری هیچ حدآستانه برای σ_{max} وجود ندارد. اگر مقدار σ_{max} بسیار بزرگ انتخاب شود اطلاعات بافت از دست می‌رود. طریقه محاسبه σ_{max} در این مقاله به این صورت است که انحراف معیار نسبی را در داخل یک منطقه همگن بر روی پنجره متحرک محاسبه می‌کنیم. مقادیر حاصل، از توزیع تابع شبه-گوسی کراندار پیروی می‌کند که بیشترین مقدار در این توزیع σ_{max} است.



شکل ۴- توزیع ضریب تغییر در داخل یک منطقه همگن برای تصویر مورد استفاده



شکل ۵- فلوجارت فیلتر پیشنهادی

خطای کمترین مربعات (MSE) و نسبت سیگنال به نویز (SNR)، استفاده شده است. ابتدا در زیر به اختصار هر یک از شاخص‌های بالا بیان می‌شوند.

۵-۱- شاخص تعداد دیدهای معادل یا ENL

این شاخص با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

۵- شاخص‌های ارزیابی فیلترها

برای ارزیابی کمی عملکرد فیلتر پیشنهادی در این مقاله و مقایسه آن با سایر فیلترهای متداول از شاخص‌های میانگین (M)، انحراف معیار (SD)، شاخص تعداد دیدهای معادل (ENL)، شاخص کاهش اسپکل و حفظ میانگین (SMPI)^۱، شاخص حفظ لبه (ESI)^۲،

ε mean square error (MSE)
σ signal-to-noise ratio (SNR)

^۱ equivalent number of looks (ENL)
^۲ speckle suppression and mean preservation index (SMPI)
^۳ edge save index (ESI)

۵-۵- نسبت سیگنال به نویز یا SNR

نسبت توان سیگنال اصلی به توان نویز را SNR می‌نامیم. هر چه این نسبت بیشتر باشد کیفیت تصویر بهتر خواهد بود.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^K I_i^2}{\sum_{i=1}^K (I_i - \hat{I}_i)^2} \right) \quad (25)$$

۶- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

ابتدا به منظور مقایسه تاثیر کاهش اسپکل در الگوریتم پیشنهادی و برخی از فیلترهای متداول از تصویر شبیه‌سازی شده چهار-دید SAR استفاده شده است و سپس بعد از نمایش مناسب و قابل قبول بر روی تصویر واقعی پیاده سازی نموده‌ایم. بر طبق مدل نویز ضرب‌شونده $I = \sigma \cdot u$ و توزیع گاما، می‌توانیم از لحاظ تئوری تصویر SAR را که برای مقایسه الگوریتم‌های مختلف فیلترینگ استفاده می‌شود، شبیه‌سازی نماییم. در شکل ۶ تصویر بدون نویز و نویزی قابل مشاهده است. در تصویر σ (همان تصویر ایده‌آل در شکل ۶)، پشت زمینه از درجه خاکستری ۳۰ برخوردار است. مربع بالا-چپ درجه خاکستری صفر دارد و درجه خاکستری سایر مربع‌ها به ترتیب ساعت‌گرد ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۹۰ می‌باشند. نتیجه بصری الگوریتم پیشنهادی مناسب است و حفظ ویژگی‌های لبه و اهداف نقطه‌ای و کاهش نویز اسپکل برای این فیلتر از عملکرد رضایت‌بخشی برخوردار است. برای اطمینان از شاخص‌های کمی برای ارزیابی نیز استفاده شده است. در جدول شماره ۱ شاخص‌های گوناگون برای حالت‌های مختلف فیلترینگ متداول و الگوریتم پیشنهادی محاسبه شده است.

$$ENL = \left(\frac{MeanUniformArea}{SDUniformArea} \right)^2 \quad (21)$$

که SD همان انحراف معیار است. برای محاسبه ENL می‌بایست یک منطقه همگن انتخاب شود. مقدار بالاتر ENL برای یک فیلتر نشان‌دهنده کارایی بهتر فیلتر است.

۵-۲- شاخص کاهش اسپکل و حفظ میانگین یا SMPI

شاخص ENL زمانی که فیلتر مقدار میانگین را زیاد برآورد نماید قابل اعتماد نیست [۲۵] از این رو شاخص کاهش اسپکل و حفظ میانگین استفاده می‌شود. معادله این شاخص در [۲۵] بیان شده است.

۵-۳- شاخص حفظ لبه یا ESI

ESI توانایی حفظ لبه را در جهت افقی (ESI_H) و جهت قائم (ESI_V) رابطه ESI به صورت زیر است:

$$ESI_K = \frac{\sum_{i=1}^K |DN_{R_1} - DN_{R_2}|_{filter}}{\sum_{i=1}^K |DN_{R_1} - DN_{R_2}|_{original}} \quad (23)$$

به طوری که K تعداد پیکسلها در طول لبه افقی (یا لبه قائم)، R_1 و R_2 مناطقی در دو سوی لبه هستند. $ESI=1$ برای حفظ لبه در داده خام، <1 برای لبه‌ای که محو می‌شود و >1 برای لبه‌ای که بهبود می‌یابد در نظر گرفته می‌شود.

