

ارائه یک روش جدید و مؤثر به منظور بهبود کیفیت تصاویر SAR بر مبنای استخراج وابستگی‌های بین مقیاسی در حوزه موجک

محمد فروزانفر^۱، حمید ابریشمی مقدم^{۱*} و مریم دهقانی^۱

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۱/۲۴

چکیده

با وجود کاربرد مؤثر تصاویر SAR در استخراج خطواره‌ها و گسل‌ها، تهیه مدل رقومی زمین و تعیین جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل زمین در اثر زلزله، این تصاویر به دلیل وجود نوفه‌ای ضرب شونده به نام اسپکل (Speckle noise) از کیفیت رادیومتریک پایینی برخوردار هستند. بنابراین بهبود کیفیت این تصاویر به منظور استفاده بهینه از آنها در کاربردهای سنجش از دور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله یک روش جدید و مؤثر به منظور بهبود کیفیت تصاویر SAR ارائه شده است. در این روش، ابتدا تصویر لگاریتمی SAR توسط تبدیل موجک (Wavelet) مختلط دو شاخه تجزیه می‌شود. آنگاه به منظور استخراج صحیح وابستگی‌های بین مقیاسی، مؤلفه سیگنال ضرایب موجک در مقیاس‌های مجاور به صورت مؤثری توسط توزیع دو بعدی همسانگرد (Isotropic) پایدار مدل می‌شود، در حالی که مؤلفه نوفه توسط یک توزیع گوسی دو بعدی همسانگرد تقریب زده خواهد شد. سپس یک تخمینگر دو متغیره بیز (Bivariate Bayesian estimator) برای جداسازی بهینه سیگنال از نوفه در فضای موجک طراحی می‌شود. مقایسه‌های کیفی و کمی روش پیشنهادی با چندین روش جدید کاهش نوفه اسپکل در تصاویر SAR، نشان از عملکرد بهینه این الگوریتم دارد.

کلیدواژه‌ها: نوفه اسپکل، تصاویر SAR، تبدیل موجک مختلط دو شاخه، تخمینگر دو متغیره بیز، توزیع دو متغیره همسانگرد پایدار

Email: moghadam@saba.kntu.ac.ir

*نویسنده مسئول: حمید ابریشمی مقدم

۱- مقدمه

امروزه استفاده از تصویربرداری SAR به عنوان روش امیدبخش مستقل از نور خورشید و پوشش ابر برای تهیه نقشه زمینی، توپوگرافی یخ و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های کوچک در مقیاس بزرگ زمانی و مکانی با دقت زیر سانتی‌متر معرفی شده است (Valadan-Zoei et al., 2005). اما، تصاویر SAR به دلیل حضور الگوی نقطه‌ای ضرب‌شونده ناخواسته‌ای که به نوفه اسپکل مشهور است، کیفیت پایینی دارند. این نوفه در اثر برخوردی‌های سازنده و مخرب امواج رسیده از هدف به سنجنده ایجاد می‌شود که به صورت نقاط تاریک و روشن در تصویر ظاهر می‌شود. بنابراین کاهش این نوفه پیش از تفسیر تصویر امری ضروری است. به طور کلی یک روش موفق کاهش نوفه در تصویر لازم است دارای ویژگی‌های زیر باشد (Oliver & Quegan, 1998): (۱) واریانس نوفه را در مناطقی از تصویر که از نظر آماری همگن هستند، کاهش دهد. (۲) ویژگی‌های مهم همچون بافت، لبه‌ها و خطوط را در تصویر حفظ نماید. (۳) اطلاعات رادیومتریک تصویر را حفظ نماید.

بر این اساس، تاکنون تلاش‌های زیادی برای حذف این نوفه از تصاویر SAR انجام گرفته است. به طور کلی، دو روش اصلی برای کاهش نوفه اسپکل در تصویر وجود دارد. روش اول که به نام روش چند منظره (Multi-look method) معروف است، پیش از ایجاد تصویر در سنجنده به کار می‌رود. در این روش آنتن سنجنده به چندین بخش تقسیم می‌شود و هر بخش به طور مجزا از هدف تصویربرداری می‌کند. در پایان، تصویر نهایی از میانگین تصاویر گرفته شده به دست می‌آید (Valadan-Zoei et al., 2005). روش دیگر فیلتر کردن تصویر است که می‌تواند به طور مستقیم بر روی تصویر یا پس از اعمال یک نگاشت بر روی ضرایب تبدیل یافته صورت پذیرد. بیشتر فیلترهای حوزه مکان و بسامد با ایجاد توازن بین حذف نوفه در نواحی همگن تصویر و حفظ جزئیات در نواحی ناهمگن، عملاً نوفه را در نواحی ناهمگن تصویر باقی می‌گذارند (Shi & Fung, 1994). فیلترهای ساده‌ای مانند متوسط‌گیر و میانه و یا فیلترهای تطبیق‌پذیر لی (Lee, 1980) و فراست (Frost et al., 1982) از این جمله‌اند. از دیگر روش‌های حذف نوفه اسپکل می‌توان به فیلتر وینر (Jain, 1989) و همچنین روش‌های جدیدتری مانند پنجره‌های تطبیق‌پذیر (Adaptive windowing method)

(Park et al., 1999) یا روش SRAD (Yu & Acton, 2002) اشاره نمود.

امروزه تبدیل موجک به عنوان روشی قدرتمند به منظور بازیابی اطلاعات از داده‌های نوفه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) با تصویر کردن سیگنال و نوفه بر روی توابع پایه موجک، خواص آماری آنها به نحو قابل توجهی ساده شده و با دقت خوبی توسط توابع توزیع شناخته شده قابل مدل‌سازی هستند.

