

ثبت تصویر SAR با استفاده از تجانس فاز و SIFT غیرخطی مبتنی بر انتشار

چکیده

الگوریتم تبدیل ویژگی‌های نامتغیر با-مقیاس (SIFT) به طور گسترده برای ثبت اپتیکال تصویر اعمال می‌شود. با این حال، عمدتاً به دلیل نویز نقطه‌ای ضربی، زمانی که SIFT به طور مستقیم برای تصویر روزنه ساختگی رادار (SAR) اعمال شود، دارای یک عملکرد محدود است. در این مقاله، یک روش ثبت جدید SAR ارائه شده است، که بر اساس ترکیبی از SIFT، انتشار غیرخطی، و تجانس فاز است. در الگوریتم پیشنهادی ما، ارائه یک تصویر SAR در چند مقیاس توسط انتشار غیرخطی تولید می‌شود، زیرا لبه‌های تصویر را بهتر حفظ می‌کند، برخلاف صاف نمودن گاوسی که در SIFT اصلی استفاده می‌شود. برای کاهش تاثیر نویز نقطه‌ای ضربی، نسبت اپراتور متوسط وزنی‌نمایی برای محاسبه اطلاعات گرادیان در ساخت فضای مقیاس انتشار غیرخطی استفاده می‌شود. علاوه بر این، اطلاعات تجانس فاز برای حذف نقاط کلیدی اشتباه در نقاط کلیدی اولیه استفاده می‌شود. نتایج تجربی در مورد تصاویر SAR چند قطبی بودن، چند بانده و چند زمانی نشان می‌دهند که الگوریتم ما می‌تواند عملکرد تطبیق را نسبت به روش مبتنی بر SIFT بهبود دهد که برای تمام جفت تصویر مورد آزمایش، منجر به دقت زیر پیکسل می‌شود.

فهرست واژه‌ها: انتشار غیرخطی، تجانس فاز، تبدیل ویژگی نامتغیر با-مقیاس (SIFT)، ثبت روزنه ساختگی رادار (SAR).

روزنه ساختگی رادار (SAR)، یک سیستم تصویربرداری منسجم است که می تواند تصاویری با رزولوشن بالا تولید نماید و تحت همه زمانها و همه شرایط آب و هوایی کار کند. از این رو، برای کاربردهای متنوع، از جمله ترکیب تصویر، نظارت زیست محیطی، آشکارسازی تغییر [1]، و غیره مفید است. به عنوان یک گام اساسی مورد نیاز در این کاربردها، ثبت تصویر به همراستایی تصاویر همان صحنه به دست آمده تحت شرایط تصویربرداری مختلف، مثلاً زمان های مختلف، از دیدگاه های مختلف، و یا توسط سنسورهای مختلف اشاره می نماید.

به تازگی، با توجه به عدم تغییرات آن به مقیاس، چرخش ها، انتقال ها و تابش جزئی و تغییرات نقطه نظر، تبدیل ویژگی نامتغیر با-مقیاس (SIFT) به طور گسترده ای در بسیاری از وظایف پردازش تصویر استفاده شده است. بر اساس ارائه چند-مقیاسی یک تصویر (یعنی، یک سری از تصاویر تفاوت-گوسی (DoG))، SIFT، نقاط کلیدی را با جستجوی مقادیر حدی در هرم DoG تشخیص می دهد و سپس توصیف کننده نقطه کلیدی را در تکه های تصویر محلی در اطراف هر نقطه کلیدی محاسبه می نماید. این توصیف کننده، توزیع گرادیان مکانی را در اطراف یک نقطه کلیدی توسط یک بردار 128 بعدی کدگذاری می کند که برای تطبیق زیر استفاده می شود. جزئیات بیشتر در مورد SIFT را می توان در [2] پیدا نمود.

اگر چه SIFT با موفقیت برای ثبت اپتیکال تصویر اعمال شده است، با توجه به تمایز آن در شرح و توصیف ویژگی، نمی تواند نتایج رضایت بخش را در هنگام اعمال مستقیم برای تصاویر SAR تولید نماید [3]. دلایل ممکن شامل دو جنبه می شود. اول، تصاویر SAR معمولاً توسط نویزهای نقطه ای قوی ضربی خراب می شوند که SIFT را برای استخراج نقطه کلیدی بدتر می نماید. بنابراین، بسیاری از نقاط کلیدی نادرست ممکن است با استفاده از روش SIFT ظاهر شوند [4]، [5]. ثانیاً، در نتیجه عمل صاف کردن گوسی، فضای مقیاس گوسی (GSS) مورد استفاده در SIFT اغلب اطلاعات لبه و جزئیات ریز را در تصویر تنزل می دهد [6]. با توجه به نقایص از دست دادن جزئیات، مات شدن لبه ها، و مصونیت در برابر نویز نقطه ای ضعیف آن، SIFT بسیاری از نقاط کلیدی اولیه نادرست از سگ DoG را در هنگام سرو کار داشتن با ثبت تصویر SAR به دست می آورد. پس از حذف این نقاط دورافتاده،

