



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.12, No. 2, Summer 2020

۱-۱۸

## کاهش اثر اسپکل در تصاویر رادار با روزنه مصنوعی، بر مبنای فیلترینگ تطبیقی طیف اندازه در حوزه فرکانس

حمید جنتی<sup>۱\*</sup> و محمد جواد ولدان زوج<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی

۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

### چکیده

وجود اسپکل در تصاویر رادار با روزنه مصنوعی، به دلیل سیستم تصویربرداری همدوس، باعث ایجاد اثر دانه دانه در تصویر شده و برخی پردازش‌های شی‌گرا همانند قطعه‌بندی، خوشه‌بندی و یا شناسایی هدف را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو می‌توان اغلب الگوریتم‌های مورد استفاده در کاهش اثر اسپکل را در یکی از روش‌های مبتنی بر حوزه مکان، روش‌های مبتنی بر تبدیل و یا روش‌های وابسته به بهینه‌سازی طبقه‌بندی کرد. از جمله محدودیت‌های موجود در روش‌های مورد استفاده اغلب می‌توان به عدم حفظ بافت و ساختار تصویر و نیز وابستگی اجرای الگوریتم به یک یا چند پارامتر تنظیم‌کننده اشاره کرد که همین موضوع، استفاده از این روش‌ها را در کاربردهای عملی با چالش رو به رو می‌سازد. از این رو در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن رفتار فرکانسی تصاویر SAR، روشی بر مبنای فیلترینگ تطبیقی طیف اندازه در حوزه فرکانس ارائه شده است. ایده اصلی روش پیشنهادی تخصیص یک مدل تحلیلی بر مبنای رفتار فرکانسی تصویر SAR، به طیف اندازه تبدیل فوریه آن و بازبایی خروجی با اثر اسپکل کاهش یافته است. روش پیشنهادی ضمن حفظ بافت‌های ظریف تصویر، به طور قابل ملاحظه‌ای اثر اسپکل را کاهش می‌دهد. علاوه بر آن الگوریتم پیشنهادی به صورت خودکار اجرا شده و نیازی به برآورد پارامترهای تنظیمی ندارد. همچنین در تصاویر با پیچیدگی بافت زیاد و در روش‌های کانولوشن مکانی که نیاز به تنظیم ابعاد کرنل دارد، مرتبه محاسباتی پایین‌تری خواهد داشت. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با فیلترهای مکانی تطبیقی، ضمن بهبود ۵۰ درصدی شاخص تعداد منظرهای معادل در تصاویر SAR، مقدار شاخص حفظ لبه را نیز به طور میانگین برای تصاویر SAR و شبیه‌سازی SAR حدوداً 50 و 30 درصد بهبود می‌بخشد.

**کلیدواژه‌ها:** تصاویر SAR، کاهش اسپکل، تبدیل فوریه، فیلترینگ غیر خطی، طیف اندازه

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی عصر (عج)، تقاطع میرداماد، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تلفن: ۰۹۱۸۳۰۷۰۸۹۶.

## ۱- مقدمه

می‌سازد. بر همین اساس با در نظر گرفتن توزیع گاما برای اثر اسپکل و نیز تصویر، روش‌های دیگری بر مبنای بیشینه احتمال ثانویه<sup>۱</sup> (MAP) ارائه شد تا اطلاعات دقیق‌تری از نوسانات بافت تصویر در اختیار قرار گیرد (Lopez et al., 1990; ezry et al., 1992). از دیگر رویکردهای کاهش اسپکل، روش‌های مبتنی بر تبدیل نظیر تبدیل موجک است که با اصلاح ضرایب موجک صورت می‌پذیرد (Argenti and Alparone, 2002; Ranjani and Tthiruvengadam, 2010; Solbo and Eltoft, 2004; Bianchi et al., 2008). تبدیل پیچک و باندلت نیز از جمله روش‌های مبتنی بر تبدیل هستند که جهت تطبیق بهتر لبه‌ها به صورت دو بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zhang et al., 2010; Li et al., 2011, Deledalle et al., 2014). رویکرد دیگر کاهش اسپکل به کارگیری روش‌های غیر محلی است؛ بدین صورت که با در نظر گرفتن یک پنجره اطراف پیکسل یک قطعه تشکیل داده و از تمام قطعات مشابه با این قطعه در کل تصویر به صورت وزن‌دار مقدار اصلاح شده پیکسل تعیین می‌شود (Deledalle et al., 2012; Parilli et al., 2015). از مشکلات اصلی این روش تعیین یک معیار مناسب جهت برآورد میزان شباهت بین قطعات مختلف در تصویر است. به علاوه مقایسه قطعات مختلف در تصویر و جستجوی قطعات مشابه بار پردازشی بالایی را می‌طلبد. روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی گروه دیگری از روش‌های کاهش اسپکل هستند که در آنها با ایجاد یک تابع هزینه متشکل از نرم  $p$  تفاضل تصویر اصلی و تصویر فیلتر شده و نیز مجموع نوسانات تصویر نویزی، پاسخ بهینه برای تصویر فیلتر شده تعیین می‌شود (Aubert and Aujol, 2008; wang et al., 2008; kang et al., 2013). هرچند که این چنین روش‌هایی نتایج قابل قبولی به دست می‌دهند، اما معمولاً تعیین ضریب تنظیم کننده بین دو ترم تابع بهینه‌سازی برای تصاویر و داده‌های مختلف متفاوت بوده و خروجی نهایی شدیداً به این پارامتر وابسته است.

بهره‌برداری از تصاویر رادار با روزنه مصنوعی<sup>۱</sup> (SAR) به دلیل استفاده در شرایط آب و هوایی مختلف، استفاده در شب و نیز فراهم کردن اطلاعات فیزیکی متنوع، مورد توجه است. تصاویر به دست آمده از این روش، به دلیل ماهیت تصویربرداری همدوس و نیز پیچیدگی اهداف مورد تصویر برداری، دارای اثر اسپکل است. این اثر، باعث دانه دانه شدن تصویر شده و تحلیل و پردازش آن را به ویژه در آنالیزهای شی‌گرا نظیر خوشه‌بندی و یا قطعه‌بندی با مشکل مواجه می‌کند. به همین دلیل، از دهه‌های گذشته تاکنون روش‌های مختلفی جهت کاهش اثر اسپکل ارائه شده است (Liu et al., 2017; Martino et al., 2016; Xu et al., 2015; Argenti et al., 2013).

یکی از روش‌های کاهش اثر اسپکل، چند منظر سازی است که با جمع ناهمدوس تصاویر اخذ شده از منظرهای مختلف آنتن، اثر اسپکل را کاهش می‌دهد که البته متقابلاً موجب کاهش توان تفکیک مکانی نیز می‌شود (Franceschetti and Lanari, 1999). از این‌رو یکی از رویکردهای موازی، استفاده از روش‌های پردازش تصویر جهت کاهش اثر اسپکل است. در هر یک از این روش‌ها سعی می‌شود تا ضمن کاهش اثر اسپکل در مناطق همگن از تصویر، بافت اصلی تصویر نظیر لبه‌ها به خوبی حفظ شود. بر همین اساس روش‌های مختلف مورد استفاده بر مبنای برخی شاخص‌های اساسی (Nugroho et al., 2016) قابل ارزیابی خواهند بود. یک دسته از روش‌های توسعه یافته برای کاهش اثر اسپکل روش‌های مبتنی بر فیلترهای تطبیقی در حوزه مکان است که با استفاده از یک پنجره ثابت لغزان، برخی پارامترهای آماری محلی و نیز اطلاعاتی از بافت موضعی تصویر استخراج کرده و سپس بر اساس آن شدت اعمال فیلتر و نرم سازی تصویر تنظیم می‌شود (Frost et al., 1982; Touzi et al., 1988; Lee, 1983; Lee et al., 2009). هرچند که تنظیم ابعاد پنجره مورد استفاده و نیز دانش قبلی در رابطه با توزیع نویز و نیز عدم آگاهی از اطلاعات دقیق بافت تصویر استفاده از این روش‌ها را با چالش مواجه

1. Synthetic Aperture Radar  
2. Maximum a Posterior

اندازه این عوارض در اختیار ما قرار می‌دهد. پاسخ یک عارضه نوعی در تصویر برداری رادار با روزنه مصنوعی و نحوه ثبت داده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۱، مقادیر ثبت شده برای موج بازگشتی را می‌توان به صورت رابطه ۱، بازنویسی کرد.

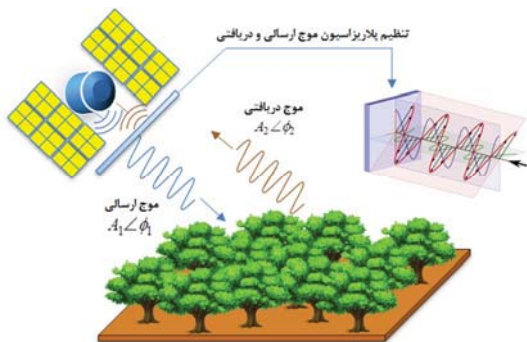
$$A_2 \angle \phi_2 = A_2 e^{j\phi_2} = x_2 + jy_2$$

$$x_2 = A_2 \cos \phi_2$$

$$y_2 = A_2 \sin \phi_2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{y_2}{x_2} \right)$$

$$A_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$$



شکل ۱. نحوه ثبت اطلاعات در تصویر برداری رادار با روزنه مصنوعی

در رابطه فوق  $A_2$  اندازه موج بازگشتی،  $\phi_2$  زاویه موج بازگشتی،  $x_2$  مولفه حقیقی موج بازگشتی،  $y_2$  مولفه موهومی موج بازگشتی و نهایتاً  $j$  واحد موهومی و برابر با  $\sqrt{-1}$  است. اگر حداقل سطح زمینی مورد برداشت توسط سنجنده را یک پیکسل در نظر بگیریم، در این صورت مقدار ثبت شده برای یک پیکسل برابر با حاصل جمع همدوس تمام مولفه‌های بازتاب کننده در سطح پیکسل خواهد بود. از این رو اهداف توزیع یافته با پراکنش گره‌های مختلف در سطح پیکسل می‌توان رابطه ۱ را به صورت رابطه ۲ بازنویسی کرده و مقدار آن را به عنوان مقدار مختلط ثبت شده برای پیکسل در نظر گرفت.