۵-۴- خطای کمترین مربعات یا MSE

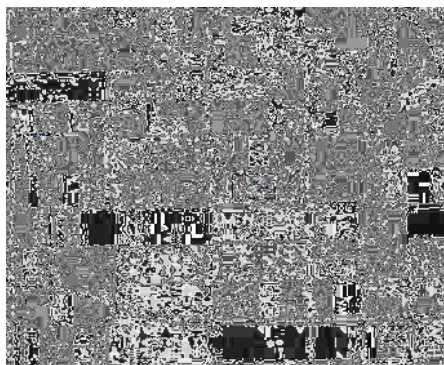
MSE بین دو تصویر نویزی (I) و فیلتر شده (\hat{I}) که هر کدام دارای K پیکسل اند از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$MSE = K^{-1} \sum_{i=1}^K (I_i - \hat{I}_i)^2 \quad (24)$$

جدول ۱- ارزیابی کمی الگوریتم پیشنهادی و سایر فیلترها بر تصویر شبیه‌سازی شده SAR

	M	SD	MSE	SNR	SMPI	ENL
تصویر ایده‌آل	۴۱٫۸۷	--	--	--	--	--
تصویر شبیه‌سازی	۴۱٫۹۶	۴۲٫۹۶	۸۳۷٫۴۵	۷٫۰۱	۰٫۸۸	۴٫۱۰
میانگین	۴۱٫۸۸	۳۷٫۱۷	۹۸۱٫۷۱	۶٫۳۲	۰٫۸۲	۱۹۷٫۹۲
کوان	۴۱٫۸۳	۴۱٫۶۴	۱۰۰۷٫۵۵	۶٫۲۱	۰٫۹۵۲	۱۲۵٫۸۳
گاما-مپ	۴۰٫۶۸	۳۷٫۷۱	۸۴۳٫۸۴	۶٫۹۸	۱٫۷۴	۱۱۶٫۱۰
لی بهبودیافته	۴۱٫۸۱	۴۱٫۴۷	۷۹۲٫۱۹	۷٫۹۷	۰٫۹۷	۱۴۷٫۵۹
الگوریتم پیشنهادی	۴۱٫۷۱	۳۹٫۵۳	۷۷۳٫۵۱	۷٫۳۶	۱٫۰۰	۱۹۲٫۵۹

به منطقه جنگلی همگن Flevoland واقع در هلند (شکل ۷) و تصویر دوم، از سنجنده ESAR، مربوطه به منطقه Oberpfaffenhofen واقع در آلمان (شکل ۱۱) است.

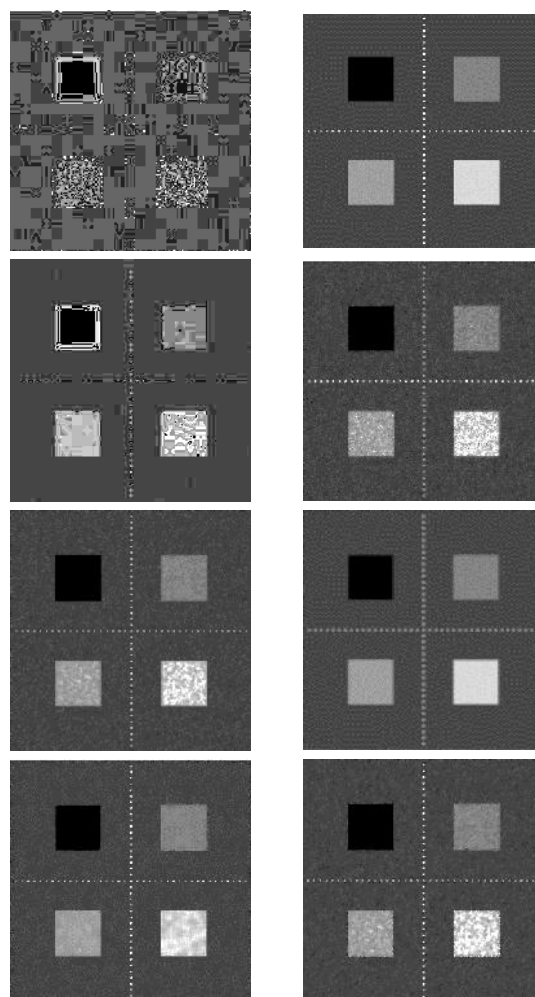


شکل ۷- نمایش بخشی از تصویر از منطقه Flevoland دو منطقه همگن در تصویر انتخاب شده تا شاخص‌های مختلف در این دو منطقه محاسبه شود

تصاویر اول و دوم تصاویر شدت در پلاریزاسیون HH می‌باشند که توسط ماتریس کوواریانس این تصاویر بدست می‌آیند. ابتدا تصویر اول را بررسی می‌کنیم. فیلترهایی که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفتند را به کل تصویر SAR اعمال می‌کنیم. دو ناحیه همگن را در تصویر فوق مطابق شکل ۷ (ناحیه ۱ و ناحیه ۲) انتخاب می‌کنیم تا ارزیابی کمی بوسیله شاخص‌های گفته شده را در آنها به دست بیاوریم. این ناحیه‌های همگن از توزیع شدت یکنواختی در تمام مکان‌ها در سرتاسر ناحیه برخوردارند. اگر چه این نواحی با سطح توزیع شدت، یکنواخت به نظر می‌رسند اما همه پیکسل‌ها در آنها از مقدار یکسانی برخوردار نیستند. نواحی همگن برای ارزیابی در نظر گرفته شده است زیرا اگر الگوریتم در ناحیه همگن به طور موثری قابل قبول باشد در کل تصویر نیز می‌تواند به طور موثری اسپیکل را فیلتر نماید.