تطبیقات صحیح در دسترس به منظور محاسبه پارامترهای انتقال بیش از حد ناکافی هستند. در این مورد، SIFT ناموفق خواهد بود.

برای غلبه بر مشکلات فوق، انتشار غیرخطی در این مقاله برای تولید فضای مقیاس استفاده شده است [به عنوان مثال، فضای مقیاس انتشار غیرخطی (NDSS)]، که دارای مزیت حفظ لبه ها و جزئیات نسبت به GSS خطی است [7]، [8]. در همین حال، نسبت اپراتور متوسط وزنی (ROEWA) نمایی برای محاسبه اطلاعات گرادیان در طول ساخت NDSS استفاده می شود. علاوه بر این، نقاط کلیدی اولیه به دست آمده توسط کاوش اطلاعات تجانس فاز اصلاح می شوند. در مقایسه با روش مبتنی بر SIFT، روش پیشنهادی برای مشکل ثبت SAR مناسب است، همانطور که توسط آزمایش های ما نشان داده شده است.

بقیه این مقاله به شرح زیر است: روش پیشنهادی ثبت تصویر SAR در بخش دوم با تاکید بر تولید NDSS و روش حذف نقاط دورافتاده معرفی می شود و نتایج تجربی الگوریتم پیشنهادی و روش های دیگر ثبت ارائه می شوند و در بخش سوم مقایسه می شوند. نتایج در بخش 4 داده می شود.

2. ثبت SAR با استفاده از تجانس فاز و SIFT بر اساس انتشار غیرخطی

در اینجا، SIFT بهبود یافته برای ثبت SAR با جزئیات معرفی شده است. در مقایسه با الگوریتم SIFT اصلی، روش پیشنهادی روی بهبودهای زیر متمرکز است: (1) استفاده از انتشار غیرخطی برای تولید فضای مقیاس در SIFT بهبود یافته. (2) معرفی یک روش قوی برای محاسبه اطلاعات گرادیان مرتبط در NDSS برای تصویر SAR. و (3) ارائه یک مرحله حذف نقطه دورافتاده که بر اساس اطلاعات تجانس فاز است. جزئیات در زیر تشریح خواهد شد.

A. ایجاد فضای مقیاس با انتشار غیرخطی

GSS مورد استفاده در روش SIFT از کانولوشن تصویر اصلی با فیلترهای گاوسی در مقیاس های مختلف تولید می شود [2]. هموارسازی گاوسی دارای اثر حذف نویز است؛ با این حال، برخی از جزئیات ریز مهم در تصویر ممکن است از دست برود که ممکن است دارای یک اثر بد در تشخیص ویژگی باشد.

برای جبران نقص GSS، ارائه تصویر SAR در چند-مقیاس با استفاده از معادله انتشار غیرخطی شرح داده شده می شود [9]، که به صورت زیر تعریف می شود

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, y)}{\partial t} &= f_t = \operatorname{div}(c(x, y, t)\nabla f) \\ &= c(x, y, t)\Delta f + \nabla c \cdot \nabla f \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن t پارامتر مقیاس است؛ div اپراتور واگرایی است؛ ∇ و Δ به ترتیب، اپراتورهای گرادیان و لاپلاس هستند؛ $c(x, y, t)$ ضریب انتشار است. اگر $c(x, y, t)$ یک ثابت باشد، به معادله انتشار ایزوتروپیک را کاهش می یابد که معادل هموارسازی گاوسی است.