#### 1. Non-stationary

نظر به محدودیت‌های مطرح شده و با در نظر گرفتن شاخص‌های ارزیابی الگوریتم‌های کاهش اسپکل و نیز زمان اجرای پردازشی اغلب روش‌های مورد استفاده از چند منظر دارای نقاط ضعف نسبی هستند. برخی از این روش‌ها نیازمند تعیین یک یا چند پارامتر تنظیم کننده بوده و یا به صورت بالقوه توانایی محدودی در کاهش موثر اسپکل دارند. به علاوه برخی از این روش‌ها از نقطه نظر پردازشی دارای بار محاسباتی بالایی هستند. از این رو، در تحقیق حاضر روشی بر مبنای فیلترینگ تطبیقی طیف اندازه در حوزه فرکانس ارائه شده است که در آن طیف تصویر زمینه اصلی با اسپکل کاهش یافته از روی طیف اندازه تصویر اولیه دارای سطح اسپکل بالا تخمین زده می‌شود. در روش پیشنهادی بدون نیاز به استخراج آماره‌های محلی و نیز پردازش تصویر در فضای نایستای<sup>۱</sup> تصویر، ضمن بهبود اجرای الگوریتم در مقایسه با روش فیلترهای مکانی تطبیقی، پارامترهای مورد نیاز به صورت اتوماتیک استخراج شده و تمام تصویر به صورت یکپارچه پردازش می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصه‌های آماری تصاویر SAR

تصاویر SAR برخلاف تصاویر اپتیکی به صورت فعال اخذ می‌شوند (Oliver and Quegan, 2004). در این تصاویر موج الکترومغناطیس ارسالی پس از برخورد با عوارض زمینی، به سمت سنجنده بازتاب خواهد شد. گیرنده قرار گرفته در این نوع سنجنده‌ها در ساده‌ترین حالت علاوه بر بزرگی انرژی بازگشتی، فاز یا زاویه موج بازتاب شده را نیز ثبت می‌نمایند. علاوه بر آن توانایی ثبت موج بازگشتی در پلاریزاسیون‌های مختلف را نیز نسبت به پلاریزاسیون ارسالی مشخص داراست. بنابراین تصاویر رادار با روزنه مصنوعی حاوی اطلاعات متنوعی از ماهیت و کمیت عوارض فیزیکی روی زمین است. پارامترهای قابل اخذ در این نوع تصویر برداری شدیداً وابسته به پارامترهای فیزیکی عوارض بوده و از این رو عمدتاً اطلاعات مشخصی همانند بزرگی ضریب دی الکتریک، میزان رطوبت، زبری، شکل، توجیه و حتی

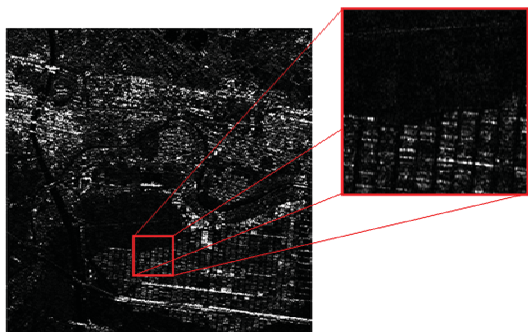
که در آن  $I$  تصویر اصلی،  $R$  بازتابندگی منطقه همگن،  $u$  فرایند اسپکل،  $r$  و  $c$  نیز موقعیت مکانی پیکسل تصویر هستند. با توجه به ضرب شونده بودن مدل نویزی، برای مناطق با  $R$  کوچک (شدت کمتر) اثر نویز کوچکتر بوده و برای مناطق با  $R$  بزرگتر (شدت بیشتر) اثر نویز بزرگتر خواهد بود. لذا مناطق روشن‌تر تصویر شدت دارای نویز بیشتری خواهد بود. در بسیاری از کاربردها به جای مدل ضرب شونده از مدل جمع شونده استفاده می‌شود که در آن اثر نویز در تمام شدت‌ها یکسان می‌باشد. به این منظور با استفاده از یک تبدیل هموگرافیک، مدل اسپکل ضرب شونده به مدل جمع شونده تبدیل می‌شود (رابطه ۵).

$$\begin{aligned} \ln I(r, c) &= \ln(R(r, c) \times u(r, c)) \\ \ln I(r, c) &= \ln R(r, c) + \ln u(r, c) \\ \Rightarrow I'(r, c) &= R'(r, c) + u'(r, c) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن  $\ln(\cdot)$  لگاریتم طبیعی،  $I'$  برابر با لگاریتم  $I$ ،  $R'$  لگاریتم  $R$  و نیز  $u'$  لگاریتم  $u$  است. باید توجه داشت که با لگاریتم‌گیری از مدل اسپکل با توزیع نمایی منفی، توزیع آن تبدیل به مدل گاوسی خواهد شد.

## ۲-۲- مشخصه‌های مکانی و فرکانسی تصاویر SAR

در برخی موارد و البته نه همه موارد، هدف نهایی از تحلیل تصویر SAR، ماهیتی همانند تصاویر اپتیکی چند طیفی و یا ابرطیفی دارد.



تصویر SAR هوایی از منطقه نیگاتا، ژاپن توسط سنجنده PISAR (پارامتر شدت) به همراه اثر فلفل نمکی اسپکل

شکل ۲. نمایش توزیع آماری متغیر شدت یک تصویر SAR واقعی به همراه اثر اسپکل در تصویر شدت

$$\begin{aligned} P &= A_1 \angle \phi_1 + A_2 \angle \phi_2 + \dots + A_n \angle \phi_n \\ &= A_1 e^{j\phi_1} + A_2 e^{j\phi_2} + \dots + A_n e^{j\phi_n} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$= \sum_{i=1}^n A_i e^{j\phi_i} = \sum_{i=1}^n (x_i + jy_i)$$

که در آن  $P$  مقدار پیکسل، مقدار  $A_i$  شدت پراکنش گر  $i$  ام، مقدار  $\phi_i$  فاز پراکنش گر  $i$  ام، مقدار  $x_i$  جز حقیقی پراکنش گر  $i$  ام و نهایتاً مقدار  $y_i$  نیز جز موهومی پراکنش گر  $i$  ام است. در این صورت رابطه مشخص کننده توزیع شدت بر اساس توزیع متغیرهای حقیقی و موهومی برابر با رابطه ۳ خواهد بود.

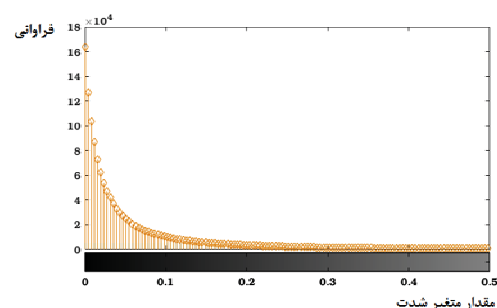
$$I^2 = X^2 + Y^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\rho(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right)$$

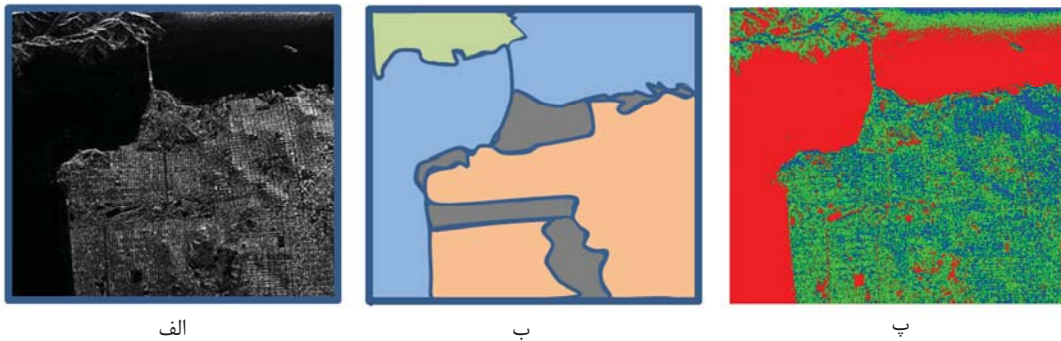
که در آن  $I$  متغیر شدت،  $X$  جز حقیقی و  $Y$  جز موهومی است. همچنین متغیر  $\sigma$  نشان دهنده انحراف معیار توزیع نمایی منفی یا گاما است. توزیع داده‌های اسپکل نیز همانند توزیع شدت بوده و از توزیع گاما یا نمایی منفی پیروی می‌نماید. مطابق با شکل ۲، توزیع شدت در یک تصویر SAR هوایی به همراه نمودار توزیع آماری آن به تصویر کشیده شده است. همچنین اثر پدیده اسپکل در تصویر شدت به خوبی قابل مشاهده است.