شاخص‌های میانگین، انحراف معیار، MSE، SNR، SMPI، ENL و برای نواحی همگن ۱ و ۲ محاسبه شده و در جداول سه و پنج قابل مشاهده است. مشاهده مقادیر ENL برای فیلترهای مختلف در جداول ۳، ۵ و شکل ۹ حاکی از این است که فیلتر میانگین در حذف اسپیکل خیلی خوب عمل می‌کند و هر چه اندازه پنجره بزرگتر باشد، به طور موثرتری نویز را حذف می‌کند، اما اشکال بزرگ آن مطابق شکل ۱۴ و تصویر فیلترشده با این روش که در شکل ۶، ۱۰ و ۱۱ می‌توان مشاهده کرد، نامشخص کردن لبه‌ها و از بین بردن اطلاعات بافت تصویر است. فیلتر کوان نسبتاً از فیلتر لی بهتر عمل کرده. در فیلتر لی بهبودیافته هرچه فاکتور تعدیل یا k بزرگ‌تر می‌شود، قابلیت هموارکنندگی

در چند مورد می‌توان به کارا بودن فیلتر پیشنهادی اشاره کرد مثلاً در حذف میانگین با مقدار ۴۱،۷۱ به مقدار میانگین تصویر ایده‌آل (با مقدار ۴۱،۸۷) بسیار نزدیک است، البته فیلتر لی بهبودیافته در این مورد پیش‌تاز است. نکته برجسته دیگر در مورد عملکرد فیلتر پیشنهادی، می‌توان به هموارکنندگی اسپیکل آن اشاره کرد. بسیار واضح است که دو شاخص انحراف معیار و ENL برای فیلتر پیشنهادی (۳۹،۵۳ و ۱۹۲،۵۹) در مقایسه با سایر فیلترها دارای مقادیر مطلوبی می‌باشد. در ادامه الگوریتم پیشنهادی را همراه با سایر فیلترهای متداول بر روی تصویر واقعی SAR پیاده‌سازی و نتایج آن را بررسی می‌کنیم.



شکل ۶- نتایج فیلترهای مختلف بر روی تصویر شبیه‌سازی شده. به ترتیب از راست به چپ و از بالا به پایین: تصویر ایده‌آل، تصویر شبیه‌سازی شده SAR؛ کوان، لی؛ میانگین، گاما-مپ؛ لی بهبودیافته، الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله از دو دیتاست SAR مربوط به دو سنجنده هوابرد مختلف از دو منطقه متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. تصویر اول، از سنجنده AirSAR، مربوط

برای لبه افقی و قائم نیز ترسیم شده است (شکل ۱۴). در این نمودارها محور افقی شماره پیکسل و محور عمودی اختلاف درجه روشنایی در دو سوی لبه است. با ملاحظه این نمودارها نیز می توان تاثیر فیلترهای مختلف را بر بهبود یا تاری لبه های تصویر مشاهده نمود.

در مورد شاخص MSE که مقادیر آنها برای فیلترهای مختلف در جداول ۳ و ۵ و شکل ۱۳ برای دو ناحیه همگن نمایش داده شده، الگوریتم پیشنهادی بعد از فیلتر گاما-مپ دارای کمترین مقدار برای این شاخص می باشد، که نشان از عملکرد بهتر نسبت به سایر فیلترها می باشد. شاخص SMPI حاکی از حفظ میانگین تصویر و در عین حال کاهش مطلوب نویز است. این شاخص برای الگوریتم پیشنهادی کمترین مقدار را داراست که نشانگر عملکرد خوب فیلتر در کاهش نویز و همزمان حفظ مقدار میانگین تصویر می باشد. در مرتبه بعدی فیلترهای میانگین (با پنجره بزرگتر) و گاما-مپ قرار دارند.

تصویر دوم را از دو جنبه مهم کاهش نویز و حفظ لبه ها بررسی می کنیم. همانطور که در موارد قبلی و در جداول ۱، ۳ و ۵ می توان دید. فیلتر میانگین در کاهش نویز اسپکل در مناطق همگن بسیار خوب است اما به دلیل از بین بردن لبه ها باعث از دست رفتن جزئیات و کاهش رزولوشن تصویر می شود. فیلتر لی بهبود یافته نیز فیلتری مناسب برای حفظ جزئیات و بافت تصویر و در عین حال حذف نویز می باشد (مطابق جدول ۲). بنابراین برای بررسی فیلتر پیشنهادی از دو جنبه کاهش نویز و حفظ لبه دو فیلتر میانگین و لی بهبود یافته، به ترتیب مناسبند. در شکل ۱۱ سطر اول به ترتیب تصویر SAR و تصاویر فیلتر شده با فیلترهای میانگین و لی بهبود یافته و الگوریتم پیشنهادی قرار داده شده و یک منطقه همگن مطابق شکل ۱۱ (در گوشه راست و پایین تصویر) از تصویر انتخاب شد تا مقدار ENL برای تصویر اصلی و تصاویر فیلتر شده محاسبه شود. مقادیر محاسبه شده در جدول ۴ قرار دارد که نشان دهنده عملکرد رضایت بخش الگوریتم پیشنهادی در کاهش نویز می باشد به طوری که مقدار آن نزدیک مقدار فیلتر میانگین است.

