

## بررسی آستانه‌گذاری سخت ضرایب تبدیل کرولت به منظور کاهش نویز لکه تصاویر رادار

فاطمه ذاکری<sup>۱</sup>، محمودرضا صاحبی<sup>۲\*</sup>، محمدجواد ولدان زوج<sup>۳</sup>

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲-استادیار، ۳-دانشیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۲/۰۲/۲۷، پذیرش: ۹۲/۰۶/۲۴)

### چکیده

به دلیل تأثیرات مخرب نویز لکه در دسترسی به اطلاعات موجود در تصاویر رادار، کاهش اثر این نویز همواره مورد توجه محققین بوده است. هدف این تحقیق، مطالعه کاهش نویز تصاویر راداری بر مبنای آستانه‌گذاری سخت ضرایب تبدیل کرولت است. در این مقاله جهت حذف نویز لکه از الگوریتمی جدید به منظور تخمین حد آستانه استفاده شده است. در تعیین این حد آستانه از ویژگی‌های آماری ضرایب کرولت مانند میانگین هندسی و حسابی استفاده شده است. در این روش، ابتدا نویز ضریبی لکه با استفاده از تبدیل لگاریتمی به نویز افزایشی تبدیل شده و تصویر حاصل به فضای کرولت منتقل می‌شود. سپس حد آستانه با توجه به اطلاعات آماری ضرایب مشخص شده و این حد آستانه در آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت به منظور حذف ضرایب نویزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتها نیز تبدیل معکوس کرولت اعمال و تصویر نویز کاهش‌یافته حاصل می‌شود. معیارهای ارزیابی متفاوتی مانند معیار حفظ لبه، تعداد دید معادل، میانگین مربع خطا و غیره برای ارزیابی نتایج محاسبه شدند. در قیاس با روش‌های کاهش نویز موجود مانند فیلترهای Lee, Kuan, Gamma, Frost و فیلترهای مبتنی بر آستانه‌گذاری سخت تبدیل موجک نتایج تجربی به دست آمده پیشرفت زیادی را نشان می‌دهد (شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدر مطلق خطا به ترتیب ۰.۳۲٪، ۰.۳۲٪ و ۰.۵٪ کاهش یافته‌اند). افزون بر این الگوریتم مورد بررسی در حفظ لبه‌ها بسیار توانمند بوده است.

### واژگان کلیدی:

تبدیل کرولت، تصاویر رادار، آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت، نویز لکه

### ۱. مقدمه

توجه محققین بوده است. روش‌های بهبود کیفیت تصاویر برای ایجاد تغییر در تصویر به منظور حصول اطلاعات بیشتر طراحی شده‌اند. در تصاویر سنجش از دوری به دلیل شرایط خاص تصویربرداری، غالباً حضور نویز محسوس بوده و موضوع بهبود کیفیت این تصاویر بسیار حائز اهمیت است، زیرا وجود نویز استخراج اطلاعات از این تصاویر را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد. تصاویر رادار با روزه مجازی (SAR)<sup>۳</sup> یکی از تصاویر سنجش از دوری می‌باشند که به دلیل مزایایی مانند توانایی اخذ تصویر در تمامی ساعات شبانه‌روز، اخذ تصویر در تمامی شرایط آب و هوایی و دادن اطلاعات از خواص مختلف اشیا بسیار مورد توجه محققین می‌باشند [۳].

در دنیای واقعی، سیگنال بدون نویز وجود ندارد [۱]. این نویز در هنگام اخذ تصویر یا انتقال تصویر ایجاد می‌شود [۱]. حذف نویز از تصاویر یک مسئله مهم در پردازش تصاویر است که می‌تواند در فضای ابتدایی سیگنال که فضای زمان است انجام پذیرد یا می‌توان به‌عنوان مثال از تبدیل فوریه استفاده کرد و سیگنال را به حیطه فرکانس برد یا از تبدیل‌های چندمقیاسی مانند کرولت<sup>۱</sup> و موجک<sup>۲</sup> استفاده کرد و سیگنال را به فضای زمان-مقیاس برد [۲].

بهبود کیفیت تصاویر، موضوعی است که از مدت‌ها پیش مورد

<sup>۲</sup> Wavelet

<sup>۳</sup> Synthetic Aperture Radar

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: sahebi@kntu.ac.ir

<sup>۱</sup> Curvelet

می‌شود [۳].

با توجه به اینکه روش‌های مبتنی بر تخمین ضرایب بدون نویز، به نوع نویز مورد استفاده و توزیع آن وابسته می‌باشند، ارائه مدلی دقیق برای تصاویر مختلف غیرممکن به نظر می‌رسد و لزوم روشی که بدون اطلاعات قبلی از نویز و توزیع آن، نویز را به صورت مؤثر حذف کند، به وضوح به چشم می‌خورد. در نتیجه در مقاله حاضر، روش آستانه‌گذاری مورد مطالعه قرار گرفت.

در روش آستانه‌گذاری، ابتدا تبدیل کرولت بر روی تصاویر راداری اعمال و ضرایب کرولت بدون نویز توسط تابع آستانه‌گذار تخمین زده شده و سپس تبدیل معکوس کرولت اعمال می‌شود. آستانه‌گذاری در فضای کرولت می‌تواند به روش نرم<sup>۶</sup> یا سخت<sup>۷</sup> انجام پذیرد. در روش آستانه‌گذاری سخت، ضرایب بدون نویز، بدون تغییر باقی می‌ماند. بر خلاف آستانه‌گذاری سخت در آستانه‌گذاری نرم ضرایب بدون نویز به اندازه قدرمطلق مرز تغییر می‌یابند.