(۲) روش‌های چند دقتی مانند تبدیل موجک امکان برآورد سیگنال را در مقیاس‌ها و جهات مختلف ممکن می‌سازند و بنابراین حفظ جزئیات و حذف نوفه به صورت همزمان ممکن خواهد شد.

ساده‌ترین روش حذف نوفه در حوزه موجک، آستانه‌گذاری (Thresholding) ضرایب موجک است که اولین بار توسط Donoho (1995) پیشنهاد شد. آستانه‌گذاری مشکلاتی مانند انتخاب آستانه بهینه و توابع آستانه‌گذاری مناسب را دربردارد. نشان داده شده است که روش بیز با انتخاب مدل مناسبی برای تابع چگالی احتمال سیگنال و نوفه نتایج مطلوبی را به دست می‌دهد (Achim et al., 2001, 2003). به این منظور مدل‌های مختلفی مانند مدل گوسی، مدل لاپلاسی تعمیم یافته (Generalized Laplacian model) (Mallat, 1998) و نیز به تازگی مدل‌هایی با دنباله‌های طولانی (Heavy-tailed) مانند توزیع مقارن پایدار آلفا (Alpha stable distribution) پیشنهاد شده‌اند (Achim et al., 2003). با وجود این که تبدیل موجک به خوبی سیگنال مورد نظر را ناهمبسته (Uncorrelated) می‌سازد (Dijkerman & Mazumdar, 1994)، وابستگی‌های بین مقیاسی (Inter-scale dependencies) و داخل مقیاسی (Intra-scale dependencies) زیادی بین ضرایب موجک وجود دارد (Liu & Moulin, 2001). استخراج درست این وابستگی‌ها به بهبود بسیار زیاد الگوریتم‌های حذف نوفه و فشرده‌سازی منجر خواهد شد. در این نوشتار ابتدا یک مدل جدید برای استخراج وابستگی‌های بین مقیاسی ضرایب موجک پیشنهاد خواهد شد و آنگاه یک تخمینگر دو متغیره بیز برای استخراج سیگنال از نوفه طراحی می‌شود. روش پیشنهادی در

تصویر اصلی و تصویر نوفه‌ای هستند.

۲-۲. تبدیل موجک مختلط دو شاخه

پس از تبدیل اسپیکل به نوفه‌ای جمع‌شونده، می‌توان با روش‌های مرسوم حذف نوفه در فضای موجک، آن را کاهش داد. در این مقاله تبدیل موجک مختلط دو شاخه (Dual-tree complex wavelet transform) به منظور تجزیه سیگنال پیشنهاد شده است. این تبدیل افزون بر عدم حساسیت به انتقال، دارای ویژگی جهت‌دار بودن در زوایای $\pm 15^\circ$ و $\pm 45^\circ$ است (Selesnic et al., 2005) که بدین ترتیب امکان حذف نوفه اسپیکل را در جهت‌های و مقیاس‌های مختلف به شکل مؤثرتری مقدور می‌سازد. از آنجا که ضرایب تقریب (Approximation coefficients) در تبدیل موجک حاوی اطلاعات بسامد پایین، که بیشتر مربوط به سیگنال اصلی هستند، می‌باشند این ضرایب در بیشتر روش‌های حذف نوفه دست‌نخورده باقی مانده و تنها ضرایب تفصیل (Detailed coefficients) به نوعی مجاله می‌شوند. ضرایب تفصیل در تبدیل موجک مختلط دو شاخه متعامد در هر مقیاس و جهت مشخص به شکل زیر قابل بیان هستند (Mallat, 1998):

$$d_i = c_i + n_i \quad (5)$$

که d معرف ضرایب نوفه‌ای موجک و c و n مؤلفه‌های سیگنال و نوفه آن هستند. همچنین i پارامتر مقیاس است که از 1 تا L متغیر است. با وجود این که تبدیل موجک به خوبی سیگنال مورد نظر را ناهمبسته می‌سازد، وابستگی‌های بین مقیاسی و درون مقیاسی زیادی بین ضرایب موجک وجود دارد. استخراج درست این وابستگی‌ها به بهبود بسیار زیاد الگوریتم‌های حذف نوفه و فشرده‌سازی منجر خواهد شد. این وابستگی‌ها با افزایش اختلاف دو مقیاس به شدت کاهش می‌یابند. در این مقاله، برای سادگی کار، همچون روش‌های گذشته مشابه (Sendur & Selesnick, 2002) تنها مدل خود را به دو مقیاس مجاور محدود می‌کنیم. براین اساس، مدل معرفی شده در رابطه (5) را برای دو مقیاس مجاور به شکل زیر نمایش می‌دهیم:

$$\mathbf{d} = \mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (6)$$

که $\mathbf{d} = (d_i, d_{i+1})^T$ ، $\mathbf{c} = (c_i, c_{i+1})^T$ و $\mathbf{n} = (n_i, n_{i+1})^T$. اکنون می‌توان با مدل‌سازی مناسب مؤلفه نوفه و سیگنال در رابطه بالا و طراحی یک تخمینگر دو متغیره بیز نوفه اسپیکل را به طور مؤثرتری کاهش داد.