در سطر دوم و سوم شکل ۱۱ به ترتیب به موضوعات لبه و تارگت های نقطه ای می پردازد. با بزرگنمایی قسمتی از تصویر که شامل لبه ها بود به بررسی دقیق تر رفتار فیلتر پیشنهادی با لبه ها پرداخته شد. همان طور که در سطر دوم نشان داده شده فیلتر پیشنهادی لبه ها را بهتر از فیلتر لی بهبود یافته حفظ می کند و حتی در بعضی مواقع بارز می نماید. قسمتی دیگر از

فیلتر کاهش می یابد. مثلاً زمانی $k=0.1$ باشد عملکرد فیلتر لی بهبود یافته در حذف نویز مانند فیلتر میانگین می تواند باشد. ما در این مقاله از فاکتور $k=0.4$ استفاده نموده ایم و عملکرد خوبی در حذف نویز نسبت به کوان و لی داشته و نسبتاً لبه ها بهتر حفظ شده است. کارکرد فیلتر فراست هم مانند فیلتر لی بهبود یافته است، یعنی برای مقادیر کوچکتر K عملکرد فیلتر بهتر است. با این وجود قابلیت هموارکنندگی فیلتر سریع کاهش می یابد. این را زمانی که $K=1$ می توان دید، که ENL خیلی کوچک می شود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای کاهش نویز نیز قابل قبول است و بدون در نظر گرفتن فیلتر میانگین بالاترین مقدار ENL (چه در ناحیه یک که $ENL=17.22$ و چه برای ناحیه دو که $ENL=21.92$) را در بین سایر فیلترها دارد که نشان از کاهش نویز بهتر نسبت به سایر فیلترها است.

شاخص SNR همان طور که در جداول ۳ و ۶ و شکل ۹ برای فیلترهای گوناگون به نمایش گذاشته شده است، برای الگوریتم پیشنهادی در ناحیه یک بعد از فیلتر گاما-مپ در رتبه دوم قرار دارد و برای ناحیه دو بعد از گاما-مپ و لی بهبود یافته در رتبه سوم قرار دارد. این شاخص حاکی از تاثیر فیلتر کاهش اسپکل بر کیفیت تصویر می باشد. فیلتر میانگین با اندازه پنجره 7×7 پایین ترین مقدار SNR را داراست. در مرتبه پایین تر فیلترهای لی و کوان قرار دارند و سپس فیلتر فراست.

برای ارزیابی بهبود یا حفظ لبه از شاخص ESI استفاده نموده ایم و این شاخص را یک بار برای یک لبه افقی و یک بار برای یک لبه قائم محاسبه کرده ایم و نتایج آن در شکل ۸ و جداول ۲ نشان داده شده است. هر چقدر مقدار ESI بالاتر باشد نشان دهنده نتایج بهتری در حفظ لبه برای آن فیلتر نسبت به سایر فیلترها است. الگوریتم جدید با داشتن $ESI_H=0.897$ برای لبه افقی و $ESI_V=1.603$ برای لبه قائم بالاترین مقدار شاخص حفظ لبه را در میان فیلترهای دیگر داراست و می توان گفت حفظ لبه در آن بسیار خوب بوده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد برای ناحیه یک، بعد از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب فیلترهای لی بهبود یافته و لی و سپس فیلترهای کوان و گاما-مپ قرار دارند و برای ناحیه دو هم به ترتیب فیلترهای لی بهبود یافته، لی، گاما-مپ و فراست قرار دارند. بدترین نتیجه نیز به فیلتر میانگین با ابعاد 7×7 مربوط می باشد. علاوه بر شاخص حفظ لبه، اختلاف شدت پیکسل های دو سوی لبه

اهداف موفق بوده‌اند. برای فیلتر پیشنهادی مشاهده می‌شود که اطراف اهداف نقطه‌ای نیز، بدون آنکه به کیفیت اهداف آسیبی وارد آید، عمل کاهش نویز انجام شده است.

تصویر برای چگونگی برخورد با تارگت‌های نقطه‌ای بزرگنمایی شده است. فیلتر میانگین که به طور کامل اهداف مورد نظر را تار نموده. دو فیلتر لی بهبود یافته و پیشنهادی در حفظ این

جدول ۲- مقدار شاخص ESI برای لبه افقی (H) و قائم (V) برای فیلترهای مختلف

	میانگین ۵×۵	میانگین ۷×۷	کوان	لی	گاما-مپ	لی بهبود یافته	الگوریتم پیشنهادی	فراست
ESI_H	۰.۶۰۳۲	۰.۴۶۵۴	۰.۶۹۲۸	۰.۷۵۴۲	۰.۶۳۲۴	۰.۷۸۶۸	۰.۸۹۷۳	۰.۶۲۵۱
ESI_V	۰.۶۵۳۸	۰.۳۹۹۲	۰.۷۸۱۵	۰.۸۸۴۸	۰.۸۰۴۸	۰.۹۸۷۴	۱.۶۰۳۴	۰.۵۰۷۹