روش‌های آستانه‌گذاری به شدت وابسته به مقدار آستانه و روش تعیین آن است. در تحقیق پیش‌رو به معرفی روشی جدید در تعیین حد آستانه به منظور کاهش نویز تصاویر راداری بر پایه آستانه‌گذاری سخت تبدیل کرولت پرداخته می‌شود. نتایج این روش با فیلترهای متداول مانند Lee, Kuan, Gamma, Frost و همچنین آستانه‌گذاری سخت تبدیل موجک مقایسه گردید.

## ۲. مواد و روش‌ها

همان‌گونه که بیان شد، هدف از این تحقیق بررسی کاهش نویز که تصاویر راداری توسط تبدیل کرولت با استفاده از آستانه‌گذاری سخت می‌باشد. نیاز روش‌های مبتنی بر تخمین ضرایب بدون نویز، به نوع نویز مورد استفاده و توزیع آن، انعطاف‌پذیری این روش‌ها را برای تصاویر متفاوت کاهش می‌دهد؛ همچنین به دلیل توسعه روش که بدون اطلاعات قبلی از نویز و توزیع آن قابل اجرا بروی تمامی تصاویر باشد، روش آستانه‌گذاری ضرایب کرولت جهت مطالعه انتخاب شد. در ادامه روش تحقیق تصاویر مورد استفاده در این تحقیق تشریح می‌شود.

### ۲-۱. تبدیل کرولت

در تبدیل کرولت هدف تولید کرولت پایه  $\varphi$  و آنالیز سیگنال و تصویر از طریق انتقال، مقیاس<sup>۸</sup> و دوران کرولت پایه است.

در فضای کرولت،  $x$  متغیر مکانی،  $\omega$  متغیر حیطه فرکانس و  $r$  و

با وجود مزیت‌های یادشده این تصاویر دارای نویز ضربی<sup>۱</sup> که از آن به عنوان نویز لکه<sup>۲</sup> نیز یاد می‌شود می‌باشند [۴]. نویز لکه به دلیل ایجاد کاهش دسترسی به داده‌های تصویر، یک عامل ناخوشایند است. در نتیجه تحقیقات زیادی برای کاهش آن انجام گرفته است [۵-۹].

روش‌های کاهش نویز در تصاویر رادار با روزه مجازی به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند [۳] که عبارتند از:

**الف) پردازش‌های Multilook:** این روند در طی آرایش تصویر شکل می‌گیرد و از تعدادی دید<sup>۳</sup> مستقل از یک صحنه میانگین‌گیری انجام می‌شود و مشکل آن کاهش توان تفکیک مکانی است.

**ب) فیلترهای پس پردازش:** فیلترهای پس پردازش به منظور رفع مشکلات multilook یا کاهش نویز بیشتر طراحی شده، همانند فیلتر Lee، فیلتر Gamma، فیلتر Frost و غیره. تمام این فیلترها در بیشتر تصاویر راداری دارای عملکرد مناسبی می‌باشند اما دارای مقداری کاهش توان تفکیک مکانی و نرم کردن لبه‌ها می‌باشند. به منظور بهبود نتایج و رفع این نقص، فیلترهایی بر مبنای روش‌های چندمقیاسی مانند تبدیل موجک ارائه شدند. مراحل کاهش نویز در تبدیل چندمقیاسی موجک شامل اعمال تبدیل موجک، تغییر ضرایب موجک (به منظور کاهش نویز) و تبدیل معکوس موجک است. تبدیل موجک به دلیل خاصیت تنک<sup>۴</sup> بودن یا توانایی نمایش بیشتر انرژی سیگنال در تعداد ضرایب محدودی در حذف نویز یکی از روش‌های مؤثر است [۱۰-۱۲]، اما تبدیل موجک در نمایش ناپیوستگی‌های در امتداد یک منحنی ناتوان است و تنها می‌تواند اطلاعات در جهات خاصی را حفظ کند، در حالی که تبدیل کرولت تبدیل چندمقیاسی جدیدی است که توانایی نمایش لبه‌ها با تعداد ضرایب کم را دارد [۱۳]، که این موضوع می‌تواند در حفظ لبه‌ها در اعمال فیلتر مؤثر باشد.

به طور کلی روش‌های کاهش نویز تصاویر رادار با روزه مجازی مبتنی بر تبدیل کرولت می‌تواند به دو دسته کلی تقسیم شود:

**۱- روش آستانه‌گذاری:** در این روش یک حد آستانه به منظور جداسازی ضرایب بدون نویز کرولت انتخاب می‌شود و ضرایب بدون نویز از دیگر ضرایب جدا می‌شوند [۱۴-۱۸].

**۲- روش تخمین:** در این روش یک توزیع اولیه برای ضرایب کرولت تصویر بدون نویز در نظر گرفته می‌شود و سپس از یک تخمین‌گر مانند بیزین<sup>۵</sup> برای تخمین ضرایب بدون نویز استفاده

<sup>۵</sup> Bayesian

<sup>۶</sup> Soft

<sup>۷</sup> Hard

<sup>۸</sup> Scale

<sup>۱</sup> Multiplicative noise

<sup>۲</sup> Speckle

<sup>۳</sup> Look

<sup>۴</sup> Sparse

$$f = \sum_{j,l,k} \langle f, \phi_{j,l,k} \rangle \phi_{j,l,k} \quad (7)$$

برای سازگاری این تبدیل با آرایه‌های کارترین الگوریتم تبدیل کرولت گسسته ارائه شده است که توضیح آن از حوصله این مطالعه خارج است.

## ۲-۲. الگوریتم کاهش نویز

پیدا کردن مقدار مناسب آستانه در روش‌های آستانه‌گذاری بسیار تأثیرگذار و مهم است. اگر حد آستانه کوچک باشد تصویر نهایی شبیه به تصویر ورودی است و اگر این حد آستانه بزرگ باشد ممکن است تصویر را بسیار نرم کند و لبه‌ها را از بین ببرد. در نتیجه احتیاج به حد آستانه سازوارپذیر<sup>۲</sup> با زیر باندها است. در این بخش تعیین حد آستانه جدید با توجه به خصوصیات آماری ضرایب معرفی می‌گردد.