ضریب انتشار $c(x, y, t)$ به طور کلی به عنوان یک تابع غیرخطی گرادیان تصویر $|\nabla f|$ در نظر گرفته می شود و دو فرمولاسیون مختلف برای ضرایب انتشار در [9] معرفی شده اند

$$c_1 = e^{-\left(\frac{|\nabla f|}{K}\right)^2} \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{|\nabla f|}{K}\right)^2} \quad (3)$$

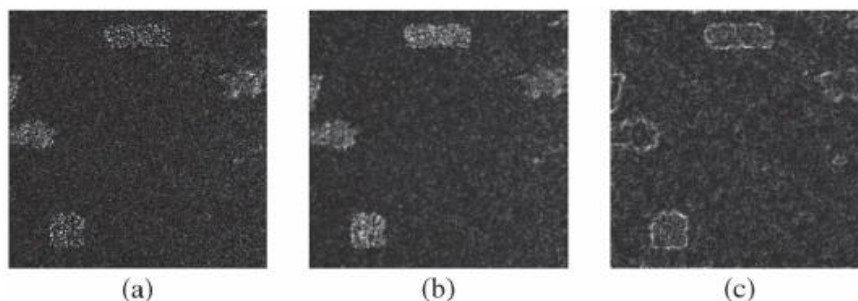
پارامتر K ، ضریب کنتراست است که سطح انتشار را کنترل می کند، و تعیین می کند که لبه باید نگه داشته شود و یا لغو شود. هر قدر مقدار K بالا باشد، اطلاعات لبه کمتر حفظ خواهد شد. مقدار K می تواند از نظر تجربی تثبیت شود و یا از هیستوگرام گرادیان تصویر برآورد شود [6].

علاوه بر این، فضاهای مقیاس تولید شده توسط این دو ضرایب متفاوت هستند: اولین ضریب به منظور ارتقاء لبه ها با کنتراست بالا ترجیح داده می شود، نه لبه ها با کنتراست پایین و ضریب دوم، مناطق گسترده ای را بر روی مناطق کوچکتر قرار می دهد. از تعریف آن به عنوان یک تابع کاهشی یکنواخت از گرادیان تصویر، واضح است که ضریب انتشار با مقدار گرادیان کوچکتر بسیار سریع تر از ضریب انتشار با یک مقدار گرادیان بزرگتر منتشر می شود. بر اساس این اصل، لبه ها در یک تصویر حفظ خواهند شد. در این مقاله، $C2$ به عنوان ضریب انتشار اتخاذ می شود.

از آنجا که هیچ راه حل تحلیلی برای حل معادله انتشار غیرخطی وجود ندارد [یعنی، (1)]، این راه حل با استفاده از روش عددی باید تقریب زده شود. یک راه حل محاسباتی کارآمد برای (1) توسط Weickert و همکاران پیشنهاد شد [10] که در آن طرح تقسیم اپراتور افزودنی (AOS) استفاده شده است. اعمال طرح AOS در (1)، رابطه زیر را ارائه می دهد:

$$f^{k+1} = \left(I - \tau \sum_{l=1}^m A_l(f^k) \right)^{-1} f^k. \quad (4)$$

در اینجا، τ نشان دهنده گام زمانی، I ، ماتریس واحد، 1 نشان دهنده جهت و ماتریس A_l متناظر با مشتقات در امتداد محور l ام است. جزئیات بیشتر در مورد چگونگی ساخت ماتریس A_l را می توان در [10] یافت. معادله قبلی به حل یک مسئله سیستم خطی نیاز دارد، که در آن ماتریس سیستم سه قطری و غالب مورب است. خوشبختانه، با استفاده از الگوریتم Thomas، این موضوع را می توان به طور موثر حل نمود.



شکل 1. نتایج دو روش محاسبه گرادیان. (الف) تصویر خراب شده با نویز نقطه ای. (ب) گرادیان به دست آمده با استفاده از روش تفاضل مرتبه اول. (ج) گرادیان به دست آمده توسط ROEWA (بعد از کنتراست کشیده شده).

در طول ایجاد NDSS، اطلاعات گرادیان در یک تصویر مورد نیاز است. به طور معمول، گرادیان را می توان با استفاده از روش تفاضل مرتبه اول ساده به دست آورد. با این حال، با توجه به نویز نقطه ای ضربی، این روش برای تصویر SAR مناسب نیست. این کار لبه های کاذب را در مناطقی با بازتاب بالا تولید خواهد نمود و برخی از اطلاعات تصویر را در مناطق با بازتاب کم از دست خواهد داد [4].