جدول ۳- عملکرد فیلترها برای ناحیه ۱ از منطقه Flevoland

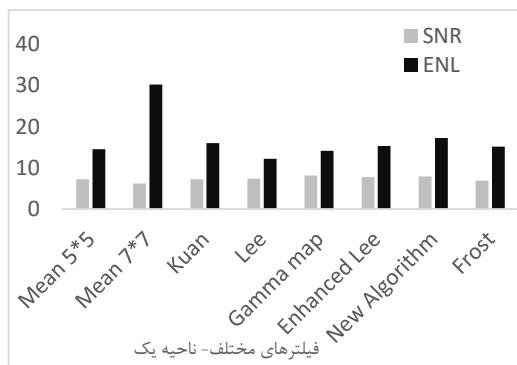
	M ($\times 10^{-3}$)	SD ($\times 10^{-5}$)	MSE ($\times 10^{-6}$)	SNR	SMPI ($\times 10^{-2}$)	ENL
تصویر نویز	۲۰.۷۱	۱۲.۲۴	--	--	--	--
میانگین (۵×۵)	۲۰.۳۹	۵.۳۵	۱۰۹.۶۲	۷.۲۲	۴۳.۷۳	۱۴.۵۳
میانگین (۷×۷)	۱۹.۸۸	۳.۶۲	۱۳۸.۳۱	۶.۲۱	۳۹.۶۱	۳۰.۱۸
کوان	۲۰.۱۱	۵.۰۴	۱۰۹.۵۴	۷.۲۳	۴۱.۱۸	۱۵.۹۶
لی	۲۰.۱۸	۵.۷۸	۱۰۶.۵۳	۷.۳۵	۴۷.۲۷	۱۲.۱۸
گاما-مپ	۱۸.۹۱	۵.۰۴	۸۸.۹۹	۸.۱۳	۴۱.۲۵	۱۴.۰۹
لی بهبود یافته	۲۰.۱۸	۵.۱۶	۹۶.۰۲	۷.۸۰	۴۲.۱۶	۱۵.۳۰
الگوریتم پیشنهادی	۱۹.۹۹	۴.۸۲	۹۳.۵۹	۷.۹۱	۳۹.۰۳	۱۷.۲۲
فراست	۲۰.۰۴	۲.۰۷	۱۱۸.۹۱	۶.۸۷	۴۰.۹۸	۱۵.۱۶

جدول ۴- بررسی کاهش نویز برای تصویر SAR از منطقه Oberpfaffenhofen

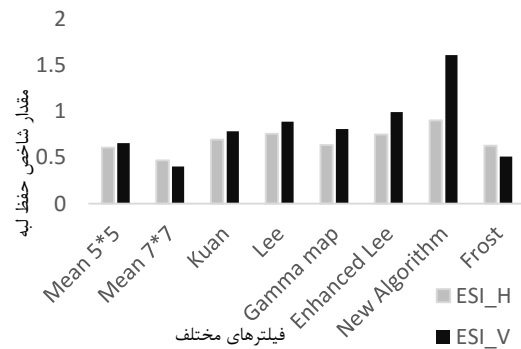
	میانگین	لی بهبود یافته	الگوریتم پیشنهادی
ENL	۵۴.۹۳	۳۶.۶۷	۵۲.۲۵

جدول ۵- عملکرد فیلترها برای ناحیه ۲ از منطقه Flevoland

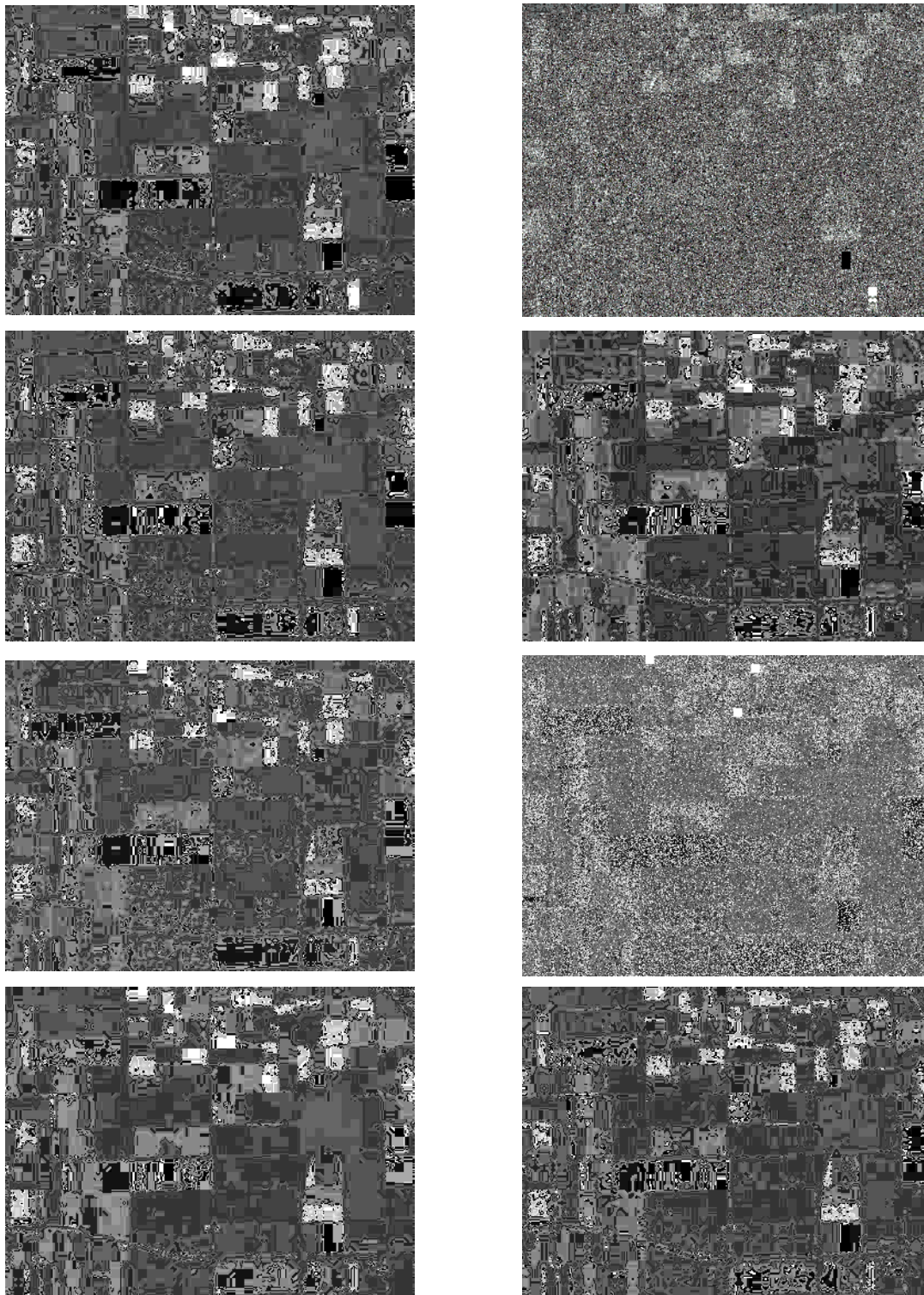
	M ($\times 10^{-3}$)	SD ($\times 10^{-5}$)	MSE ($\times 10^{-6}$)	SNR	SMPI ($\times 10^{-2}$)	ENL
تصویر نویز	۷.۷۸	۴.۷۸	--	--	--	--
میانگین (۵×۵)	۷.۷۸	۲.۳۳	۱۵۵.۵۴	۷.۳۹	۴۸.۷۵	۱۱.۱۶
میانگین (۷×۷)	۷.۸۰	۱.۶۸	۱۹۵.۴۰	۶.۳۰	۳۵.۲۶	۲۱.۴۴
کوان	۷.۷۸	۲.۱۰	۱۶۵.۷۱	۷.۰۱	۴۳.۹۳	۱۳.۷۳
لی	۷.۷۷	۲.۳۲	۱۶۳.۱۱	۷.۰۸	۴۸.۵۱	۱۱.۲۴
گاما-مپ	۷.۳۸	۲.۰۷	۱۳۰.۷۴	۸.۰۴	۴۳.۲۵	۱۲.۷۶
لی بهبود یافته	۷.۷۹	۲.۱۵	۱۵۵.۴۱	۷.۴۹	۴۴.۹۶	۱۳.۱۵
الگوریتم پیشنهادی	۷.۸۱	۱.۶۷	۱۴۸.۶۴	۷.۲۹	۳۵.۰۴	۲۱.۹۲
فراست	۷.۷۹	۲.۰۶	۱۷۰.۸۳	۶.۸۹	۴۳.۳۹	۱۴.۲۲