فرض کنید  $y$  و  $x$  به ترتیب مشاهدات نویزدار و بدون نویز تصویر رادار با روزه مجازی می‌باشند و  $n_{mul}$  نمایش گر نویز لکه ضرب شونده در این تصاویر است. ابتدا با اعمال تبدیل لگاریتمی، نویز ضربی به نویز افزایشی تبدیل می‌شود:

$$\log(y) = \log(x) + \log(n_{mul}) \quad (8)$$

اکنون تبدیل کرولت اعمال می‌گردد و تصویر به فضای کرولت انتقال داده می‌شود. سپس از متد آستانه‌گذاری سخت استفاده می‌گردد:

$$\begin{cases} y' = y & |y| \geq \lambda \\ y' = 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $y'$  ضرایب نویزدار کرولت،  $\lambda$  تخمینی از ضرایب بدون نویز کرولت و  $\lambda$  حد آستانه است.

در روش آقای Strack مقدار حد آستانه برابر با رابطه زیر است:

$$\lambda = K \sigma' \sigma_n \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)  $\sigma_n^2$  واریانس نویز و  $\sigma'$  انحراف معیار نویز ضرایب کرولت است که توسط روش Monte-Carlo تخمین زده می‌شود.  $K$  برای مقیاس اول برابر ۴ و برای دیگر مقیاس‌ها برابر ۳ است [۱۹].

در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه مقدار حد آستانه بر پایه آنالیز آماری ضرایب کرولت، معرفی می‌گردد. مقدار حد آستانه جدید از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = \left( K \sigma' \sigma_n \right) + |AM - GM|_{sd} \quad (11)$$

$\theta$  مختصات قطبی در حیطه فرکانس می‌باشند. فرآیند تبدیل با دو پنجره  $W(r)$  و  $V(t)$  شروع می‌شود که به ترتیب پنجره شعاعی و پنجره زاویه‌ای نامیده می‌شوند. این توابع نرم و نامنفی هستند که مقادیر حقیقی می‌گیرند. دامنه  $W$  مقادیر حقیقی مثبت در بازه  $(0, 2)$  و دامنه  $V$  مقادیر حقیقی در بازه  $[-1, 1]$  است. این توابع همیشه از شرایط زیر تبعیت می‌کنند [۱۳]:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1 \quad r \in (3/4, 3/2) \quad (1)$$

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} V^2(t-1) = 1 \quad t \in (-1/2, 1/2) \quad (2)$$

برای هر  $j > j_0$  (که  $j$  پارامتر مقیاس) پنجره فرکانس  $u_j$  در فضای فوری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{\{j/2\}}}{2\pi} \theta\right) \quad (3)$$

که  $\{j/2\}$  قسمت عدد صحیح مقدار  $j/2$  است. به منظور تولید کرولت‌های با مقادیر طبیعی از نمونه متقارن فرمول (۳) استفاده می‌شود، یعنی از عبارت  $u_j(r, \theta) + u_j(r, \theta + \pi)$  استفاده می‌شود [۱۳].

شکل موج<sup>۱</sup>  $\phi_j(x)$  به وسیله تبدیل فوری آن  $(\omega) \phi'_j = (\omega) u_j$  تعریف می‌شود.  $u_j(\omega_1, \omega_2)$  پنجره‌ای است که در سیستم مختصات قطبی به وسیله فرمول (۳) تعریف می‌شود.  $\phi_j$  کرولت مادر است و تمام کرولت‌ها در مقیاس  $2^j$  به وسیله دوران و انتقال کرولت مادر به دست می‌آیند. زوایای دوران به صورت  $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{-\{j/2\}}$  که  $l = 0, 1, \dots$  و  $0 \leq \theta_l < 2\pi$  تعریف می‌شوند و فاصله بین زوایای متوالی به مقیاس وابسته است. پارامتر انتقال نیز به صورت  $k = (k_1, k_2) \in Z^2$  تعریف می‌شود. در نهایت کرولت در مقیاس  $2^j$  دوران  $\theta_l$  و مکان  $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1} \left( k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{-j/2} \right)$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$\phi_{j,l,k}(x) = \phi_j \left( \mathbf{R}_{\theta_l} \left( x - x_k^{(j,l)} \right) \right) \quad (4)$$

که  $\mathbf{R}_{\theta}$  ماتریس دوران است.

$$\mathbf{R}_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \mathbf{R}_{\theta}^{-1} = \mathbf{R}_{\theta}^T = \mathbf{R}_{-\theta} \quad (5)$$

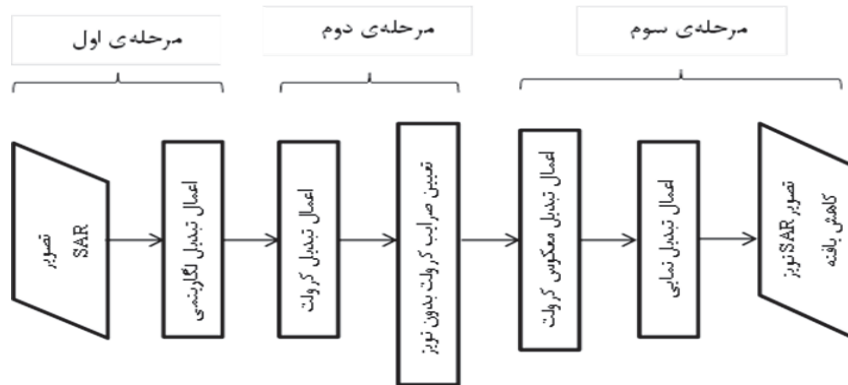
ضرایب کرولت از ضرب داخلی  $f$  و  $\phi_{j,l,k}$  به دست می‌آید:

$$c(j, l, k) := \langle f, \phi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\phi_{j,l,k}(x)} dx \quad (6)$$