با توجه به نفوذ نويز نقطه ای در محاسبه اطلاعات گراديان، ROEWA با توجه به مزيت داشتن نرخ هشدار ثابت اشتباه و نيرومندی در برابر نويز نقطه ای نسبت به روش تفاضل مرتبه اول معرفی شده است [11]. برای بهتر نشان دادن تفاوت بين روش تفاضل مرتبه اول و ROEWA، شکل 1 دامنه گراديان را روی یک تصوير خراب شده با نويز نقطه ای از طريق دو روش محاسبه گراديان ارائه می دهد. واضح است که گراديان محاسبه شده توسط روش تفاضل مرتبه اول، مقادير بزرگ تر را در مناطق بازتاب بالا نسبت به مناطق با بازتاب کم توليد می نماید، در حالی که گراديان به دست آمده با ROEWA باعث تفاوت اندکی در مناطق همگن تحت شرايط بازتاب متفاوت می شود. با توجه به استحکام آن در برابر نويز نقطه ای، ROEWA برای محاسبه اطلاعات گراديان در ايجاد NDSS استفاده می شود. با انجام اين کار، ما می توانيم یک فضای مقیاس را توليد نماييم که دارای مقاومت بهتر به نقطه نويز است. ما همان رویکرد انجام شده در SIFT را اتخاذ می نماييم که فضای مقیاس را به یک سری از O اکتاو و S زیرسطح جداسازی می نماييم. نمایندگی چند-مقیاسی از یک تصوير SAR به عنوان یک پشته از تصاویر هموار شده، با تصوير اصلی به عنوان شرايط و مقادير مقیاس برابر با $t = \sigma^2/2$ [12] توليد می شود که در آن مقادير σ از عبارت زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_i(o, s) = \sigma_0 2^{o + \frac{s}{S}}, o \in [0, \dots, O - 1], s \in [0, \dots, S + 2],$$

$$i \in [0, \dots, W - 1] \quad (5)$$

که در آن σ_0 سطح مقیاس پایه است، و W تعداد کل تصاویر هموار شده است. O و S شاخص اکتاو O و زیرسطح S است. قابل توجه است، زمانی که ما به آخرین زیرسطح در هر اکتاو می رسیم، ما رزولوشن تصوير را کاهش می دهیم، همانطور که در SIFT شرح داده شده است و از تصوير با رزولوشن کاهش یافته به عنوان تصوير اولیه برای اکتاو بعدی استفاده می نماييم. در همین حال، برای رسیدن به حفاظت اطلاعات بهتر در تصوير SAR، ضریب کنتراست K باید بعد از هر تصوير با رزولوشن کاهش یافته تغییر یابد. روش نمایندگی در چند-مقیاسی توسط انتشار غیرخطی در الگوریتم 1 خلاصه شده است.

جدول 1 اطلاعات قبلی از تصاویر SAR واقعی

SAR Images	Sensor	Spatial Resolution	Band	Polarization	Size	Date of Acquisition	Location of Acquisition	
Dataset1	Ref. image	PISAR	3m	L	HH	320×320	1999/10/14	Niigata Site
	Sen. image	PISAR	3m	L	HV	320×320	1999/10/14	Niigata site
Dataset2	Ref. image	AIRSAR	10m	L	HH	374×374	2003/03/30	Rabbit Ears
	Sen. image	AIRSAR	10m	C	HH	306×306	2003/03/30	Rabbit Ears
Dataset3	Ref. image	ERS-2	30m	C	VV	340×340	1996/06/04	Shanghai
	Sen. image	ERS-2	30m	C	VV	300×300	2002/04/09	Shanghai

الگوریتم 1 روش ارائه چند مقیاسی پخش غیرخطی

ورودی: تصویر f^0 ، ضریب کنتراست K ، سطح مقیاس σ_i

for $i = 0 \rightarrow W - 1$ **do**

1 مقدار مقیاس t_i را محاسبه نمایید.

2 ضریب انتشار C را بر اساس گرادیان تصویر $|\nabla f|$ به دست آمده با ROEWA استنتاج نمایید

3 ماتریس $A_l(f^i)$ را محاسبه نمایید.

4 مکرراً f را با توجه به (6) بر اساس طرح AOS بروز رسانی نمایید:

$$f^{i+1} = \left(I - (t_{i+1} - t_i) \sum_{l=1}^m A_l(f^i) \right)^{-1} f^i \quad (6)$$

اگر $o_{i+1} > o_i$ سپس

if $o_{i+1} > o_i$ **then**

رزولوشن تصویر f^i را کاهش دهید، و کنتراست مقدار K را تغییر دهید

end if

end for

خروجی: یک پشته از تصاویر هموار $f^i, i = 0, \dots, W - 1$

بر اساس روشی که ما برای تولید NDSS ارائه نمودیم، تصاویر به دست آمده چند-مقیاسی قادر به حفظ بهتر لبه ها و جزئیات هستند و در برابر نویز نقطه ای قوی تر هستند. بنابراین، با NDSS، انتظار می رود که SIFT بهبود یافته نقاط کلیدی خیلی بیشتری را تشخیص دهد. هنگامی که تصاویر هموار شده در مقیاس های مختلف تولید شده

باشند، تفاوت بین مقیاسهای مجاور انجام می شود، و مراحل تشخیص ویژگی و شرح آن از مراحل مورد استفاده در الگوریتم SIFT پیروی می نماید.