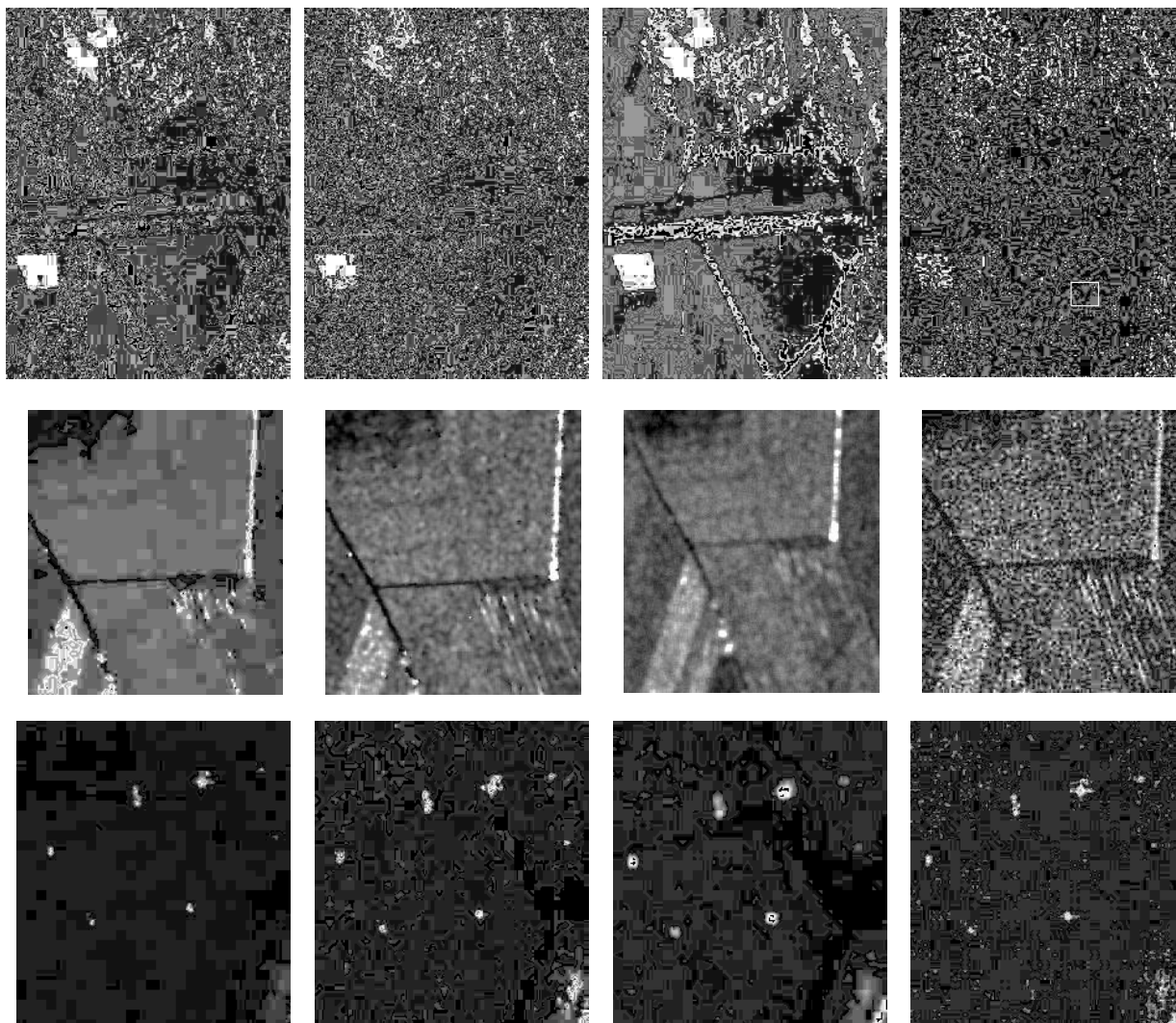
شکل ۹- نمایش نموداری شاخص‌های ENL و SNR برای ناحیه ۱