فرمول معکوس نیز به صورت زیر است:

<sup>2</sup> Adaptive

<sup>1</sup> Wave form



شکل ۱. الگوریتم کاهش نویز لکه تصاویر رادار با روزنه مجازی

سیملت<sup>۳</sup> مرتبه ۴ و سطح تجزیه ۱ و موجک دایچی<sup>۴</sup> مرتبه ۱۵ و سطح تجزیه ۱ مقایسه گردید. در این مطالعه از کرنل  $3 \times 3$  و ضریب تعدیل<sup>۵</sup> برابر با یک در فیلترهای Lee، Gamma، Frost و Kuan استفاده شده است. همچنین روش‌های ارزیابی مختلفی در این مطالعه به کار گرفته شد که در ادامه به معرفی آنها پرداخته خواهد شد.

### ۲-۳-۱. بررسی پارامترهای کیفیت تصویر خروجی فیلتر

برای ارزیابی هر فیلتر، با مقایسه تصاویر اولیه (بدون نویز) و تصاویر فیلتر شده توسط آن فیلتر، معیارهای بررسی و ارزیابی در نظر گرفته شده است. این معیارها که تحت عنوان پارامترهای کیفیت تصویر شناخته می‌شوند به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

### ۲-۳-۱-۱. بررسی فیلتر در حفظ لبه

همان گونه که بیان شد، هر فیلتر دو وظیفه بر عهده دارد. وظیفه اول آن کاهش نویزهای موجود در تصویر و تخمین مقادیر درجه خاکستری فاقد نویز است و وظیفه دوم فیلتر شناسایی لبه‌های موجود در تصویر و جلوگیری از نرم شدن آنها است. برای حصول اطمینان از غیر نویز بودن لبه‌ها، در این روش از تصاویر شبیه سازی شده رادار با روزنه مجازی استفاده می‌شود. برای استخراج لبه از روش Laplacian Of Gaussian (LOG) استفاده شده است [۲۲].

### ۲-۳-۱-۲. آنالیز ریزبافت‌ها<sup>۶</sup>

در روش‌های استخراج لبه، تأکید بر روی تشخیص عوارض خاص در نقاط مختلف تصویر است و برای کلیت تصویر و خصوصیات رادیومتریک آن اهمیتی قائل نیست. در مقابل، آنالیزهای بافت خصوصیات رادیومتریک کلی تصویر را مورد بررسی قرار می‌دهند و

ترم  $AM$ ، میانگین حسابی قدرمطلق ضرایب در مقیاس  $s$  و جهت  $d$  است. ترم  $GM$  نیز میانگین هندسی قدرمطلق ضرایب در مقیاس  $s$  و جهت  $d$  است.  $\sigma_n$ ،  $\sigma$  و  $K$  نیز مانند رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند.

اگر ضرایب کرولت در یک زیر باند با یکدیگر اختلاف بیشتری داشته باشند، این نشان‌دهنده تأثیر بیشتر نویز در آن ضرایب است. در نتیجه آن ضرایب باید با مقدار بزرگ‌تری آستانه‌گذاری شوند. این مقصود با اضافه کردن ترم  $|AM-GM|$  صورت می‌پذیرد. در نتیجه ترم  $|AM-GM|$  مقدار آستانه سازواری پذیر برای هر زیر باند با توجه به مقدار نویز در آن زیر باند فراهم می‌کند.

بعد از اعمال آستانه تعیین شده، تبدیل معکوس کرولت و تبدیل نمایی اعمال شده و تصویر نویز کاهش یافته به دست می‌آید. الگوریتم مراحل کاهش نویز تصاویر رادار با روزنه مجازی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

### ۲-۳. تصاویر مورد استفاده و روش‌های ارزیابی

در این تحقیق از دو نوع تصاویر استفاده شده است:

۱) تصاویر رادار با روزنه مجازی: شامل داده‌های ماهواره ENVISAT باند C قطبش<sup>۱</sup> VV از شهر مونتریال کانادا، RADARSAT1 باند C قطبش HH از شهر کبک کانادا و AIRSAR باند L قطبش HH از شهر سن فرانسیسکو.

۲) تصاویر شبیه‌سازی شده: مرجع تصاویر شبیه‌سازی شده از پایگاه تصویر USC-SIPI دانلود شده است [۲۰] و برای تولید نویز لکه، از نویز ضربی با توزیع لگ-نرمال<sup>۲</sup> استفاده شده است [۲۱].

به منظور ارزیابی نتایج حاصل، الگوریتم مورد بررسی با فیلترهای Lee، Kuan، Gamma، Frost