B. حذف نقطه دورافتاده با استفاده از تجانس فاز

با توجه به وجود نویز نقطه ای ضریبی، تعداد زیادی از نقاط کلیدی غیر قابل اعتماد در نقاط کلیدی اولیه تشخیص داده شده توسط رویکرد ما به نظر می رسد. این تطبیقات غیر قابل اعتماد به تناظرات نادرست منجر خواهد شد و بیشتر روی محاسبه صحیح پارامترهای تبدیل تاثیر می گذارد. با در نظر گرفتن این مورد، ما تلاش نموده ایم تا تجانس فاز را برای از بین بردن نقاط دورافتاده معرفی نماییم. نشان داده شده است که تجانس فاز در برابر تابش و شرایط کنتراست، تغییرناپذیر است. اطلاعات تجانس فاز در تصویر با تجزیه و تحلیل پاسخ فیلتر Gabor لگاریتمی روی جهت و مقیاس های [13] مختلف به دست می آید. حذف نقطه دورافتاده در این مقاله با مراحل زیر انجام شده است:

1) محاسبه اطلاعات تجانس مرحله در هر نقطه در مرجع و تصاویر حس شده؛ اطلاعات تجانس فاز متناظر را می توان به صورت زیر تعریف نمود

$$P(x, y) = \frac{\sum_n W(x, y) [A_n(x, y) \Delta \phi_n(x, y) - T]}{\sum_n A_n(x, y) + \varepsilon} \quad (7)$$

$$\Delta \phi_n(x, y) = \cos(\phi_n(x, y) - \bar{\phi}(x, y)) - |\sin(\phi_n(x, y) - \bar{\phi}(x, y))| \quad (8)$$

که در آن (y, x) ، مختصات یک نقطه را نشان می دهد، و اندیس n ، مقیاس فیلتر است، $W(y, x)$ ضریب وزنی مبتنی بر گسترش فراوانی است، و $A_n(x, y)$ و $\phi_n(x, y)$ دامنه و فاز در مقیاس n هستند. میانگین وزنی، T آستانه نویز است، و ε ثابت کوچک برای جلوگیری از تقسیم بر صفر است.

2) برای تصویر SAR، تجانس فاز در یک محل نویز و یا غیر قابل اعتماد نسبتاً ضعیف تر از آن خود آن محل است. اگر اطلاعات تجانس فاز در یک نقطه کلیدی (که توسط P_i مشخص می شود) بزرگتر از یک مقدار آستانه باشد،

یعنی، $P_i \geq th$ ، آنگاه این نقطه معتبر است. اگر P_i زیر th باشد، آنگاه این نقطه رد می شود، که در آن th ، یک آستانه از پیش تعیین شده است، و مقدار تجربی 0.01 پیشنهاد شده است.

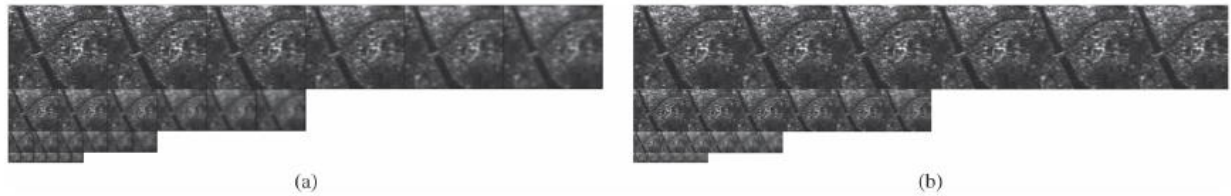
پس از دو مرحله فوق، بسیاری از نقاط کلیدی اشتباه حذف می شود، که انتظار می رود احتمال تطبیق صحیح بهبود یابد. پس از حذف نقاط دورافتاده با استفاده از تجانس فاز، ما از حداقل فاصله اقلیدسی روی بردار توصیف کننده برای هر نقطه کلیدی به منظور پیدا کردن نقطه متناظر آن استفاده می نماییم. نسبت بین فاصله نزدیکترین همسایه و فاصله تا نزدیکترین همسایه دوم برای حذف تطبیقات نادرست محاسبه می شود. با توجه به مقدار نسبت فاصله، 0.8 توسط Lowe ترجیح داده می شود [2]. علاوه بر این، ما از استراتژی تطبیق دوگانه ارائه شده در [7] به منظور انتخاب تطبیقات استفاده می نماییم، به عنوان مثال، مرجع نقطه کلیدی و نقطه کلیدی B در تصویر حس شده به عنوان یک تناظر، تنها زمانی که دو نقطه با یکدیگر توسط نسبت فاصله تطبیق می یابند.