۴-۴. مدل‌سازی مؤلفه‌های سیگنال و نوفه

نوفه اسپیکل پس از تبدیل لگاریتمی و تبدیل موجک، قابل مدل‌سازی توسط یک توزیع گوسی با میانگین صفر در هر زیر بانده است (Xie et al., 2002). از آن جا که از یک تبدیل متعامد موجک استفاده می‌کنیم، واریانس نوفه در کلیه زیر باندهای موجک ثابت خواهد ماند و می‌توان از یک توزیع دو متغیره گوسی با میانگین صفر و واریانس σ_n^2 به منظور مدل‌سازی مؤلفه نوفه در هر دو زیر بانده مجاور استفاده نمود:

$$p_n(\mathbf{n}) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{n_i^2 + n_{i+1}^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (7)$$

در این مقاله، شکل کلی توزیع‌های دو متغیره پایدار دایروی را به منظور مدل‌سازی ضرایب موجک تصاویر SAR پیشنهاد می‌کنیم. توزیع‌های پایدار شکل ریاضی صریحی ندارند و توسط تابع مشخصه (Characteristic function) تعریف می‌شوند. تابع مشخصه یک توزیع دو متغیره پایدار دایروی در حالت کلی به شکل زیر است (Nikias, & Shao, 1994):

$$\varphi(\mathbf{w}) = \exp(j(\delta_i w_i + \delta_{i+1} w_{i+1}) - \gamma(w_i^2 + w_{i+1}^2)^{\alpha/2}) \quad (8)$$

که α نمای مشخصه، δ_i و δ_{i+1} ($-\infty < \delta < \infty$) پارامترهای مکان، و γ ($\gamma > 0$) پراکنندگی توزیع است. با توجه به این که این مدل به ضرایب تفصیل موجک اعمال خواهد شد،

فضای موجک مختلط پیاده‌سازی خواهد شد. تبدیل موجک مختلط دارای خواص عدم حساسیت به انتقال و جهت‌دار بودن در زوایای $\pm 15^\circ$ ، $\pm 45^\circ$ و $\pm 75^\circ$ است. ویژگی عدم حساسیت به انتقال باعث خواهد شد که اثر شبه گیبز (Pseudo Gibbs phenomenon) در تصویر نهایی به کمترین مقدار برسد. از طرفی گزینش جهت بهتر این تبدیل نسبت به تبدیل موجک استاندارد امکان تفکیک سیگنال را از نوفه در جهات مختلف ممکن ساخته و بنابراین لبه و خطوط در جهت‌های مختلف تصویر با کیفیت بهتری حفظ خواهند شد. مقایسه‌های کیفی و کمی روش پیشنهادی با روش‌های جدید کاهش نوفه اسپیکل در تصاویر SAR، نشان از عملکرد بهینه این الگوریتم دارد.

۲-۲. نوفه اسپیکل در تصاویر SAR

اسپیکل به واسطه اثرهای سازنده و مخرب امواج بازتاب یافته از هدف در محل سنجنده به وجود می‌آید و به صورت نقاط تاریک و روشن در تصویر ظاهر می‌شود. این نوفه کیفیت تصاویر SAR و توانایی تفسیر آنها را به شدت کاهش می‌دهد. می‌توان نشان داد دامنه میدان مختلط حاصل از این برخوردهای تصادفی دارای مؤلفه‌های حقیقی و موهومی E_r و E_i تابع چگالی احتمال توأم گوسی با واریانس σ^2 به شکل زیر خواهد بود (Ulaby & Dobson, 1989; Goodman, 1976):

$$P(E_r^2, E_i^2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{E_r^2 + E_i^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

چنانچه دامنه امواج بازگشتی در گیرنده آشکار شود، با اندازه فazor $f = (E_r^2 + E_i^2)^{1/2}$ سروکار خواهیم داشت. این اندازه برای نوفه اسپیکل دارای توزیع ریلی با میانگین واحد است (Goodman, 1976):

$$p(f) = \begin{cases} \frac{\pi f}{2} \exp\left(-\frac{\pi f^2}{4}\right) & f \geq 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases} \quad (2)$$

می‌توان با میانگین‌گیری از N تصویر مشابه با الگوهای مستقل اسپیکل، میزان نوفه را کاهش داد. در این صورت توزیع نوفه با N کانولوشن پی‌درپی توزیع ریلی (Rayleigh distribution) به دست می‌آید (Xie et al., 2002).

۳-۳. پیش‌پردازش تصاویر SAR

در این بخش به معرفی مراحل پیش پردازش تصاویر SAR به منظور اعمال الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. ابتدا به کمک تبدیل لگاریتمی، نوفه ضرب شونده اسپیکل را به نوفه‌ای جمع‌شونده تبدیل می‌نماییم. به این ترتیب، به کمک این مدل ساده برای نوفه، قادر خواهیم بود الگوریتم پیشنهادی که بر مبنای مدل نوفه جمع‌شونده در فضای موجک است را اعمال کنیم. آنگاه به معرفی تبدیل موجک مناسب برای تجزیه تصویر لگاریتمی خواهیم پرداخت.