به منظور کاهش اثر اسپکل در تصاویر SAR، عمدتاً تصویر اصلی به صورت ترکیبی ضرب شونده از یک تصویر بازتابندگی منطقه همگن و اثر نویزی اسپکل مدل‌سازی می‌شود. از این رو می‌توان مدل ضربی تصویر را به صورت رابطه ۴ بیان کرد.

$$I(r, c) = R(r, c) \times u(r, c) \quad \text{رابطه (۴)}$$



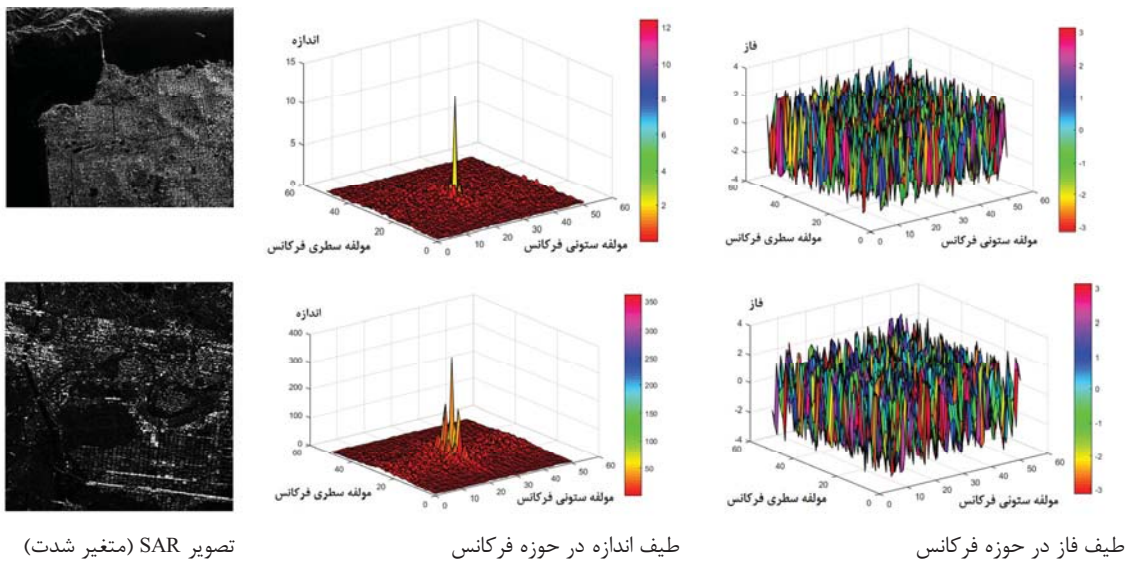
توزیع آماری داده‌های متغیر شدت (همانند اثر اسپکل) که از توزیع گاما پیروی می‌نماید



شکل ۳. الف: تصویر SAR هوایی اخذ شده توسط سنجنده AIRSAR، منطقه سانفرانسیسکو، کالیفرنیا، آمریکا  
ب: کلاس‌های مختلف قرار گرفته در تصویر، پ: قطعات مختلف با جزئیات تغییرات بافت تصویر

غالباً این تصاویر نیز حاوی کلاس‌های با ابعاد، اشکال و جهت گیری متفاوت از یکدیگر هستند (شکل ۳). این نکته، حائز اهمیت است که بافت‌های اصلی تصویر خود زیرمجموعه‌ای از این قطعات بزرگتر بوده و شامل تغییرات درجه خاکستری مختلف است. شاید نه از نقطه نظر فیزیکی اما از نقطه نظر فرکانسی، این تغییرات در تصویر شباهت بسیاری با تصاویر طبیعی اپتیکی دارد. اگر تصویر اخذ شده را (مشخصاً برای یک متغیر خاص مثلاً شدت) در نظر بگیریم، بافت تصاویر مشتمل بر لبه‌های مختلفی در زوایای مختلف فضای مکان تصویر است.

از جمله این موارد می‌توان به قطعه‌بندی و یا کلاس‌بندی تصویر اشاره کرد. در چنین شرایطی، ناحیه مورد مطالعه حاوی مناطق مختلفی است که هر کدام تشکیل یک کلاس را خواهند داد. از این رو با بهره‌مندی از روش‌های قطعه‌بندی به دنبال تفکیک هر یک از این مناطق و عوارض از یکدیگر هستیم. هرچند که ماهیت متغیر ثبت شده در تصاویر SAR با تصاویر اپتیکی متفاوت است، ولیکن آنچه موجب نگاه شناختی و شی گرا به این تصاویر می‌شود تفاوت موجود در پیکسل‌های متعلق به خانواده‌ها و کلاس‌های مختلف است. بنابراین



تصویر SAR (متغیر شدت)

طیف اندازه در حوزه فرکانس

طیف فاز در حوزه فرکانس

شکل ۴. تصاویر SAR به همراه طیف اندازه و فاز تصاویر در حوزه فرکانس

با توجه به شکل ۴، ناهمسانگردی کاهش نمایی هموگرافیک به ویژه در تصویر SAR بالایی به خوبی قابل مشاهده است. همچنین مطابق با شکل ۵ بر خلاف طیف اندازه، طیف فاز در تمام محدوده‌های فرکانسی توزیع شده است.

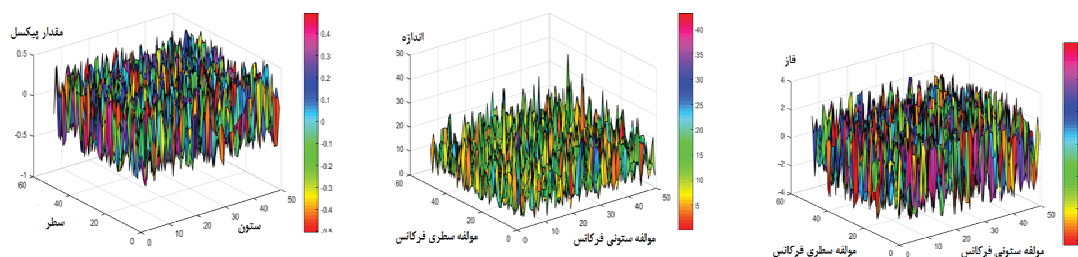
### ۳- روش پیشنهادی

همانطور که در بخش دوم عنوان شد، مدل چگالی طیفی توان در تصاویر طبیعی<sup>۱</sup> و نیز شبیه‌سازی اپتیکی به صورت هموگرافیک از فرکانس‌های کمتر به بیشتر کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که تصاویر اپتیکی معمولی با توجه به پیشرفت تکنولوژی و نیز روش‌های نوین انتقال اطلاعات دارای پایین‌ترین سطح نویز (نویز گاوسی) بوده و نسبت سیگنال به نویز آنها به مراتب بالاست. این موضوع در تصاویر SAR صدق نمی‌کند، چراکه ماهیت تشکیل مدل نویزی در این تصاویر مربوط به ماهیت و ذات تصویر برداری است. لذا آنچه در شکل ۴، تحت عنوان مدل طیف اندازه به تصویر کشیده شده است، به دلیل وجود مدل نویزی اسپیکل اندکی متفاوت از مدل ایده‌آل خواهد بود. لذا در روش پیشنهادی به دنبال راهکاری جهت رفع این مشکل هستیم. چگالی طیفی توان نویز گاوسی در فضای فرکانس مقداری ثابت است. در تصویر ۷، نویز سفید گاوسی به همراه طیف اندازه و فاز معادل آن نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۵ و در نظر گرفتن

با در نظر گرفتن شباهت بافت و قطعات مختلف بین تصاویر SAR و تصاویر طبیعی، چگالی طیفی توان این تصاویر نیز که ارتباط مستقیمی با طیف اندازه در فضای فرکانس (فضای تبدیل فوریه) دارد، به طور هموگرافیک از فرکانس‌های کمتر به بیشتر مطابق با رابطه ۶ کاهش می‌یابد (Torralba and Oliva, 2003).

$$\text{رابطه (۶)} \quad E[|I(f)|^2] \cong \psi \times \frac{1}{f^\zeta}$$

که در آن  $E[\cdot]$  امید ریاضی،  $I(f, \theta)$  تبدیل فوریه تصویر،  $\psi$  پارامتر مقیاس هموگرافیک،  $\zeta$  میرایی تابع هموگرافیک و نهایتاً  $\theta$  نیز پارامتر ناهمسانگردی تابع هموگرافیک است. نتیجه جالبی که از رابطه ۶ حاصل می‌شود این است که توان توزیع شده تصویر در فرکانس‌های مختلف از فرکانس کمتر به بیشتر به طور نمایی کاهش می‌یابد و تنها تفاوت تصاویر مختلف در پارامترهای تعریف شده تابع هموگرافیک است. البته جهت سادگی، رابطه ارائه شده برای سیگنال تک بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تعمیم آن به مدل‌های مرتبه بالاتر به سادگی امکان‌پذیر است. طبیعتاً با چنین تشابهی بین طیف اندازه فرکانسی تصاویر مختلف، عمده تفاوت در شکل بصری تصویر مربوط به طیف فاز تصویر خواهد بود. به همین دلیل عمده اطلاعات بافت تصویر در طیف فاز قرار می‌گیرد. لذا به نظر می‌رسد حفظ طیف فاز در برخی پردازش‌های تصویر ضروری باشد. در شکل ۴ دو تصویر SAR به همراه طیف اندازه و فاز حوزه فرکانس معادل نشان داده شده است.



شکل ۵. مدل نویز گاوسی در فضای مکان و نیز طیف اندازه و فاز آن در حوزه فرکانس طیف فاز نویز گاوسی در حوزه فرکانس طیف اندازه نویز گاوسی در حوزه فرکانس نویز گاوسی با میانگین صفر و واریانس 0.5

۱. منظور تصاویر غیر شبیه‌سازی است

$$E[|I(f_r, f_c, \theta)|^2] \cong (\psi_r(\theta) + \psi_c(\theta)) \times \frac{1}{f_r^{\zeta_r(\theta)} + f_c^{\zeta_c(\theta)}} + \varepsilon(r, c), \theta \in [0, 2\pi]$$

الف

$$E[|R(f_r, f_c, \theta)|^2] \cong (\psi_r(\theta) + \psi_c(\theta)) \times \frac{1}{f_r^{\zeta_r(\theta)} + f_c^{\zeta_c(\theta)}}, \theta \in [0, 2\pi]$$

ب

رابطه (۷)

در شکل ۶، به خوبی مشخص است که با اضافه شدن نویز به مدل تصویر اصلی طیف اندازه تخریب شده و یک مقدار تصادفی به مدل اصلی اضافه می‌شود. از آنجا که تغییرات با دامنه کوچک در تصویر که جز مولفه‌های فرکانس بالای طیف اندازه محسوب می‌شوند، دارای دامنه کوچکتري هستند به مراتب بیشتر از مولفه‌های فرکانس پایین دچار تخریب شده و مولفه‌های کوچکتر از اندازه نویز تقریباً از مدل طیف اندازه حذف می‌شوند.