<sup>۳</sup> Symlet Wavelet

<sup>۴</sup> Daubechies Wavelet

<sup>۵</sup> Damping Factor

<sup>۶</sup> Micro Texture Analysis

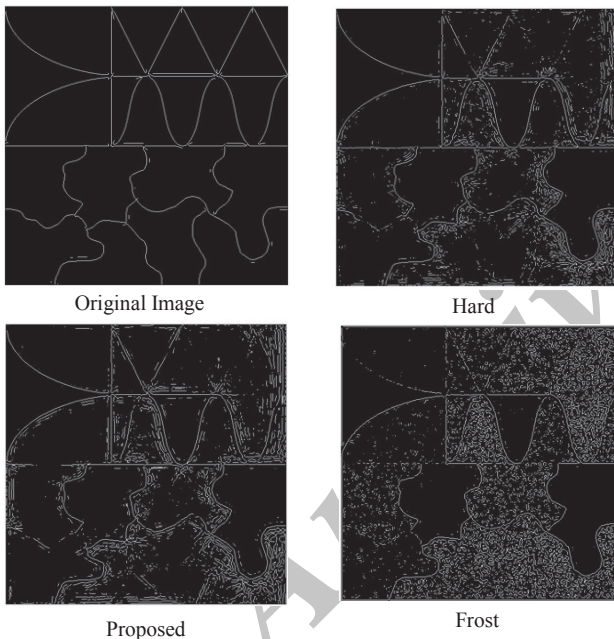
<sup>۱</sup> Polarization

<sup>۲</sup> Log-Normal

نویز مختلف بر روی تصاویر شبیه‌سازی استفاده شد (تصاویر با تعداد دید معادل ۱/۹ و ۹/۴ که به ترتیب دارای نویز زیاد و متوسط می‌باشند استفاده شد) [۲۱]. در جدول‌ها و اشکال ارائه شده، منظور از روش Hard آستانه‌گذاری سخت ضرایب کرولت با مقدار آستانه رابطه (۱۰) است.

به منظور اختصار، تنها لبه‌های حاصل از اعمال فیلتر کرولت سخت، Frost و روش پیشنهادی که با توجه به جدول ۱ به نتایج بهتری دست یافته‌اند، در شکل ۲ نمایش داده شده است. استخراج لبه به روش LOG صورت گرفته است.

به منظور بررسی شباهت لبه‌های تصویر فیلتر شده و تصویر اصلی از معیار MAE استفاده شد که نتایج آن در جدول زیر نمایش داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۱ و شکل ۲ روش پیشنهادی به نتایج بهتری در حفظ لبه رسیده است.



شکل ۲. بررسی لبه‌های خروجی از تصاویر فیلتر شده

جدول ۱. MAE لبه‌های حاصل از فیلترهای مورد بررسی

	L=1.9	L=9.4
Hard	۰/۰۴۷۰	۰/۰۴۸۲
Proposed	۰/۰۴۰۸	۰/۰۴۲۳
Frost	۰/۰۹۰۴	۰/۰۴۹۴
Gamma	۰/۰۹۹۴	۰/۰۶۲۱
Kuan	۰/۰۹۸۳	۰/۰۶۲۴
Lee	۰/۱۰۹۰	۰/۰۷۴۲
w-db-15-1	۰/۱۱۶۱	۰/۱۱۶۴
w-sym-4-1	۰/۱۱۳۰	۰/۱۱۳۴

به وجود یا عدم وجود عوارض خاص در تصویر اهمیتی نمی‌دهند. در این مطالعه از معیار تعداد دید معادل (ENL)<sup>۱</sup> برای بررسی آنالیز ریزبافت‌ها استفاده شده است.

معیار ENL به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$ENL = \frac{E^2}{\sigma^2} \quad (۱۲)$$

که در آن  $E$  میانگین تصویر و  $\sigma^2$  واریانس تصویر است. ENL باید در قسمت همگنی از تصویر مصاحبه شود. برای این منظور یک زیر تصویر همگن از کل تصویر انتخاب شده و برای اطمینان از همگن بودن، این زیر تصویر به بلاک‌های  $۲۵ \times ۲۵$  تقسیم شده و ENL‌های محاسبه شده میانگین‌گیری شدند.

### ۲-۳-۲. مقایسه بین دو تصویر

در این روش ابتدا به تصاویر دارای لبه و فاقد نویز، نویز ضریبی با توزیع لگ-نرمال افزوده می‌شود و سپس بر روی این تصاویر نویزی، فیلترهای مختلف اعمال می‌گردد. در مرحله پردازش، تصاویر اولیه و تصاویر فیلتر شده باهم مقایسه می‌شوند. هر فیلتری که دارای نتایج شبیه‌تری به تصاویر اولیه باشد، موفق‌تر عمل کرده است. علت بدون نویز بودن تصاویر اولیه هم این است که فیلترهای ضعیف و ناتوان در حذف نویزهای موجود در تصویر اولیه به عنوان فیلترهای شبیه‌تر به آن معرفی نشوند.

به منظور مقایسه بین دو تصویر معیارهای میانگین مربع خطا (MSE)، میانگین مربع خطا نرمال شده (NMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) که در زیر تعریف می‌شوند مورد بررسی قرار گرفتند [۲۴]:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i,j) - c'(i,j)]^2 \quad (۱۳)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i,j) - c'(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [c(i,j)]^2} \quad (۱۴)$$

$$MAE = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |c(i,j) - c'(i,j)| \quad (۱۵)$$

در این روابط  $c(i,j)$  و  $c'(i,j)$  به ترتیب پیکسل‌های تصویر ایده آل و فیلتر شده است که در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام واقع‌اند و مقادیر  $M$  و  $N$  به ترتیب تعداد سطرها و ستون‌های تصویر می‌باشند.

### ۳. نتایج و ارزیابی

به منظور بررسی توانایی الگوریتم در تشخیص لبه‌ها از دو سطح

<sup>۱</sup> Equivalent Number of Looks

تصویر شبیه‌سازی شده و نتایج فیلترهای کرولت و موجک که با توجه به جدول ۳ دارای شباهت بیشتری به تصویر اولیه می‌باشند در شکل ۴ آمده است:

همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدرمطلق خطا به ترتیب  $۰.۳۲/۰.۳۲$  و  $۰.۵$  کاهش یافته‌اند. در واقع از این نتایج و شکل ۴ می‌توان دریافت که فیلتر کرولت تصویری با درجه شباهت بیشتری به تصویر اولیه نسبت به فیلترهای دیگر تولید کرده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی کاهش نویز تصاویر راداری با آستانه‌گذاری سخت ضرایب تبدیل کرولت پرداخته و یک روش مؤثر و با محاسبات کم برای تخمین مقدار آستانه به‌منظور کاهش نویز این تصاویر معرفی گردید. از آنجایی که روش پیشنهادی بر مبنای تخمین پارامترهای میانگین هندسی و حسابی است، این روش یک متد سازوارپذیر با شرایط تصویر مورد بررسی است. نتایج حاصل با فیلترهای مختلف مانند Lee، Frost، Gamma، Kuan و آستانه‌گذاری سخت موجک مور مقایسه قرار گرفت. نتایج تجربی کارایی الگوریتم مورد بررسی را مورد تأیید قرارداد (شاخص‌های میانگین مربع خطا، میانگین مربع خطای نرمال شده و میانگین قدرمطلق خطا به ترتیب  $۰.۳۲/۰.۳۲$  و  $۰.۵$  کاهش یافته‌اند). افزون بر این، این فیلتر در مواجهه با لبه‌ها در مقایسه با فیلترهای ذکر شده بهتر عمل کرده است که این موضوع در کاربردهای سنجش از دور بسیار حائز اهمیت است و فیلتری توانمند شناخته می‌شود که بتواند همراه با حذف نویز به حفظ لبه‌ها بپردازد. با توجه به نتایج پیاده‌سازی فیلتر مبتنی بر کرولت به تصویری مشابه‌تر به تصویر اولیه دست یافته است.

معیار ENL بر روی زیر بخش همگنی از تصاویر رادار با روزنه مجازی معرفی شده در بخش ۲-۳ محاسبه و نتایج آن در جدول ۲ خلاصه شده است:

جدول ۲. مقادیر ENL تصاویر با اعمال فیلترهای مختلف

	ENVISAT	RADARSAT	AIRSAR
Original Image	۱/۴۱۳۱	۹/۶۶۲۲	۱۴/۴۷۵۴
Hard	۱/۵۹۰۲	۱۲/۶۶۱۹	۳۷/۶۱۱۹
Proposed	۲/۳۵۵۳	۲۱/۴۷۳۱	۵۵/۴۰۳۷
Frost	۲/۰۸۱۶	۱۷/۳۸۱۳	۲۳/۱۴۴۳
Gamma	۲/۱۲۵۰	۱۷/۳۷۴۲	۳۴/۵۳۵۵
Kuan	۱/۷۴۶۳	۱۷/۱۴۱۰	۳۴/۴۶۱۰
Lee	۱/۷۵۶۲	۱۳/۳۹۱۰	۲۵/۳۷۹۴
w-db-15-1	۱/۲۴۰۵	۱۱/۲۰۶۰	۲۱/۷۲۰۵
w-sym-4-1	۱/۳۴۰۴	۱۲/۳۵۸۵	۲۳/۰۳۴۴

در شکل ۳ به‌منظور اختصار، قسمتی از تصاویر ENVISAT و RADARSAT و نتیجه فیلترهای مختلف نشان داده شده است:

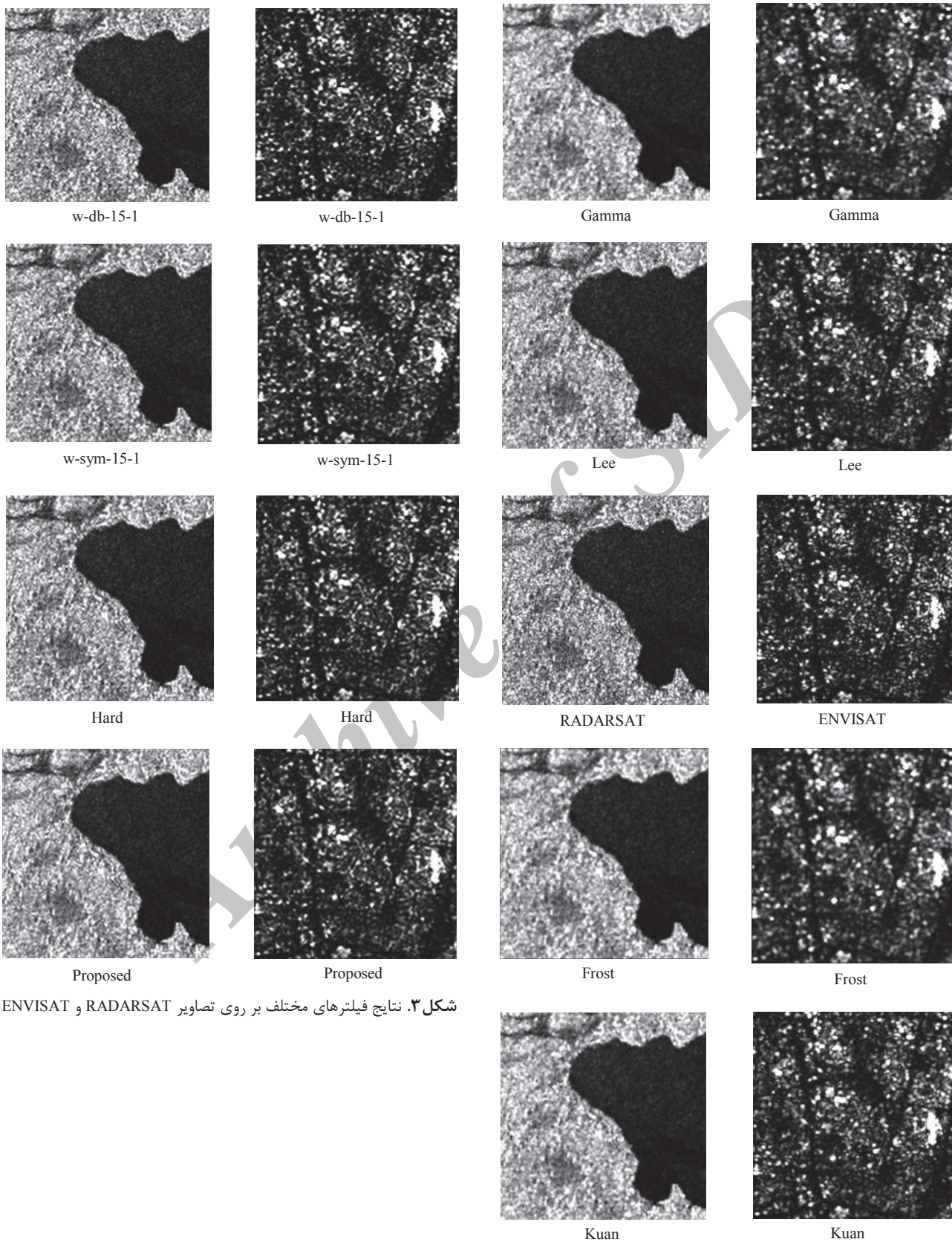
همان‌گونه که از نتایج جدول ۲ مشخص است روش پیشنهادی به ENL بهتری دست یافته و بیشتر از روش‌های دیگر موفق به حذف نویز شده است. از شکل ۳ نیز می‌توان دریافت که فیلتر پیشنهادی در کاهش نویز و حفظ لبه‌ها بسیار بهتر از فیلترهای دیگر عمل کرده است.