۳-۱. تبدیل لگاریتمی

نشان داده شده است که اسپیکل به صورت نوفه‌ای ضرب شونده در تصاویر SAR قابل مدل‌سازی است (Ulaby & Dobson, 1989). بنابراین یک مدل ساده برای تصویر SAR به صورت زیر است:

$$V(x,y) = S(x,y) \cdot F(x,y) \quad (3)$$

که در این رابطه V و S و F به ترتیب داده نوفه‌ای، سیگنال و نوفه را نشان می‌دهد. برای تبدیل نوفه ضرب‌شونده به جمع‌شونده تبدیل لگاریتمی از هر دو طرف رابطه (3) گرفته می‌شود:

$$D(x,y) = C(x,y) + N(x,y) \quad (4)$$

که $N(x,y)$ نوفه جمع‌شونده است و $C(x,y)$ و $D(x,y)$ به ترتیب تبدیل لگاریتمی

به صورت عددی را برای چهار مقدار مختلف α نمایش می‌دهد. همان طور که از شکل پیداست، به ازای مقادیر مختلف α ، γ و σ_n ، ناحیه مجاله‌سازی رویه دو بعدی (یعنی ناحیه‌ای که ضرایب به شدت مجاله می‌شوند) کوچک‌تر یا بزرگ‌تر می‌شود، اما شکل کلی آن ثابت است. همچنین مشخص است که مجاله‌سازی یک ضریب نه تنها به اندازه خودش وابسته است (مانند روش پیشنهادی، Achim et al., 2003, 2001)، بلکه به مقدار ضریب متناظرش در مقیاس تجزیه بعدی (یعنی به مقدار والدش) نیز وابسته خواهد بود. پس از برآورد ضرایب سیگنال از ضرایب نوفه‌ای، تصویر بازیافتی $(\hat{V}(x,y))$ با اعمال تبدیل معکوس موجک و آنگاه تبدیل نمایی به دست می‌آید.

۷- نتایج عملی

در این بخش، روش پیشنهادی بهبود کیفیت تصاویر SAR را با چندین روش جدید دیگر مقایسه کرده و نتایج را به صورت کمی و کیفی مورد بررسی و تحلیل قرار خواهیم داد. به این منظور الگوریتم پیشنهادی بر روی دو گروه از تصاویر آزمایش خواهد شد. در آزمایش اول، نوفه اسپیکل شبیه‌سازی شده به یک تصویر بدون نوفه SAR اضافه شده و آنگاه کارایی روش‌های مختلف حذف نوفه اسپیکل به صورت کمی و کیفی مقایسه خواهد شد. آزمایش دوم بر روی تصاویر واقعی نوفه‌ای SAR انجام می‌شود. در این مرحله تصویر بدون نوفه اولیه در دسترس نیست و تنها به مقایسه کیفی تصاویر پرداخت خواهد شد. در کلیه آزمایش‌ها، ابتدا ضرایب موجک لگاریتم تصویر به کمک الگوریتم موجک مختلط دو شاخه اخذ می‌شود و تعداد سطوح تجزیه موجک به کار رفته ۵ است. از آن جا که از تبدیلی متعامد (Orthogonal transform) استفاده می‌شود، امکان طراحی فیلترهایی که به طور کامل متقارن باشند وجود ندارد. به همین منظور از فیلترهای متعامد فراس که دارای بیشترین تقارن در میان فیلترهای طراحی شده برای تبدیل موجک مختلط هستند، استفاده می‌شود. همچنین فیلترهای فراس (Farras filter) طوری طراحی شده‌اند که از نظر داشتن بیشترین ممان میرا در مقابل کمترین طول بهینه هستند (Abdelnour & Selesnick, 2004). روش‌های انتخابی برای مقایسه با الگوریتم پیشنهادی، (۱) فیلتر حوزه مکان لی (Lee, 1980)، (۲) فیلتر حوزه بسامد وینر (Jain, 1989)، (۳) آستانه‌گذاری نرم در فضای موجک (Donoho, 1995) و (۴) الگوریتم بایزین WINSAR (Achim et al., 2003) هستند.

۷-۱. آزمایش اول

آزمایش اول بر روی یک تصویر SAR 256×256 پیکسل انجام می‌شود. در این آزمایش ابتدا تصویر توسط فیلتر وینر فیلتر می‌شود و تصویر حاصل به عنوان تصویر عاری از نوفه اسپیکل فرض می‌شود. آنگاه نوفه اسپیکل شبیه‌سازی شده به آن اضافه می‌شود (Achim et al., 2003). در این آزمایش تصویر بدون نوفه اولیه در دسترس است، بنابراین می‌توان با استفاده از معیارهایی به صورت کمی الگوریتم‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. در ارزیابی نتایج، دو معیار نسبت سیگنال به نوفه (SNR) و معیار حفظ لبه (β) به کار رفته است. نسبت سیگنال به نوفه کارایی یک روش را در حذف نوفه اسپیکل نشان می‌دهد و از رابطه زیر قابل محاسبه است (Raney & Wessels, 1988; Sattar et al., 1997):

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{x,y} (S(x,y))^2}{K \times L \times MSE} \right) \quad (16)$$

که K و L ابعاد تصویر و $\hat{S}(x,y)$ تصویر بازیابی شده است. میانگین مربع خطا (MSE) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

توزیع گوسی در حالت $\alpha=2$ و داشتن خواص توزیع‌های با دنباله طولانی به ازای مقادیر کوچک‌تر α ، توان مدل‌سازی ضرایب موجک تصاویر گوناگون را به خوبی دارد. اکنون با داشتن توزیع مؤلفه‌های سیگنال و نوفه در رابطه (۶)، پس از برآورد متغیرهای مورد نیاز، می‌توان با طراحی یک تخمینگر دو متغیره بیز، سیگنال را با دقت مناسبی از ضرایب نوفه‌ای موجک برآورد کرد.