از این رو با افزایش واریانس نویز مولفه‌های بیشتر از طیف اندازه تخریب می‌شوند. اکنون با در اختیار داشتن عملکرد و نحوه تاثیرگذاری نویز بر روی طیف اندازه می‌توان تاثیر مولفه‌های نویزی تصویر در فضای فرکانس را تضعیف نموده و اثر آن را در تصویر اصلی کاهش داد. خوشبختانه مولفه‌های فرکانس پایین تصویر بسیار کم تحت تاثیر اثر نویز بوده و شکل توزیع طیف اندازه در آنها تا حد زیادی به طیف اصلی شبیه است. بر همین اساس می‌بایست بر اساس همین مقادیر، یک فیلتر غیر خطی در حوزه فرکانس جهت تضعیف فرکانس‌های بالاتر ایجاد شود. قاعدتاً شکل کلی فیلتر از رابطه ۷-ب پیروی می‌کند، اما پیاده‌سازی دقیق چنین فیلتری به صورت تحلیلی وجود ندارد، چراکه ناهمسانگردی طیف اندازه وابسته به تصویر بوده و برای هر تصویر نیز به صورت غیر تحلیلی در محدوده 0 تا  $2\pi$  توزیع شده و نمی‌توان یک فرمول دقیق تحلیلی برای آن تعیین نمود. البته با در نظر گرفتن یک رویکرد می‌توان این مشکل را حل کرد. با توجه به رقومی و گسسته بودن تصاویر می‌توان حداکثر تعداد جهت‌گیری‌های مختلف

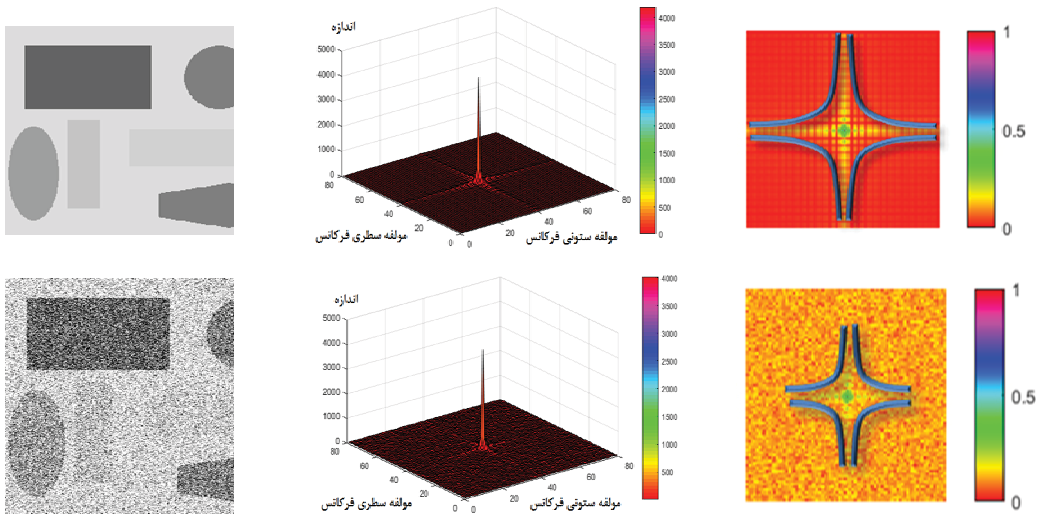
مدل فرکانسی طیف اندازه نویز گاوسی و اینکه مطابق با رابطه ۵ مدل نویز ضرب شونده به مدل نویز جمع شونده (گاوسی) قابل تبدیل خواهد بود، می‌توان مدل نهایی طیف اندازه تصویر SAR در فضای فرکانس را به صورت حاصل جمع مدل هموگرافیک نزولی رابطه ۶ و یک مدل تصادفی نویزی جمع شونده در نظر گرفت. بنابراین مدل رابطه ۶ برای تصویر SAR و در نظر گرفتن فضای دو بعدی تصویر، به صورت رابطه ۷ اصلاح می‌شود که در آن  $E[.]$  امید ریاضی،  $I(f_r, f_c, \theta)$  تبدیل فوریه تصویر نویزی،  $R(f_r, f_c, \theta)$  تبدیل فوریه تصویر بدون نویز،  $\psi_r$  و  $\psi_c$  به ترتیب پارامتر مقیاس هموگرافیک در راستای سطر و ستون،  $\zeta_r$  و  $\zeta_c$  به ترتیب میرایی تابع هموگرافیک در راستای سطر و ستون،  $\theta$  نیز پارامتر ناهمسانگردی تابع هموگرافیک و نهایتاً  $\varepsilon(r, c)$  مدل طیف اندازه نویز گاوسی است. دلیل حضور پارامتر  $\theta$  در این است که این کاهش هموگرافیک در چگالی طیفی توان تصویر (فضای دوبعدی) برای زوایای مختلف متفاوت است. توجه این موضوع بسیار ساده است، چراکه بیشتر یا کمتر بودن این مقدار مستقیماً وابسته به طیف اندازه فرکانسی تصویر است که این پارامتر به نوبه خود وابسته به جهت‌گیری لبه‌های تصویر است. به طور مثال برای تصاویر با بیشترین تعداد لبه‌های افقی و عمودی، مقدار چگالی طیفی توان برای تصویر در زوایای صفر،  $\pi/2$ ،  $\pi$  و  $3\pi/2$  بیشینه خواهد بود. مدل ارائه شده در رابطه ۷ برای تصاویر طبیعی اپتیکی نیز قابل استفاده است، با این تفاوت که به دلیل پیشرفت تکنولوژی و کاهش محسوس نویز گاوسی و به تبع آن افزایش نسبت سیگنال به نویز و کوچک شدن عبارت  $\varepsilon(r, c)$  می‌توان از این ترم صرف نظر نموده و از مدل رابطه ۶ استفاده نمود. برای درک بهتر، اثر نویز بر مدل طیف اندازه، برای یک تصویر شبیه سازی در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است.

بنابراین جهت سادگی می‌توان یک فیلتر همسانگرد متناسب با بزرگترین مولفه‌ها ایجاد کرده و یک تقریب مناسب از مدل طیف اندازه ایجاد کرد. مطابق با شکل ۷ نحوه بررسی زوایای مختلف و نیز ایجاد فیلتر همسانگرد نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، برای یافتن مولفه‌های غالب می‌توان دایره متحدالمرکزی با شعاع‌های مختلف در نظر گرفته و سپس در زوایای مختلف در آن شعاع با نمونه برداری از طیف اندازه، بزرگی آن را مورد تحلیل قرار داده و سپس زاویه‌ای که بزرگترین مولفه‌ها در آن قرار دارد پیدا نماییم.

از مرکز صفحه فضای فرکانس را با استفاده از رابطه ۸ بدست آورد.

$$r_{\theta} = \frac{4\pi}{2 \times (a/2 + b/2)} \quad (8)$$

که در آن  $n_{\theta}$  تعداد زوایای موجود و  $a$  و  $b$  ابعاد انتخابی از فضای طیف می‌باشد. در عمل نیاز به بررسی تمام زوایای ممکن نخواهد بود، چراکه به ندرت مولفه‌های فرکانسی در تمام زوایا توزیع می‌شوند. هرچند که در تصاویر با نواحی و کلاس‌های بیضوی و دایروی شکل این چنین طیفی محتمل است. از سوی دیگر عمدتاً جهت‌هایی حائز اهمیت هستند که دارای طیف اندازه بزرگ‌تر بوده و عمده انرژی سیگنال تصویر متشکل از این مولفه‌هاست.