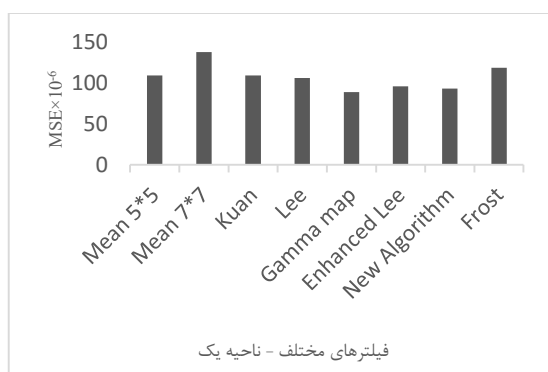
شکل ۸- نمایش عملکرد فیلترها در میزان حفظ لبه‌ها برای لبه افقی و قائم



شکل ۱۰- نتایج فیلترهای مختلف برای تصویر SAR از منطقه Flevoland. به ترتیب از راست به چپ و از بالا به پایین: تصویر واقعی SAR، تصویر فیلتر شده با فیلتر میانگین؛ تصویر فیلتر شده با لی، تصویر فیلتر شده با کوان؛ تصویر فیلتر شده با فراست، تصویر فیلتر شده با گاما-مپ؛ تصویر فیلتر شده با لی بهبودیافته، تصویر فیلتر شده با الگوریتم پیشنهادی



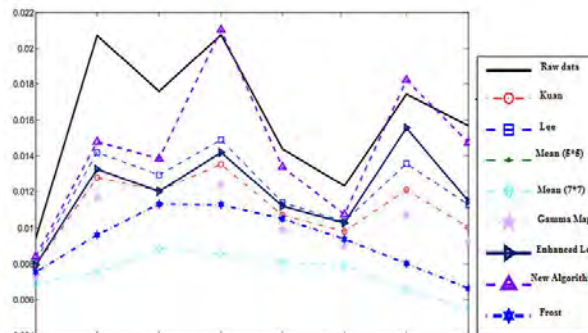
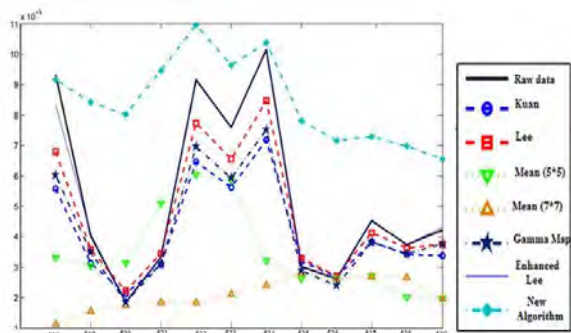
شکل ۱۱- سطر اول به ترتیب: تصویر SAR مربوط به منطقه Oberpfaffenhofen، تصویر فیلترشده با میانگین، تصویر فیلترشده با لی بهبودیافته و تصویر فیلترشده با لگوریتم پیشنهادی. سطر دوم مربوط به بررسی رفتار الگوریتم پیشنهادی بر کیفیت لبه می‌باشد که اندکس تصویرها مطابق سطر اول است. سطر سوم مربوط به بررسی رفتار الگوریتم پیشنهادی بر اهداف نقطه‌ای می‌باشد که اندکس آن مانند سطر اول است.



شکل ۱۳- نمایش نموداری شاخص MSE برای ناحیه ۱



شکل ۱۲- نمایش نموداری شاخص SMPI برای ناحیه ۱



شکل ۱۴- نمایش نموداری حفظ لبه برای لبه افقی (راست) و لبه قائم (چپ)

۷- نتیجه گیری

یکی از شرایطی که فیلترهای ایده آل ملزم به رعایت آن هستند عدم فیلتر نمودن اهداف نقطه‌ای و فیلتر نمودن با احتیاط پیکسل‌های لبه یا مرز می‌باشد به طوری که مرزها و خطوط پس از فیلترینگ قابل تشخیص و غیر تار باشند و به سبب آن جزئیات حفظ شود. شاخص ESI برای بررسی کیفیت لبه افقی و قائم در این مقاله استفاده شد. این مقدار برای تصویر اول برای لبه افقی و قائم به ترتیب ۰,۸۹۷۳ و ۱,۶۰۳۴ می‌باشد که نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی در حفظ لبه افقی و لبه قائم موفق‌تر از سایر فیلترها عمل می‌کند. در تصویر دوم نیز با بزرگنمایی قسمتی از تصویر که شامل لبه بود به طور کیفی کیفیت لبه بررسی شد که آن نیز تاییدکننده حفظ خوب لبه توسط الگوریتم پیشنهادی بود.