۵- برآورد متغیرهای سیگنال و نوفه

پیش از طراحی تخمینگر دو متغیره بیز برای جداسازی سیگنال از نوفه، لازم است متغیرهای سیگنال و نوفه برای هر دو مقیاس مجاور برآورد شود. برای توزیع سیگنال دو متغیره مجهول α و γ و برای توزیع نوفه یک متغیره مجهول σ_n مورد نیاز است. بر اساس رابطه (۶)، تابع چگالی احتمال ضرایب نوفه‌ای موجک با کانولوشن توابع چگالی احتمال سیگنال و نوفه به دست می‌آید. از آنجایی که فرم بسته‌ای برای تابع چگالی احتمال پایدار وجود ندارد، لذا این رابطه در حوزه بسامد توسط توابع مشخصه مربوطه به شکل زیر قابل تعریف است (Papoulis & Pillai, 2002):

$$\varphi_d(\mathbf{w}) = \varphi_s(\mathbf{w}) \cdot \varphi_n(\mathbf{w}) \quad (9)$$

که $\varphi_d(\mathbf{w})$ ، $\varphi_n(\mathbf{w})$ و $\varphi_s(\mathbf{w})$ به ترتیب توابع مشخصه سیگنال، نوفه و ضرایب نوفه‌ای هستند. $\varphi_n(\mathbf{w})$ و $\varphi_s(\mathbf{w})$ توسط روابط زیر قابل بیانند:

$$\varphi_n(\mathbf{w}) = \exp(-\gamma(w_i^2 + w_{i+1}^2)^{\alpha/2}) \quad (10)$$

$$\varphi_s(\mathbf{w}) = \exp\left(-\frac{\sigma_n^2(w_i^2 + w_{i+1}^2)}{2}\right) \quad (11)$$

اکنون متغیرهای مجهول این دو توزیع با کمینه کردن مربع خطای مربوط به برازش رابطه (۹) بر تابع ویژگی تجربی ضرایب موجک $\varphi_d(\mathbf{w})$ به دست می‌آیند:

$$\{\hat{\sigma}_n, \hat{\alpha}, \hat{\gamma}\} = \arg \min_{\sigma_n, \alpha, \gamma} \int \int [\varphi_d(\mathbf{W}) - \varphi_s(\mathbf{W})]^2 d\mathbf{W} \quad (12)$$

به منظور سادگی بیشتر می‌توان واریانس نوفه را از ضرایب اولین سطح تجزیه موجک بر اساس رابطه زیر برآورد کرد (Donoho & Johnstone, 1994):

$$\hat{\sigma}_n^2 = \left[\frac{\text{median}(|d_i|)}{0.6745} \right]^2 \quad (13)$$

۶- تخمینگر دو متغیره بیز

پس از برآورد پارامترهای توزیع سیگنال و نوفه، اکنون هدف طراحی یک تخمینگر دو متغیره بیز است. با کمینه کردن یک تابع تلفات (Loss function) درجه دو، تخمینگر بیز توسط میانگین شرطی حاشیه‌ای c_i با داشتن d قابل بیان است (Forouzanfar, 2007):

$$\hat{c}_i(\mathbf{d}) = \arg \min_c \int \int (c_i - c)^2 p_{\text{oid}}(\mathbf{c}|\mathbf{d}) d\mathbf{c} = \int \int c_i p_{\text{oid}}(\mathbf{c}|\mathbf{d}) d\mathbf{c} \quad (14)$$

با اعمال قانون بیز داریم:

$$\hat{C}_i(\mathbf{d}) = \frac{\int \int p_n(\mathbf{d}-\mathbf{c}) p_c(\mathbf{c}) c_i d\mathbf{c}}{\int \int p_n(\mathbf{d}-\mathbf{c}) p_c(\mathbf{c}) d\mathbf{c}} = \frac{\int \int p_n(\mathbf{n}) p_c(\mathbf{c}) c_i d\mathbf{c}}{\int \int p_n(\mathbf{n}) p_c(\mathbf{c}) d\mathbf{c}} \quad (15)$$

تخمینگر پیشنهادی فرم بسته‌ای ندارد، بنابراین لازم است به صورت عددی محاسبه شود. در این تخمینگر مجاله‌سازی (Shrinkage) یک ضریب موجک نه تنها تابعی از اندازه آن ضریب است، بلکه تابعی از ضریب متناظر موجک در مقیاس بعدی نیز است. با استخراج این وابستگی‌های بین مقیاسی، انتظار می‌رود بهبود مناسبی در نتایج حذف نوفه به‌دست‌آید. شکل ۱ رویه ورودی- خروجی محاسبه شده

به منظور کاهش نوفه اسپکل و حفظ جزئیات و لبه‌ها است. بنابراین از نقطه نظر کیفی نیز به نظر می‌رسد روش ارائه شده عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های دیگر دارد. همانطور که دیده می‌شود این نتایج بر نتایج بخش پیش و جدول ۱ منطبق هستند.

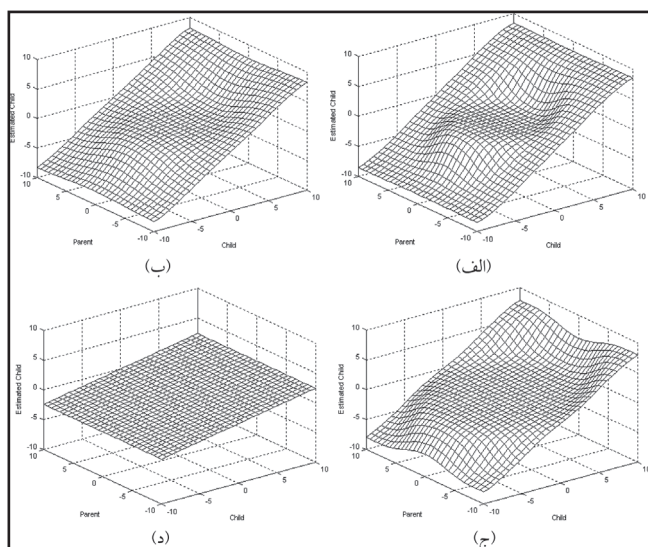
۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای کاهش نوفه اسپکل در فضای موجک با به کارگیری یک الگوریتم جدید برای استخراج وابستگی‌های بین مقیاسی ارائه شد. به این منظور توزیع دو متغیره پایدار همسانگرد برای مدل‌سازی مؤلفه سیگنال ضرایب موجک پیشنهاد شد، حال آن که مؤلفه نوفه توسط توزیع دو متغیره گوسی تقریب زده شد. استفاده از توزیع پایدار این برتری را دارد که به علت داشتن خواص دنباله طولانی، قادر است با تنظیم درست متغیرهایش مجموعه وسیعی از سیگنال‌ها را با دقت خوب مدل‌سازی نماید.