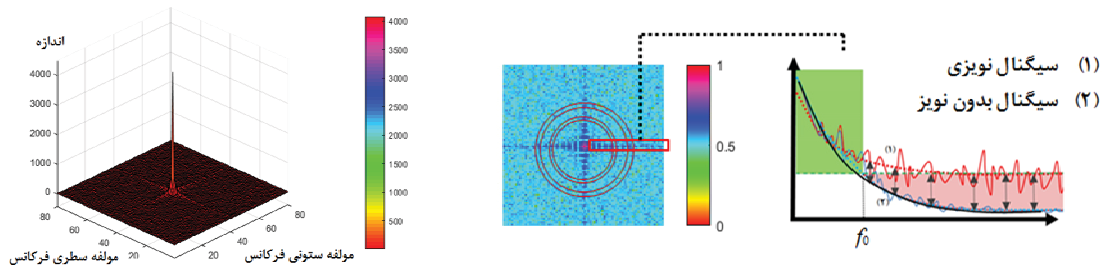


بالا: تصویر شبیه‌سازی بدون نویز  
پایین: تصویر شبیه‌سازی نویزی

بالا: طیف اندازه تصویر بدون نویز  
پایین: طیف اندازه تصویر نویزی

بالا: نمایش کانتور طیف اندازه  
پایین: نمایش کانتور طیف اندازه (نویزی)

شکل ۶. طیف اندازه و توزیع فرکانسی آن در تصویر شبیه‌سازی شده و حالت نویزی آن



طیف اندازه در حوزه فرکانس

نمایش کانتور و مولفه‌های غالب فرکانسی در طیف اندازه

شکل ۷. بررسی طیف اندازه و تعیین زاویه مولفه‌های غالب در آن

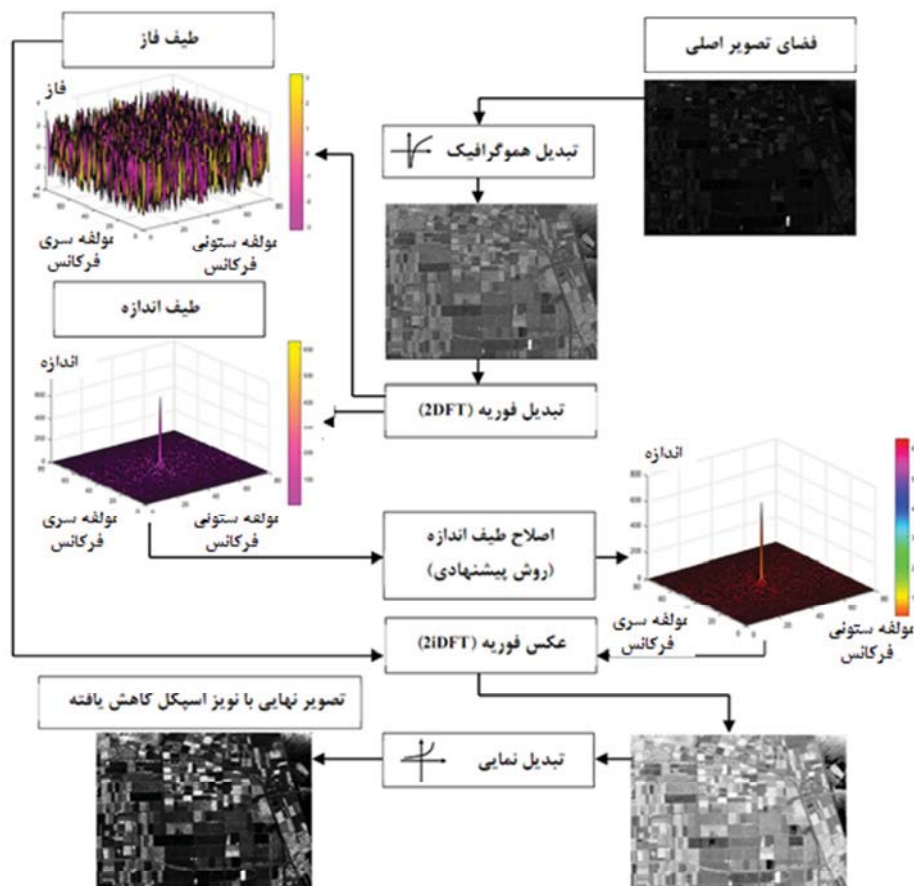


مدل ارائه شده به صورت دینامیکی تغییر کند، می‌بایست ابتدا تعداد زوایای مورد نظر که حداکثر مطابق رابطه ۸ ( $n_0$ ) می‌باشد را انتخاب نموده و سپس با مولفه‌های کوچکتر از مولفه‌ی  $f_0$  همان زاویه مدل رابطه ۹ حل شده و پارامترهای آن محاسبه شود. باید توجه کرد که پارامتر  $f_0$  با توجه به تغییرات طیف اندازه در زوایای مختلف، متفاوت بوده و در هر زاویه بایستی مقدار  $f_0$  تعیین شود. هر چند این پارامتر برای زوایای مختلف متفاوت است، اما همانطور که در بخش نتایج و ارزیابی نشان داده خواهد شد، نتایج به تعیین مقدار  $f_0$  خیلی حساس نیست. در اغلب موارد، ۵ تا ۱۰ نمونه فرکانس پایین به ندرت تحت تاثیر نویز قرار گرفته و با همین مولفه‌ها می‌توان مدل مورد نظر را تشکیل داد.

اکنون با در دست داشتن مولفه‌های با بیشینه اندازه و صرف نظر از تخریب مولفه‌های فرکانسی کمتر از مقدار  $f_0$  (مشخص شده در شکل ۷) می‌توان یک مدل تحلیلی همسان‌گرد به صورت رابطه ۹ برای مقدار متوسط طیف دامنه در حوزه فرکانس تعریف کرد.

$$E[|\hat{R}(f)|^2] \cong \frac{\psi}{f^\xi} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن  $\psi$  مقیاس مدل نمایی،  $\xi$  میرایی مدل نمایی و نهایتاً  $f$  نیز متغیر فرکانس می‌باشد. اکنون با در اختیار داشتن مدل فوق و استفاده از داده‌های فرکانسی کمتر از پارامترهای  $\psi$  و  $\xi$  به راحتی با در اختیار داشتن مولفه‌های منتخب و استفاده از یک روش (به طور مثال کمترین مربعات) قابل محاسبه خواهند بود. اگر بخواهیم به صورت ناهمسانگرد در تمام زوایا

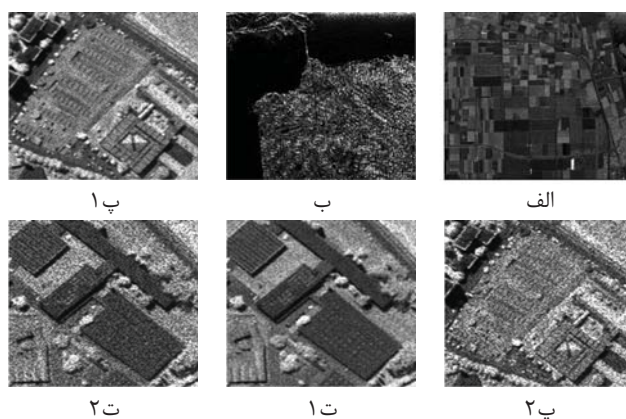


شکل ۸. الگوریتم پیشنهادی جهت کاهش اثر اسپکل در تصاویر SAR

## ۴- داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از دو دسته داده شبیه سازی شده و نیز داده SAR هوایی استفاده شده است (شکل ۹). ابتدا داده‌های شبیه سازی شده توسط الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس جهت مقایسه نتایج به دست آمده از فیلتر لی اصلاح شده، فراست اصلاح شده و نیز فیلتر گاما مورد ارزیابی قرار گرفته است. یکی از تصاویر هوایی توسط سنجنده هوایی AIRSAR و از منطقه سانفرانسیسکو، کالیفرنیا اخذ شده است. تصویر دوم نیز توسط سنجنده AIRSAR از منطقه فلوراند در هلند اخذ شده است. ابعاد تصویر سانفرانسیسکو  $900 \times 1024$  و نیز تصویر فلوراند  $750 \times 1024$  است. تصویر سانفرانسیسکو عمدتاً متشکل از بافت شهری و تصویر فلوراند متشکل از زمین‌های کشاورزی است. برای ایجاد هرچه بهتر بافت پیچیده و نیز عوارض مختلف، از بخشی از تصویر اپتیکی پویا واقع در ایتالیا جهت شبیه‌سازی نویز اسپکل در تصویر SAR استفاده شده است تا ضمن وجود انواع اشکال هندسی، بافت‌های ظریفی نیز در تصویر وجود داشته باشد. مقدار نویز اعمال شده به دو تصویر نیز در دو شدت واریانس 0.02 و 0.1 اسپکل صورت گرفته تا عملکرد الگوریتم

برای سادگی در تحقیق حاضر و همچنین افزایش سرعت محاسبات، مدل همسان‌گرد رابطه ۹ انتخاب شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد<sup>۱</sup>. در این صورت بعد از محاسبه مقدار امید ریاضی طیف اندازه و یا به بیان دیگر متوسط تغییرات طیف اندازه مطابق رابطه ۹، مقدار متوسط طیف اندازه تصویر نویزی نیز برای تمام فرکانس‌ها با استفاده از یک پنجره لغزان محاسبه می‌شود. مطابق با شکل ۷ به دلیل وجود نویز، متوسط تصویر نویزی در طیف اندازه حوزه فرکانس بالاتر از مدل مورد انتظار برای تصویر بدون نویز قرار خواهد گرفت. در این صورت برای از بین بردن اثر نویز کفایت با مقایسه مقدار متوسط نویزی با مقدار پیش بینی شده برای حالت بدون نویز، مقدار آن را به حالت اصلی برگردانیم. بعد از اصلاح طیف اندازه، با اضافه کردن طیف فاز به طیف اندازه اصلاح شده و اعمال عکس تبدیل فوریه گسسته دو بعدی، به فضای مکانی تصویر که نویز آن کاهش یافته برمی‌گردیم. از آنجا که برای اعمال روش پیشنهادی فضای نویز اسپکل اولیه با تبدیل هموگرافیک به نویز جمع شونده تبدیل شده بود، در آخر مجدداً با اعمال یک تبدیل نمایی، تصویر با نویز جمع شونده کاهش یافته را به تصویر اصلی تبدیل می‌نماییم. الگوریتم نهایی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۹. تصاویر مورد استفاده در ارزیابی الگوریتم کاهش اسپکل پیشنهادی: الف: تصویر SAR هوایی مربوط به منطقه فلوراند، ب: تصویر SAR هوایی منطقه سانفرانسیسکو، پ: ۱: تصویر شبیه سازی SAR شماره ۱ با واریانس اسپکل 0.02، پ: ۲: تصویر شبیه سازی SAR شماره ۱ با واریانس اسپکل 0.1، ت: ۱: تصویر شبیه سازی شماره ۲ با واریانس اسپکل 0.02، ت: ۲: تصویر شبیه سازی شماره ۲ با واریانس اسپکل 0.1

۱. در این صورت نیازی به بررسی طیف اندازه در زوایای مختلف نخواهد بود.