مورد بررسی دیگر در این مقاله عدم فیلتر نمودن اهداف نقطه‌ای بود. با بررسی قسمتی از تصویر دوم که شامل اهداف نقطه‌ای می‌شد تصاویر نشان داد که اهداف نقطه‌ای بدون تاثیرپذیری از فیلتر پیشنهادی محفوظ مانده‌اند. دو فیلتر لی بهبودیافته و فیلتر پیشنهادی در حفظ اهداف نقطه‌ای عملکرد رضایت‌بخشی داشتند و فیلتر میانگین باعث تار کردن آنها شد. همچنین فیلتر پیشنهادی در کاهش نویز در اطراف اهداف نقطه‌ای موثر بود.

در این مقاله یک الگوریتم کاهش نویز اسپکل روی تصاویر تک‌کاناله SAR بر پایه انحراف معیار نسبی زیربنجره‌های یک پنجره متحرک مطرح و مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا یک تصویر ایده آل را با توجه به آماره‌ی توزیع گاما در قالب تصویر SAR چهار-دید شبیه‌سازی و الگوریتم پیشنهادی و سایر فیلترها که در بخش سه معرفی شدند را ابتدا بر تصویر شبیه‌سازی شده اعمال نمودیم. نتایج به دست آمده از شاخص‌ها برای الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر فیلترها به صورت کیفی و کمی قابل قبول بود. سپس فیلترهای فوق را بر دو تصویر متفاوت SAR واقعی اعمال و شاخص‌های کمی برای تصاویر فیلترشده را محاسبه نمودیم. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب فیلتر پیشنهادی نسبت به سایر فیلترهای متداول کاهش اسپکل مانند لی، کوان و لی بهبودیافته بود. به عنوان مثال کمیت‌های ENL و SNR به ترتیب برای برای ناحیه ۱ از تصویر اول ۱۷,۲۲ و ۷,۹۱ بود که بالاتر از مقدار سایر فیلترهای متداول بود که نشان می‌دهد الگوریتم جدید در مناطق همگن نویز را به طور موثری حذف می‌نماید.

مراجع

- [1] Argenti, F., Lapini, A., Bianchi, T., & Alparone, L. (2013). A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images. *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, 1(3), 6-35.
- [2] Goodman, J. W. (1976). Some fundamental properties of speckle. *JOSA*, 66(11), 1145-1150.
- [3] Touzi, R. (2002). A review of speckle filtering in the context of estimation theory. *Geoscience a Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(11), 2392-2404.
- [4] Shi, Z., & Fung, K. B. (1994, August). A comparison of digital speckle filters. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation. International (Vol. 4, pp. 2129-2133)*. IEEE.

- [5] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *Geoscience and Remote Sensing Magazine, IEEE*, 1(1), 6-43.
- [6] Lee, J. S. (1981). Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer graphics and image processing*, 17(1), 24-32.
- [7] Lopes, A., Touzi, R., & Nezry, E. (1990). Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 28(6), 992-1000.
- [8] Crimmins, T. R. (1986). Geometric filter for reducing speckle. *Optical Engineering*, 25(5), 255651-255651.
- [9] Kuan, D. T., Sawchuk, A. A., Strand, T. C., & Chavel, P. (1985). Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (2), 165-177.
- [10] Frost, V. S., Stiles, J. A., Shanmugan, K. S., & Holtzman, J. (1982). A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (2), 157-166.
- [11] Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., & Laur, H. (1990, May). Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. IGARSS'90. Remote Sensing Science for the Nineties'. 10th Annual International* (pp. 2409-2412). IEEE.
- [12] Das, A. J., Talukdar, A. K., & Sarma, K. K. (2013). An Adaptive SAR Image Despeckling Algorithm using Stationary Wavelet Transform. *International Journal of Electronics Signals and Systems (IJESS)*, 3(1), 56-61.
- [13] Achim, A., Tsakalides, P., & Bezerianos, A. (2003). SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41(8), 1773-1784.
- [14] Sævarsson, B. B., Sveinsson, J. R., & Benediktsson, J. A. (2003, July). Speckle reduction of SAR images using adaptive curvelet domain. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International* (Vol. 6, pp. 4083-4085). IEEE.
- [15] Li, Y., Gong, H., Feng, D., & Zhang, Y. (2011). An adaptive method of speckle reduction and feature enhancement for SAR images based on curvelet transform and particle swarm optimization. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(8), 3105-3116.
- [16] Walkup, J. F., & Choens, R. C. (1974). Image processing in signal-dependent noise. *Optical Engineering*, 13(3), 133258-133258.
- [17] Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.
- [18] Poderico, M. (2011). *Denoising of SAR images*. Ph. D. dissertation, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy, (<http://www.fedoa.unina.it/8779>).
- [19] Curlander, John C., and Robert N. McDonough. *Synthetic aperture radar*. John Wiley & Sons, 1991.
- [20] Middleton, D. (1996). *An Introduction to Statistical Communication Theory: An IEEE Press Classic Reissue*. Wiley-IEEE Press.
- [21] Shanthi, I., & Valarmathi, M. L. (2013). SAR image despeckling using possibilistic fuzzy C-means clustering and edge detection in bandelet domain. *Neural Computing and Applications*, 23(1), 279-291.
- [22] Lee, J. S. (1986). Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images. *Optical engineering*, 25(5), 255636-255636.
- [23] Kuan, D. T., Sawchuk, A. L. E. X. A. N. D. E. R. A., Strand, T. C., & Chavel, P. (1987). Adaptive restoration of images with speckle. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 35(3), 373-383.
- [24] Lee, J. S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC press.
- [25] Shamsoddini, A., & Trinder, J. C. (2010). Image texture preservation in speckle noise suppression. W. Wagner, & B. Székely (Eds.). na.