به منظور برآورد بهترین مقدار سیگنال عاری از نوفه، یک تخمینگر جدید دو متغیره بر اساس قانون بیز طراحی شد که توابع توزیع ضرایب موجک سیگنال و نوفه را به عنوان اطلاعات اولیه به کار می‌برد. این تخمینگر مانند یک آشکارساز، عوارض خطی و لبه‌ها را در تصویر آشکار می‌سازد. با وجود مزایایی که الگوریتم ارائه شده دارد، از نظر محاسباتی گران است. بویژه برآورد متغیرهای توابع توزیع سیگنال و نوفه به عنوان وقت‌گیرترین مرحله محاسباتی در این الگوریتم به شمار می‌آید. استفاده از الگوریتم‌های مؤثرتر در برآورد متغیرهای مجهول منجر به کاهش هزینه محاسباتی الگوریتم مربوطه می‌شود.

سپاسگزاری

به این وسیله از مرکز تحقیقات مخابرات ایران به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این پروژه تقدیر به عمل می‌آید.



شکل ۱- رویه ورودی- خروجی پردازنده بیز پیشنهادی در رابطه (۱۵) به ازای نسبت ثابت $\sigma_1/\gamma=2.5$ و چهار مقدار مختلف α : الف) $\alpha=0.5$ ، ب) $\alpha=1.5$ ، ج) $\alpha=1.95$ و د) $\alpha=2.5$.

$$MSE = \frac{\sum_{x,y} [\hat{S}(x,y) - S(x,y)]^2}{K \times L} \quad (17)$$

مقادیر کوچک MSE و مقادیر بزرگ SNR نشان از عملکرد مناسب یک الگوریتم حذف نوفه دارند. از آن جا که حفظ جزئیات تصویر در یک الگوریتم حذف نوفه اهمیت بالایی دارد، لذا از معیار حفظ لبه نیز استفاده می‌کنیم. معیار حفظ لبه نیز از رابطه زیر به دست می‌آید (Sattar et al., 1997):

$$\beta = \rho(\Delta\hat{S}, \Delta S) \quad (18)$$

$$\rho(\hat{S}, S) = \frac{E(\hat{S}, S) - E(\hat{S})E(S)}{\sqrt{[E(\hat{S})^2 - E^2(\hat{S})] \cdot [E(S)^2 - E^2(S)]}} \quad (19)$$

که E و Δ به ترتیب عملگرهای امید ریاضی و لاپلاسی هستند. مقادیر نزدیک به ۱ معیار β عملکرد مناسب یک الگوریتم حذف نوفه را نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی نوفه اسپکل به ترتیب زیر عمل می‌کنیم (Raney & Wessels, 1988):

- یک میدان مختلط گوسی مطابق با رابطه (۱) ایجاد می‌نماییم.
- میدان متجه را از یک فیلتر پایین‌گذر (به منظور ایجاد الگوی اسپکل همبسته) عبور می‌دهیم. نشان داده شده است که بهترین فیلتر پایین‌گذر برای ایجاد الگوی اسپکل همبسته یک فیلتر 3×3 به شکل زیر است (Bolter et al., 1996):

$$\frac{1}{8} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- اندازه خروجی فیلتر را به دست می‌آوریم.

- حاصل را به‌نجار می‌نماییم.

با انتخاب انحراف معیارهای مختلف برای میدان گوسی در رابطه (۱) می‌توان به سطوح مختلفی از نوفه اسپکل دست یافت. در این پژوهش، آزمایش را در سطح مختلف نوفه متناظر با $\sigma=0.17$ ، $\sigma=0.26$ ، $\sigma=0.33$ انجام می‌دهیم.