نتایج معیارهای MAE، NMSE و MSE که بر روی تصویر هوایی [۲۰] نویز افزوده شده بعد از اعمال فیلترهای مختلف شکل ۴ محاسبه شده‌اند، در جدول ۳ خلاصه گردیده است.

جدول ۳. معیارهای MAE، NMSE و MSE بر روی تصویر شبیه‌سازی شده

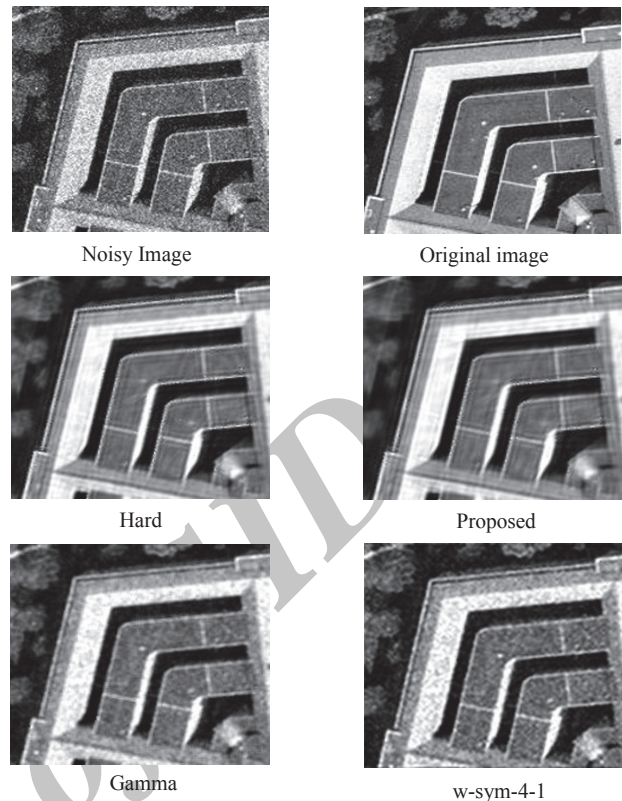
	L=1.9			L=9.4		
	MSE	NMSE	MAE	MSE	NMSE	MAE
Hard	$۱/۴۰۹۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۰۸۰	۱۱۵/۹۷۳۹	$۱/۸۱۸۸ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۱۳۸	۱۳۲/۳۸۰۷
Proposed	$۱/۳۹۱۵ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۶۹۹۱	۱۱۵/۵۸۹۳	$۱/۸۰۵۸ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۰۷۲	۱۳۲/۰۸۹۸
Frost	$۱/۵۷۴۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۹۰۸	۱۲۲/۰۳۸۳	$۱/۸۷۵۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۴۲۱	۱۳۴/۴۷۱۹
Gamma	$۱/۵۷۳۰ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۹۰۳	۱۲۱/۹۸۱۵	$۱/۸۷۴۶ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۴۱۸	۱۳۴/۴۴۷۳
Kuan	$۲/۰۶۵۱ \times ۱۰^{-۴}$	۱/۰۳۷۵	۱۲۲/۲۵۸۲	$۲/۰۹۱۲ \times ۱۰^{-۴}$	۱/۰۵۰۶	۱۳۴/۴۳۵۹
Lee	$۱/۶۲۳۹ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۸۱۵۹	۱۲۱/۹۶۶۳	$۱/۸۹۴۰ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۵۱۶	۱۳۴/۴۲۵۷
w-db-15-1	$۱/۴۸۹۷ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۴۸۵	۱۱۷/۳۷۶۹	$۱/۸۵۰۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۲۹۵	۱۳۲/۹۳۴۵
w-sym-4-1	$۱/۴۷۵۹ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۷۴۱۵	۱۱۷/۱۷۸۱	$۱/۸۴۲۵ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۲۵۷	۱۳۲/۸۲۲۸