که در رابطه ۱۰،  $\mu_{\Omega}^2$  میانگین و  $\sigma_{\Omega}^2$  واریانس ناحیه همگن  $\Omega (I \subset \Omega)$ ،  $\hat{I}_{i,1}$  و  $\hat{I}_{i,2}$  نقاط قرار گرفته در دو طرف یک لبه در تصویر بازسازی شده و نیز  $I_{i,1}$  و  $I_{i,2}$  نقاط قرار گرفته در دو طرف همان لبه در تصویر اصلی است.  $E[\cdot]$  امید ریاضی،  $size(I)$  تعداد پیکسلهای تصویر  $I$ ،  $I$  و  $\hat{I}$  به ترتیب تصویر اصلی و تصویر با اسپکل کاهش یافته.  $\bar{I}$  و  $\hat{\bar{I}}$  به ترتیب میانگین تصویر  $I$  و  $\hat{I}$  می باشد. همچنین  $var(\cdot)$  نیز عملگر واریانس است.

### ۵- نتایج

تصاویر مورد استفاده جهت ارزیابی در شکل ۹ نشان داده شده است. در گام نخست، تصاویر مورد نظر با استفاده از فیلترهای لی بهبود یافته، فراست بهبود یافته و سپس فیلتر گاما ارزیابی شده و سپس عملکرد الگوریتم پیشنهادی نیز بر روی تصاویر اعمال می شود. خروجی فیلترهای مورد استفاده و نیز روش پیشنهادی بر روی ۴ تصویر شبیه سازی SAR در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین خروجی بدست آمده از

برای مقادیر سیگنال به نویز متفاوت بررسی شود. برای ارزیابی نتایج بدست آمده از روش های مختلف، مطابق با رابطه ۱۰ از شاخص های تعداد منظرهای معادل (ENL)، شاخص میانگین مربعات خطا (MSE)، شاخص حفظ لبه (EPI)، نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نیز همبستگی (CORR) استفاده شده است (Martino and Riccio, 2014).

$$CORR(I, \hat{I}) = \frac{\sum_{i,j}^n (I_{i,j} - \bar{I})(\hat{I}_{i,j} - \bar{\hat{I}})}{\sqrt{\sum_{i,j}^n (I_{i,j} - \bar{I})^2 \sum_{i,j}^n (\hat{I}_{i,j} - \bar{\hat{I}})^2}}$$

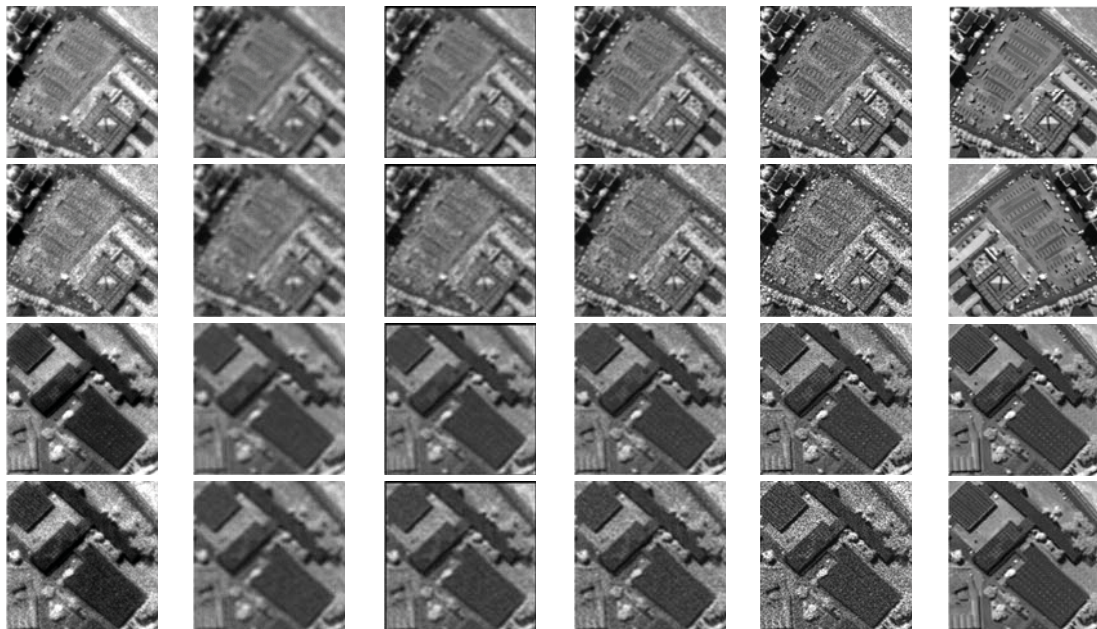
$$MSE(I, \hat{I}) = \frac{1}{size(I)} \sum_{i,j \in I} (I(i,j) - \hat{I}(i,j))^2$$

$$SNR(I, \hat{I}) = 10 \log_{10} \left( \frac{var(I)}{MSE(I, \hat{I})} \right)$$

$$EPI = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{I}_{i,1} - \hat{I}_{i,2}|}{\sum_{i=1}^n |I_{i,1} - I_{i,2}|}$$

$$ENL = \frac{\mu_{\Omega}^2}{\sigma_{\Omega}^2}$$

رابطه ۱۰. شاخص های ارزیابی کاهش اسپکل



شکل ۱۰. خروجی فیلترهای مختلف بر روی تصاویر شبیه سازی SAR، به ترتیب از بالا به پایین دو تصویر اول تصویر شبیه سازی شماره ۱ با واریانس های اسپکل 0.02 و 0.1 و دو تصویر پایین، تصویر شبیه سازی شماره ۲ با واریانس های اسپکل 0.02 و 0.1

به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۵ آورده شده است. با توجه به موجود بودن تصویر بدون نویز در حالت شبیه‌سازی، شاخص‌های MSE، SNR و CORR برای تصاویر شبیه‌سازی محاسبه شده است.

فیلترهای مختلف و نیز روش پیشنهادی برای دو تصویر SAR هوایی (تصاویر "الف" و "ب") در شکل ۱۱، آورده شده است. شاخص‌های مختلف ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف کاهش اسپیکل مورد استفاده در تحقیق، یعنی ENL، EPI، MSE، SNR و نیز CORR



شکل ۱۱. خروجی فیلترهای مختلف بر روی تصاویر SAR هوایی، به ترتیب از بالا به پایین تصویر فلولاند و تصویر سانفرانسیسکو (تصاویر "الف" و "ب")

جدول ۱. مقدار شاخص ENL برای روش‌های مختلف کاهش اسپیکل

روش پیشنهادی	فیلتر گاما	فیلتر فراست بهبود یافته	فیلتر لی بهبود یافته	تصویر
487	53	194	245	تصویر الف
23	1.5	2.2	1.6	تصویر ب
200	520	424	254	تصویر پ ۱
119	390	270	180	تصویر پ ۲
205	700	424	414	تصویر ت ۱
67	380	254	127	تصویر ت ۲

جدول ۲. مقدار شاخص EPI برای روش‌های مختلف کاهش اسپیکل

روش پیشنهادی	فیلتر گاما	فیلتر فراست بهبود یافته	فیلتر لی بهبود یافته	تصویر
2.0	0.54	0.53	0.57	تصویر الف
0.24	0.53	0.16	0.37	تصویر ب
0.51	0.02	0.12	0.33	تصویر پ ۱
0.41	0.07	0.01	0.14	تصویر پ ۲
0.53	0.05	0.1	0.28	تصویر ت ۱
0.56	0.04	0.04	0.42	تصویر ت ۲

جدول ۳. مقدار شاخص MSE برای روش‌های مختلف کاهش اسپیکل

روش پیشنهادی	فیلتر گاما	فیلتر فراست بهبود یافته	فیلتر لی بهبود یافته	تصویر
0.06	0.09	0.10	0.06	تصویر پ ۱
0.09	0.12	0.13	0.10	تصویر پ ۲
0.06	0.07	0.08	0.05	تصویر ت ۱
0.07	0.10	0.11	0.08	تصویر ت ۲

جدول ۴. مقدار شاخص SNR برای روش‌های مختلف کاهش اسپکل

روش پیشنهادی	فیلتر گاما	فیلتر فراست بهبود یافته	فیلتر لی بهبود یافته	تصویر
25	24	23	25	تصویر پ ۱
24	21	20	23	تصویر پ ۲
27	26	25	29	تصویر ت ۱
25	22	21	24	تصویر ت ۲

جدول ۵. مقدار شاخص CORR برای روش‌های مختلف کاهش اسپکل

روش پیشنهادی	فیلتر گاما	فیلتر فراست بهبود یافته	فیلتر لی بهبود یافته	تصویر
0.93	0.84	0.72	0.91	تصویر پ ۱
0.90	0.75	0.64	0.82	تصویر پ ۲
0.95	0.89	0.74	0.93	تصویر ت ۱
0.91	0.80	0.67	0.84	تصویر ت ۲