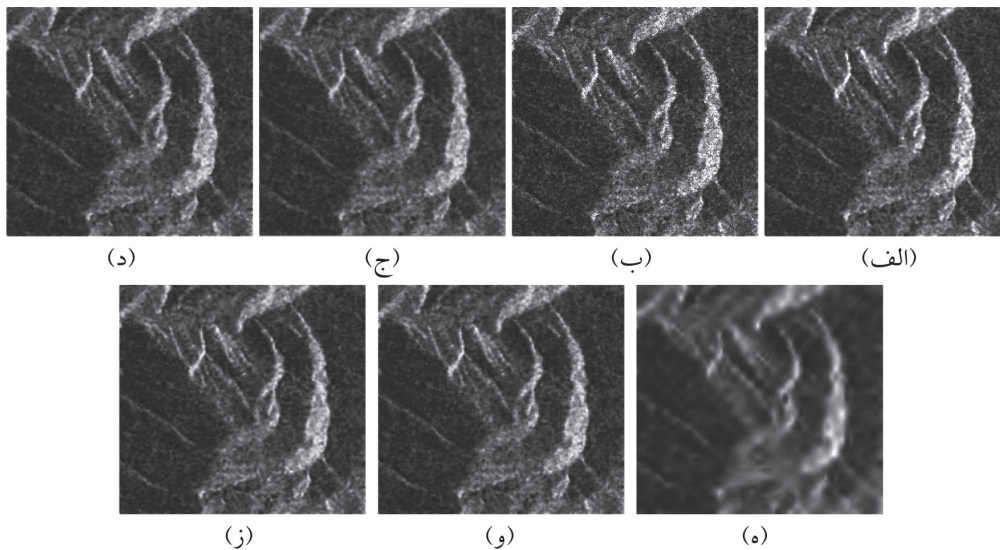
جدول ۱ نتایج حذف نوفه اسپکل از تصویر مورد نظر، برای این سه سطح نوفه نشان می‌دهد. همچنین تصویر SAR مورد نظر و نتایج بهبود کیفیت روش‌های مختلف در شکل ۲ آمده است. با توجه به جدول ۱ و شکل ۲، مشخص است که فیلترهای حوزه مکان و بسامد در حذف نوفه اسپکل و حفظ جزئیات تصویر ناموفق هستند. همچنین روش آستانه‌گذاری ضرایب موجک باعث محو شدن تصویر خواهد شد. این در حالی است که روش پیشنهادی در حذف نوفه و حفظ جزئیات بسیار مؤثرتر نسبت به روش‌های بیان شده عمل می‌نماید.

۷-۲. آزمایش دوم

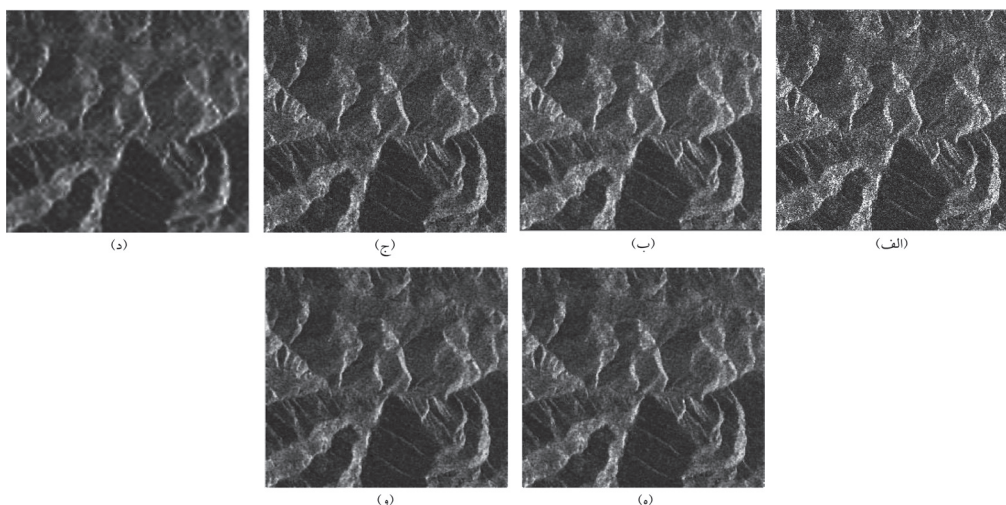
آزمایش دوم بر روی تصاویر واقعی SAR حاوی نوفه اسپکل انجام می‌شود. در این آزمایش دسترسی به تصویر اولیه بدون نوفه ممکن نیست، بنابراین تنها به مقایسه کیفی نتایج پرداخته می‌شود. شکل ۳ نتایج روش‌های مختلف بهبود کیفیت بر روی یک تصویر واقعی 512×512 پیکسل SAR را نشان می‌دهد. با دقت بیشتر در این شکل ملاحظه می‌شود که فیلترهای لی و وینر در حذف نوفه و حفظ جزئیات چندان موفق عمل نمی‌کنند. همچنین روش آستانه‌گذاری ضرایب موجک با وجود کاهش نوفه اسپکل در نواحی همگن تصویر، بسیاری از جزئیات و بافت اصلی تصویر را محو یا حذف نموده است. در این میان روش بایزین WINSAR توانسته است نتایج خوبی در حذف نوفه اسپکل و حفظ جزئیات کسب نماید. همچنین روش پیشنهادی تا حدودی نتایج بهتری نسبت به فیلتر WINSAR کسب نموده است که این بهبود ناشی از استفاده از اطلاعات بین مقیاسی ضرایب موجک

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف حذف نوفه اسپیکل در سه سطح مختلف نوفه با انحراف معیارهای $\sigma=0.17$ ، $\sigma=0.26$ و $\sigma=0.33$

$\sigma=0.17$		$\sigma=0.26$		$\sigma=0.33$		معیار روش
β	SNR	β	SNR	β	SNR	
۰/۵۱	۱۵/۵۳	۰/۳۹	۱۲/۰۲	۰/۳۲	۱۰/۴۶	تصویر نوفه‌ای
۰/۴۰	۱۴/۸۱	۰/۴۴	۱۴/۱۱	۰/۴۱	۱۳/۶۴	روش ۱
۰/۶۷	۱۸/۰۱	۰/۶۱	۱۶/۰۵	۰/۵۵	۱۴/۹۵	روش ۲
۰/۴۸	۱۳/۵۸	۰/۴۷	۱۲/۶۷	۰/۴۴	۱۲/۲۹	روش ۳
۰/۷۱	۱۹/۵۳	۰/۶۶	۱۶/۵۱	۰/۶۳	۱۵/۲۴	روش ۴
۰/۷۶	۲۰/۲۲	۰/۷۰	۱۷/۱۵	۰/۶۵	۱۵/۳۱	روش پیشنهادی