شکل ۳. نتایج فیلترهای مختلف بر روی تصاویر RADARSAT و ENVISAT

- [9] Heidaryan, A., M. R. Sahebi, M. J. Valadanzoej, Speckle reduction in SAR images based on L1 Norm. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, Vol. 3, No. 3, PP 1-14, 2011
- [10] Achim, A., Bezerianos, A. and Tsakalides, P. "SAR Image Denoising via Bayesian Wavelet Shrinkage Based on Heavy Tailed Modeling". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.41, No.8, PP. 1773-1784, 2003.
- [11] Xie, H., L.E. Pierce, and F.T. Ulaby, SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing., Vol.40, No.10, PP. 2196-2212, 2002.
- [12] Solbo, S. and Eltoft T., "A Stationary Wavelet-domain Wiener Filter for Correlated Speckle". IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing., Vol.46, No.4, PP. 1219-1230, 2008.
- [13] Candès, E., et al., "Fast Discrete Curvelet Transforms. Multiscale Model. Simul., Vol.5, No.3, PP. 861-899, 2006
- [14] Ulfarsson, M.O., Sveinsson, J.R. and Benediktsson, J.A. "Speckle Reduction of SAR Images in The Curvelet Domain", in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) PP. 315-317, 2002.
- [15] Saevarsson, B.B., Sveinsson, J.R. and Benediktsson, J.A. "Combined Wavelet and Curvelet Denoising of SAR Images," in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) PP. 4235-4238, 2004.
- [16] Sveinsson, J.R. and Benediktsson, J.A. "Combined Wavelet and Curvelet Denoising of SAR Images using TV segmentation", in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) PP. 503-506, 2007.
- [17] Zhiyu, Z., Xiaodan, Z. and Jiulong, Z. "SAR Image Processing based on Fast Discrete Curvelet Transform," in International Forum on Information Technology and Applications PP. 28-31, 2009.
- [18] Li, Y., et al., "An Adaptive Method of Speckle Reduction and Feature Enhancement for SAR Images Based on Curvelet Transform and Particle Swarm Optimization." IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, Vol.49, No.8, PP. 31.5-3116, 2011.
- [19] Starck, J.-L., Candès, E.J. and Donoho, D.L. "The curvelet transform for image denoising." IEEE Transaction Image Processing, Vol.11, No.6, PP. 670-684, 2002.
- [20] Database, U.-S.I. <http://sipi.usc.edu/services/database/Database.html>.
- [21] Gagnon, L. and Jouan, A. "Speckle filtering of SAR images" —A comparative study between complex-wavelet based and standard filters, in Proc. SPIE PP. 80-91, 1997.
- [22] Juneja, M. and Sandhu, P.S. "Performance Evaluation of Edge Detection Techniques for Images in Spatial Domain." International Journal of Computer Theory and Engineering, PP. 1793--8201, 2009.
- [23] Mastriani, M. and Giraldez, A.E. "Enhanced Directional Smoothing Algorithm for Edge-Preserving Smoothing of Synthetic-Aperture Radar Images." Measurement Science Review, Vol.4, No.3, 2004.
- [24] Avcıbaşı, I., "Image Quality Statistics and Their Use in Steganalysis and Compression," in Submitted to the Institute for Graduate Studies in Science and Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Boğaziçi University 2001.



شکل ۴. نتایج حاصل از فیلترهای مختلف بر روی تصاویر شبیه‌سازی شده

##### ۵. مراجع

- [1] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. Digital Image Processing 2002: tom robbins.
- [2] Ali, A.-D., P.D. Swami, and J. Singhai, "Modified Curvelet Thresholding Algorithm for Image" Denoising. Journal of Computer Science, Vol.6, No.1, PP. 18-23, 2010.
- [3] Amirmazlaghani, M. and Amindavar, H. "Two Novel Bayesian Multiscale Approaches for Speckle Suppression in SAR Images." IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol.48, No.7, PP. 2980-2993, 2010.
- [4] Oliver, C. and Quegen, S "Understanding Synthetic Aperture RADAR images", United States of America: SciTech, 2004.
- [5] Lee, J.S., "Digital image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, Vol.2, No.2, PP. 165-177, 1980.
- [6] Kuan, D.T., et al., "Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-dependent Noise". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, Vol.7, No.2, PP. 165-177, 1985.
- [7] Frost, V.S., et al., "A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise". IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, Vol.4, No.2, PP. 157-166, 1982.
- [8] Baraldi, A. and Parmigiani F., A refined Gamma MAP SAR Speckle Filter with Improved Geometrical Adaptivity. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing., Vol.29, No.5, PP. 742-753, 1991.



## **Evaluation of Hard Thresholding of Curvelet Coefficients for Speckle Reduction in SAR images**

**F. Zakeri, M. R. Sahebi\*, M. J. Valadanzouj**

\*Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

(Received:05/17/2013, Accepted: 10/14/2013)

### **Abstract**

Due to the damaging effects of Speckle noise in accessing the information on radar images, reduction of these effects has been considered by many researchers. In this study, speckle reduction of radar images has been discussed based on curvelet transform. This paper describes an adaptive method of threshold estimation based on curvelet transform for removing speckle noise from Synthetic Aperture Radar (SAR) images. The estimation of the threshold value is carried out by analyzing the statistical parameters of the curvelet subband coefficients like arithmetic mean and geometric mean. In this algorithm first multiplicative speckle noise is transformed into an additive one by taking the logarithm of the original speckled image. Second curvelet transform is taken of logarithmically transformed image. Then based upon the statistical parameters of the curvelet coefficients of subbands, threshold values are found out. This threshold value is used in hard thresholding technique to remove the noisy curvelet coefficients. Then the inverse transform is applied to get the denoised image. Evaluation parameters like edge preservation factor, Equivalent Number of Looks, Mean Square Error and so on has been used for evaluating the performance of the proposed technique quantitatively. The results have been compared then to those obtained by other widely-used adaptive filters including Frost, Gamma, Kuan, Lee and hard thresholding wavelet based filters. The results of this comparison show that the proposed method offers better results than the above-mentioned filters (Mean Square Error, Normalized Mean Square Error and Mean Absolute Error indices are reduced 32%,32% and 5% respectively). In addition, the curvelet based filter is capable of preserving edges too.

**Keywords:** Curvelet Transform, Radar Images, Hard Thresholding, Speckle Noise

\* Corresponding author E-mail: sahebi@kntu.ac.ir