## ۶- بحث و ارزیابی

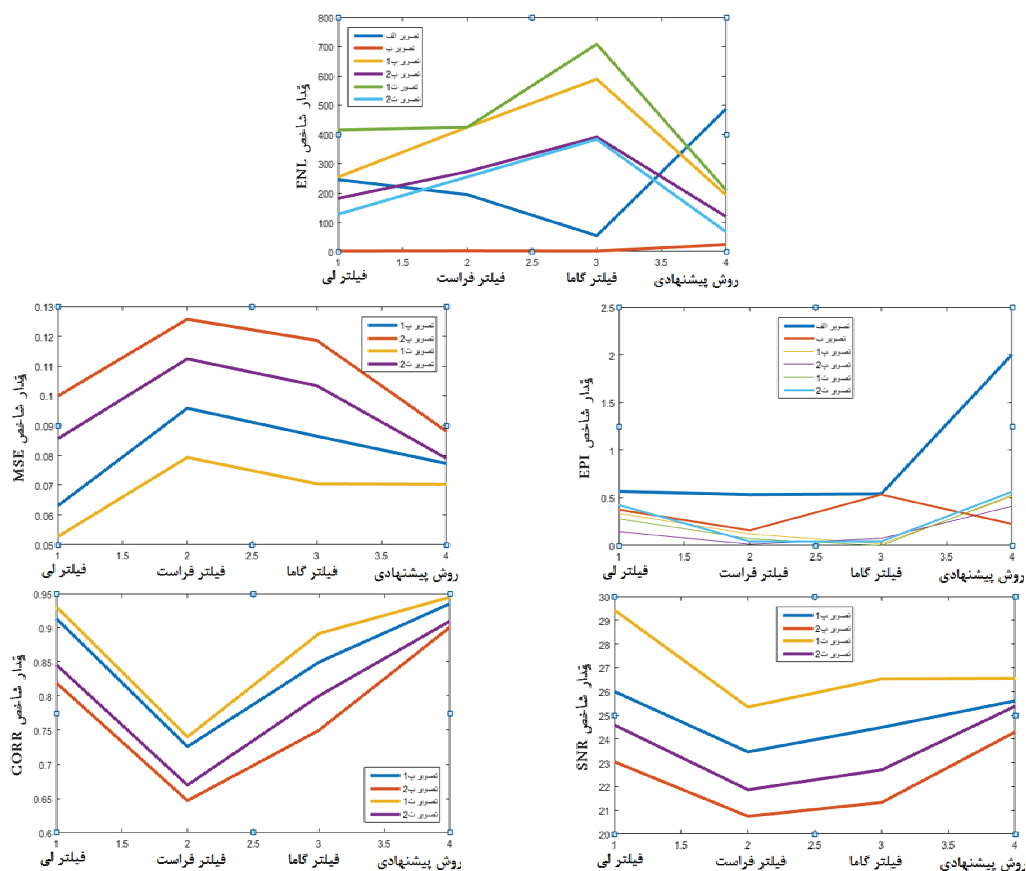
بافت‌های حساس و ظریف تصویر دارای اهمیت دو چندان خواهد بود. بر همین اساس نیاز به بررسی پارامترهای بیشتری است که این موضوع در جداول ۳ تا ۵ به خوبی مشهود است. مقدار شاخص MSE که معیاری از تشابه تصویر فیلتر شده با تصویر اصلی است، نشان می‌دهد که در اغلب موارد خروجی روش پیشنهادی اختلاف کمتری با تصویر اصلی داشته و ساختار تصویر خروجی در روش پیشنهادی شباهت بیشتری با تصویر اصلی دارد. مقدار شاخص SNR را نیز به طور مستقیم با MSE در ارتباط بوده و بیان‌گر نسبت سیگنال به نویز تصویر است. این شاخص نیز مطابق با جدول ۴ در مجموع برای روش پیشنهادی بالاتر از سایر روش‌هاست.

همبستگی درج شده در جدول ۵ نیز مبین همین موضوع است. میزان شباهت تصویر فیلتر شده با تصویر اصلی به طور میانگین برای روش پیشنهادی ۹۲.۲۵ درصد است. این در حالیست که این میزان شباهت برای روش گاما ۸۲ درصد، برای روش فراست بهبود یافته ۶۹.۲۵ درصد و برای روش لی بهبود یافته ۸۷.۵ درصد است. علاوه بر مقادیر عددی شاخص‌ها که در مجموع نشان از عملکرد مناسب روش پیشنهادی چه در داده‌های شبیه‌سازی و چه در داده واقعی دارد، شکل ۱۳، نیز به خوبی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در

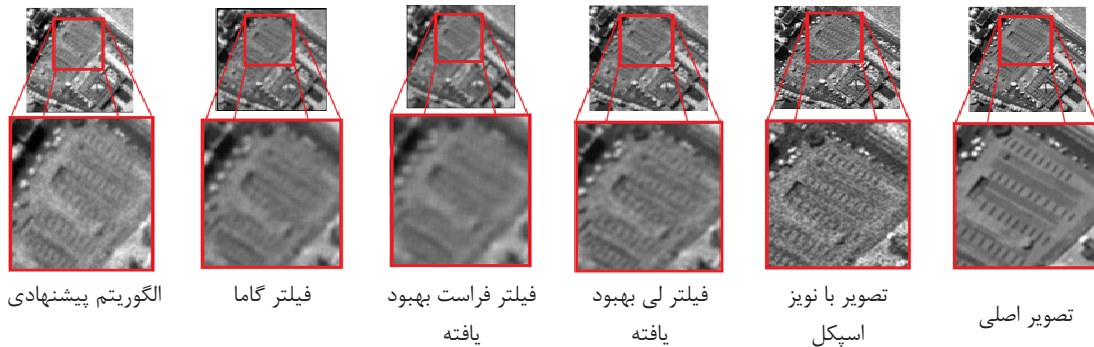
در بخش نتایج، خروجی به‌دست آمده از روش‌های مختلف و نیز روش پیشنهادی جهت کاهش اثر اسپکل در تصاویر SAR، هم بر روی داده واقعی و هم بر روی داده شبیه‌سازی شده به تصویر کشیده شده و نیز مقادیر عددی شاخص‌های ارزیابی در جدول‌های ۱ تا ۵ آورده شده است. مطابق با مقادیر عددی بدست آمده در جدول ۱، مقدار شاخص ENL برای دو تصویر SAR واقعی بهتر از سایر روش‌ها و در تصاویر شبیه‌سازی شده مقدار کمتری به‌دست می‌دهد. البته با توجه به جدول ۲، در اغلب موارد مقدار شاخص EPI برای روش پیشنهادی به مراتب بهتر از سایر روش‌ها است. دو شاخص ENL و EPI به تنهایی تفسیر درستی به دست نمی‌دهند، لذا برای یک نتیجه‌گیری صحیح بایستی این دو شاخص را در کنار یکدیگر و به صورت موازی مورد ارزیابی قرار داد. بنابراین گرچه شاخص ENL در تصاویر شبیه‌سازی شده برای روش پیشنهادی کمتر است، ولیکن با در نظر گرفتن شاخص EPI، روش پیشنهادی در مجموع خروجی بهتری را ارائه می‌دهد. مقدار بیشتر برای شاخص EPI علاوه بر اینکه نشان دهنده عملکرد بهتر روش پیشنهادی در حفظ لبه است، بلکه نشان می‌دهد ساختار تصویر نسبت به سایر روش‌ها بهتر حفظ شده است. این موضوع به ویژه برای

نزدیک به هم است. این موضوع نشان می‌دهد که عملکرد روش پیشنهادی بر روی تصاویر مختلف مناسب بوده و کارایی آن نسبت به تغییر فضای پردازشی مقاوم است. در شکل ۱۳، بخشی از تصویر شبیه‌سازی "پ ۱" که دارای بافت ظریف است به همراه عملکرد روش‌های مختلف کاهش اسپکل نشان داده شده است. همانطور که در تصویر دارای دارای حالت تکراری و تناوبی است. علاوه بر آن، این تغییر بافت دارای دامنه کوچکی بوده و بنابراین بافت تشکیل شده ظریف خواهد بود. از آنجایی که اغلب فیلترهای مکانی (و نیز بسیاری دیگر از روش‌ها) بر مبنای مشخصه‌های آماری محلی (به ویژه واریانس) عمل می‌کنند، این چنین منطقه‌ای را به عنوان یک منطقه همگن تعبیر کرده و بافت تصویر را تخریب می‌نمایند. حال آنکه در روش پیشنهادی با نگاه

حفظ بافت تصویر را نشان می‌دهد. در این تصویر بافت تصویر ظریف بوده و درجات خاکستری لبه‌های تصویر بسیار به هم نزدیک است. از این‌رو در فیلترهای تطبیقی مورد بررسی تقریباً بافت تصویر تخریب شده است. ولیکن در روش پیشنهادی ضمن کاهش اثر اسپکل و افزایش شاخص ENL، بافت تصویر نیز به خوبی حفظ شده است. داده‌های قرار گرفته در جداول ۱ تا ۵، جهت تحلیل بهتر در شکل ۱۲ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۱۲، نشان داده شده است، روند تغییرات شاخص‌های ENL، EPI، SNR، MSE و نیز CORR برای هر چهار روش مورد استفاده و برای تصاویر مختلف به تصویر کشیده شده است. علاوه بر برتری عددی مقدار شاخص‌های به تصویر کشیده شده در اغلب موارد، مقدار بدست آمده برای هر یک از شاخص‌ها و برای تصاویر مختلف برای روش پیشنهادی



شکل ۱۲. تغییرات شاخص‌های ارزیابی بر حسب روش مورد استفاده (محور افقی نمودار به ترتیب از ۱ تا ۴، روش‌های لی بهبود یافته، فراست بهبود یافته، گاما و روش پیشنهادی)



شکل ۱۳. عملکرد روش‌های مختلف بر روی بافت تصویر شبیه سازی "پ ۱"

طیف فاز قرار می‌گیرد، با استفاده مستقیم از طیف فاز در خروجی نهایی الگوریتم پیشنهادی، جزئیات تصویر بعد از اعمال پردازش حفظ خواهد شد. علاوه بر آن در فیلترهای تطبیقی به دلیل بررسی پارامترهای آماری محلی تصویر به صورت جز به جز و در برخی موارد بهره‌مندی از فیلترهای لبه‌یاب جهت استخراج اطلاعات بیشتر، علاوه بر پیچیدگی، بار محاسباتی بالایی را نیز به وجود خواهد آورد. همین موضوع باعث می‌شود تا علاوه بر پردازش اصلی، جهت تعیین ابعاد کرنل مورد استفاده و نیز برخی پارامترهای جانبی حجم محاسبات افزایش یابد. این در حالی است که زمان اجرای روش پیشنهادی تنها تابع ابعاد تصویر اصلی است. همچنین بهره‌گیری از سایر روش‌های کاهش اسپکل، اغلب شامل تعیین یک یا چند پارامتر تنظیم است که همین امر، کاربردی بودن چنین روش‌هایی را تحت الشعاع قرار می‌دهد. بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتوانند به صورت خودکار و نظارت نشده با ضریب اطمینان بالا تصویر را پردازش کنند، بیش از پیش احساس می‌شود.