شکل ۲- مقایسه نتایج حذف نوفه اسپیکل شبیه‌سازی شده توسط روش‌های مختلف: (الف) تصویر بدون نوفه (ب) تصویر نوفه‌ای با نسبت سیگنال به نوفه $10/46$ دی بی، (ج) روش لی، (د) روش وینر، (ه) روش آستانه‌گذاری نرم ضرایب موجک، (و) روش WINSAR، (ز) روش پیشنهادی



شکل ۳- مقایسه روش‌های حذف نوفه اسپیکل بر روی یک تصویر واقعی (SAR: الف) تصویر نوفه‌ای، (ب) روش لی، (ج) روش وینر، (د) روش آستانه‌گذاری نرم ضرایب موجک، (ه) روش WINSAR، (و) روش پیشنهادی

References

- Abdelnour, A. F. & Selesnick, I. W., 2004-Symmetric nearly orthogonal and orthogonal nearly symmetric wavelets, *The Arabian Journal of Science and Engineering*, 29: 3-16.
- Achim, A., Tsakalides, P. & Bezerianos, A., 2001- Novel Bayesian method for speckle removal in medical ultrasound images, *IEEE Trans. Medical Imaging*, 20: 772-783.
- Achim, A., Tsakalides, P. & Bezerianos, A., 2003-SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on Heavy-Tailed modeling, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 41: 1773-1784.
- Bolter, R., Gelautz, M. & Franz, L., 1996- SAR speckle simulation, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 21:20-25.
- Dijkerman, R. W. & Mazumdar, R. R., 1994-Wavelet representations of stochastic processes and multiresolution stochastic models, *IEEE Trans. Signal Process.*, 42: 1640-1652.
- Donoho, D. L. & Johnstone, I. M., 1994- Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, *Biometrika*, 81: 425-455.
- Donoho, D. L., 1995- De-Noiseing by soft-thresholding, *IEEE Trans. Info. Theory*, 41: 613-627.
- Forouzanfar, M., 2007- Improvement of the wavelet domain Bayesian estimator algorithm for despeckling of medical ultrasound images, M. S. thesis, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
- Frost, V. S., Stiles, J. A., Shanmugan, K. S. & Holtzman, J. C., 1982- A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, PAMI-4: 157-165.
- Goodman, J. W., 1976- Some fundamental properties of speckle, *Journal of Optical Society of America*, 66: 1145-1150.
- Jain, A. K., 1989- Fundamentals of digital image processing, Prentice-Hall.
- Lee, J. S., 1980- Digital Image enhancement and noise filtering by using local statistics, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, PAMI-2: 286-294.
- Liu, J. & Moulin, P., 2001- Information-Theoretic analysis of interscale and intrascale dependencies between image wavelet coefficients, *IEEE Trans. Image process.*, 10: 1647-1658.
- Mallat, S., 1998- A wavelet tour of signals processing, Academic Press, 1998.
- Nikias, C. L. & Shao, M., 1994- Signal processing with alpha-stable distributions and applications, Chapman and Hall.
- Oliver, C. & Quegan, S., 1998- Understanding Synthetic Aperture Radar Images, Boston, MA: Artech House.
- Papoulis, A. & Pillai, S. U., 2002- Probability, random variables and stochastic processes, McGraw-Hills.
- Park, J. M., Song, W. J. & Pearlman, W. A., 1999- Speckle filtering of SAR images based on adaptive windowing, *IEE Proc. Visoan Image Signal Process.*, 146: 191-197.
- Raney, R. K. & Wessels, G. J., 1988- Spatial consideration in SAR speckle simulation, *IEEE Trans. Geoscience and remote sensing*, 26: 666-672.
- Sattar, F., Floreby, L., Salomonsson, G. & Lovstrom, B., 1997- Image Enhancement Based on a Nonlinear Multiscale Method, *IEEE Trans. Image process.*, 6: 888-895.
- Selesnic, I. W., Baraniuk, R. G. & Kingsbury, N. G., 2005- The dual-tree complex wavelet transform, *IEEE signal processing magazine*, 22: 123-151.
- Sendur, L. & Selesnick, I. W., 2002- Biavriate shrinkage functions for wavelet-based denoising exploiting interscale dependency, *IEEE Trans. Signal Process.*, 50: 2744-2756.
- Sendur, L. & Selesnick, I. W., 2002- Bivariate shrinkage with local variance estimation, *IEEE Signal Processing Letters*, 9: 438-441.
- Shi, K. & Fung, B., 1994- A Comparison of Digital Speckle Filters, *Proceedings of IGRASS94, Pasadena, USA*.
- Ulaby, F. T. & Dobson, M. C., 1989- Handbook of radar scattering statistics for terrain, Artech House.
- Valadan-Zoej, M., Abrishami-Moghaddam, H. & Dehghani, M., 2005- An Efficient Algorithm for Speckle Reduction in SAR Images Using Wavelet Transformation, *Geosciences Journal, Geological Survey of Iran*, 54: 108-113.
- Xie, H., Pierce, L. E. & Ulaby, F., 2002- Statistical properties of logarithmically transform speckle, *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, 40: 721-727.
- Yu, Y. & Acton, S.T., 2002- Speckle reducing anisotropic diffusion, *IEEE Trans. Image process.*, 11: 1260-1270.