#### ۸- پیشنهادات

در بسیاری از روش‌های کاهش نویز به ویژه کاهش اثر اسپکل در تصاویر SAR نیاز به استخراج پارامترهای آماری محلی و یا هندسی از تصویر دارد. حال آنکه در این تصاویر به دلیل وجود اثر دانه دانه‌های اسپکل عملاً تخمین چنین مشخصه‌هایی با چالش اساسی مواجه خواهد شد. روش پیشنهادی ضمن حفظ بافت تصویر

جامع به تصویر مورد بررسی و نیز حفظ طیف فاز تصویر، بافت‌های حساس تصویر کمتر دچار تخریب شده و از بین نخواهند رفت.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر یک الگوریتم پیشنهادی بر مبنای فیلترینگ تطبیقی طیف اندازه در حوزه فرکانس ارائه شده است. با بهره‌مندی از این روش، ضمن کاهش اثر اسپکل، بافت اصلی تصویر که حاوی اطلاعات مهمی به ویژه در پردازش‌های شی‌گرا نظیر خوشه‌بندی و قطعه‌بندی تصویر است، حفظ می‌شود. از آنجاکه فیلترهای تطبیقی نتایج قابل قبول و قابل مقایسه‌ای با سایر روش‌های نوین و مختلف از خود نشان داده‌اند، روش پیشنهادی با فیلترهای تطبیقی لی بهبود یافته، فراست بهبود یافته و نیز گاما مقایسه شد. بر اساس نتایج بدست آمده الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به فیلترهای تطبیقی از خود نشان می‌دهد، به‌طوری‌که ضمن بهبود ۵۰ درصدی شاخص تعداد منظرهای معادل در تصاویر SAR، مقدار شاخص حفظ لبه را نیز به طور میانگین برای تصاویر SAR و شبیه‌سازی SAR حدوداً 50 و 30 درصد بهبود می‌بخشد. یکی از نقاط قوت روش پیشنهادی خارج شدن از فضای پردازشی نایستای مکان تصویر به فضای پردازشی فرکانس است که ضمن بالا بردن سرعت پردازش، پیچیدگی‌های محاسباتی الگوریتم را کاهش می‌دهد. از آنجاکه بخشی از اطلاعات مهم تصویر در

- image processing: The nonlocal paradigm**, IEEE Signal Process. Mag., 31, pp. 69–78.
- Franceschetti, G. & Lanari, R., 1999, **Synthetic Aperture Radar (SAR)**, CRC Press.
- 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. Mach. Intell., 4, pp. 157–166.
- Kang, M., Yun, S. & Woo, H., 2013, **Two-level convex relaxed variational model for multiplicative denoising**, SIAM J. Imag. Sci., 6, pp. 875–903.
- Lee, J.-S., 1983, **Digital image smoothing and the sigma filter**, Comput. Vis. Graph. Image Process., 24, pp. 255–269.
- Lee, J.-S. Wen, J.-H., Ainsworth, T. L., Chen, K.-S. & Chen, A. J., 2009, **Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 47, pp. 202–213.
- 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**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49, pp. 3105–3116.
- Liu, S., Liu, M., Li, P., Zhao, J., Zhu, Z. & Wang, Z., 2017, **SAR Image Denoising via Sparse Representation in Shearlet Domain Based on Continuous Cycle Spinning**, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 55, pp. 2985–2992.
- Lopes, A., Touzi, R. & Nezry, E., 1990, **Adaptive speckle filters and scene heterogeneity**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 28, pp. 992–1000.
- دارای زمان پردازشی مناسبی بوده و نیز به طور قابل ملاحظه‌ای مقدار اسپکل را کاهش می‌دهد. بنابراین در مواردی که نیاز به پردازش بیشتر جهت استخراج مشخصه‌های آماری و هندسی محلی است، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی به عنوان یک مازول مستقل و یا یک مرحله پیش پردازشی بهره برد. علاوه بر این نیز می‌توان مدل ناهمسان‌گرد پیشنهادی را نیز برای تصاویر مختلف اجرا کرده و با مدل همسانگرد ارائه شده و نیز روش‌های دیگر مقایسه کرد.

#### ۹- مراجع

- Argenti F. & Alparone, L., 2002, **Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain**, IEEE Trans, Geosci. Remote Sens., 40, pp. 2363–2374.
- Argenti, F., Lapini, A., Bianchi, T. & Alparone, L., 2013, **A tutorial on speckle reduction in synthetic aperture radar images**, IEEE Geosci. Remote Sens. Mag, 1, pp. 6–35.
- Aubert, G. & Aujol, J.F., 2008, **A variational approach to remove multiplicative noise**, SIAM J. Appl. Math., 68, pp. 925–946.
- Bianchi, T., Argenti, F. & Alparone, L., 2008, **Segmentation-based MAP despeckling of SAR images in the undecimated wavelet domain**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 46, pp. 2728–2742.
- Deledalle, C.A, Denis, L. & Tupin, F., 2015, A. Reigber, and M. Jager, **NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution-preserving (Pol) (In) SAR denoising**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 53, pp. 2021– 2038.
- Deledalle, C.-A., Denis, L., Poggi, G., Tupin, F. & Verdoliva, L., 2014, **Exploiting patch similarity for SAR**



- Martino, G.D. & Poggi, G., 2016, **Scattering-Based SARBM3D**, IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 9(6), pp. 2131 – 2144.
- Martino, G.D. & Riccio, D., 2014, **Benchmarking Framework for SAR Despeckling**, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 52, pp. 1596 - 1615.
- Nezry, E., Lopes, A. & Touzi, R., 1992, **Detection of structural and textural features for SAR images filtering**, in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS'91), pp. 2169–2172.
- Nugroho, H. A., Triyani, Y., Rahmawaty, M., Ardiyanto, I. & Choridah, L., 2016, **Performance Analysis of Filtering Techniques for Speckle Reduction on Breast Ultrasound Images**, IEEE, International Electronics Symposium (IES).
- Oliver, C. & Quegan, S., 2004, **Understanding Synthetic Aperture Radar Images**. Raleigh, NC, USA: SciTech.
- Parrilli, S., Poderico, M., Angelino, C.V. & Verdoliva, L., 2012, **A nonlocal SAR image denoising algorithm based on LLMMSE wavelet shrinkage**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 50, pp. 606–616.
- Ranjani, J.J. & Thiruvengadam, S.J., 2010, **Dual-Tree complex wavelet transform based SAR despeckling using interscale dependence**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 48, pp. 2723–2731.
- Solbo, S. & Eltoft, T., 2004, **Homomorphic wavelet-based statistical despeckling of SAR images**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 42, pp. 711–721.
- Torralba, A. & Oliva, A., 2003, **Statistics of natural image categories**, Network: Computation In Neural Systems, 14 391–412.
- Touzi, R., Lopes, A. & Bousquet, P., 1988, **A statistical and geometrical edge detector for SAR images**, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 26, pp. 764–773.
- Wang, Y., Yang, J., Yin, W. & Zhang, Y., 2008, **A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction**, SIAM J. Imag. Sci., 1, pp. 248–272.
- Xu, B., Cui, Y., Li, Z. & Yang, J., 2015, **An iterative SAR image filtering method using nonlocal sparse model**, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 12(8), pp. 1635–1639, Aug.
- Zhang, W., Liu, F., Jiao, L., Hou, B., Wang, S. & Shang, R., 2010, **SAR image despeckling using edge detection and feature clustering in bandelet domain**, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 7, no. 1, pp. 131–135.



## Speckle reduction in SAR images based on an adaptive filtering in the frequency domain

Janati, H.,<sup>1\*</sup> and Valadan Zoej, M. J.<sup>2</sup>

1. Master student of Remote sensing in Department of Photogrammetry and Remote sensing, College of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology
2. Professor in Department of Photogrammetry and Remote sensing, College of Geodesy and Geomatics, K. N. Toosi University of Technology

### Abstract

Speckle in Synthetic aperture radar images makes grainy effects, because of the coherent imaging system which cause some difficulties in object-oriented processes, like segmentation or classification. Therefore, a lot of methods have been developed for speckle reduction purpose. These methods can be classified but not limited in some approaches, like spatial based, transform based and optimization, which mostly suffer from limitations like edge and texture destruction and also regulating parameter dependence. In this paper a new structure has been presented based on adaptive filtering of the amplitude response of the discrete fourier transform of the image in the frequency space, which not only reduces the speckle but also preserves edges and delicate textures. In addition, it has low level of computation and complexity compared to the kernel dependent spatial approaches. The main contribution of the paper is to fit a predefined analytical function to amplitude response of the discrete fourier transform of the image, in order to recover underlying speckle reduced SAR image. Proposed method, improves equivalent number of looks index 50 percent and edge preservation index 50 and 30 percent for real and simulated synthetic aperture radar images, respectively.

**Keywords:** SAR images, speckle reduction, frequency domain, Fourier transform, amplitude spectrum, non-linear filtering.

\* Correspondence Address: Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Geodesy and Geomatics Faculty, K. N Toosi University of Technology, Phone: 09183070896.  
Email: eng.hmdj@gmail.com