3. نتایج و تجزیه و تحلیل تجربی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، ما به طور تجربی آن را در چندین جفت از تصاویر واقعی SAR تأیید اعتبار می نماییم، و اطلاعات قبلی متناظر از تصاویر SAR در جدول I نشان داده شده است. در بخش A-III، ارائه های چند-مقیاسی تصاویر SAR به منظور بررسی اثربخشی NDSS همراه با ROEWA نمایش داده می شوند. در بخش B-III، مقایسه های ثبت بین روش پیشنهادی و دیگران برای نشان دادن برتری روش ما در عملکرد ثبت پیاده سازی می شوند.

A. عملکرد NDSS

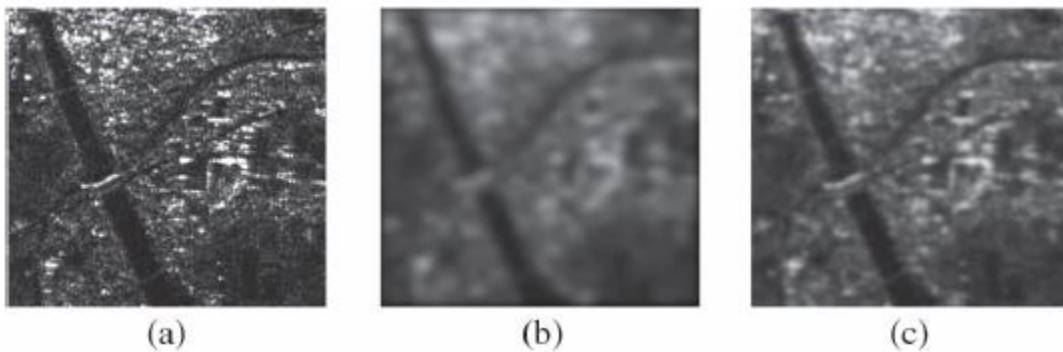
در اینجا، یک مقایسه مختصر از NDSS با GSS داده می شود. ما ارائه چند-مقیاسی یک تصویر SAR را با استفاده از انتشار غیرخطی و هموارسازی گاوسی ایجاد نمودیم. نتایج به دست آمده در شکل 2 نشان داده شده است، که در آن تصاویر در سمت چپ [یعنی شکل 2 (a)] توسط GSS تولید شده اند، و تصاویر در سمت راست [یعنی، شکل 2 (b)] نسخه غیرخطی با همان مقیاس ها هستند. در این مقاله، ما از همان تعداد از اکتاوهای $O = 4$ و زیرسطح $S = 3$ ، برای همه روش ها استفاده نمودیم.



شکل 2. مقایسه بین GSS و NDSS در همان مقیاس ها. (الف) تصاویر GSS با چهار اکتاو و شش زیرسطح در هر اکتاو. (ب) تصاویر NDSS با چهار اکتاو و شش زیرسطح در هر اکتاو.

همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، تفاوت بین NDSS و GSS آشکار است. در حالی که تصاویر GSS به طور فزاینده با افزایش مقدار مقیاس تار شده اند، تصاویر غیرخطی دارای یک تار نسبتاً کم یا مختصر هستند، که به استخراج نقاط کلیدی تر کمک خواهد کرد. برای تصویر بصری بهتر، شرح مفصل تر ارائه شده است. دو عکس که در شکل 3، هر دو در چهارمین زیر سطح در اکتاو دوم قرار دارند. همانطور که می توان در شکل 3 مشاهده نمود، NDSS نمایشگر مزیت آن در مقایسه با GSS است.

تصویر هموار شده توسط فیلتر گوسی، تارتر است، و لبه ها و جزئیات آن به دلیل تار گوسی ناپدید می شوند، در حالی که تصویر NDSS بهتر می تواند لبه ها و جزئیات را حفظ نماید.



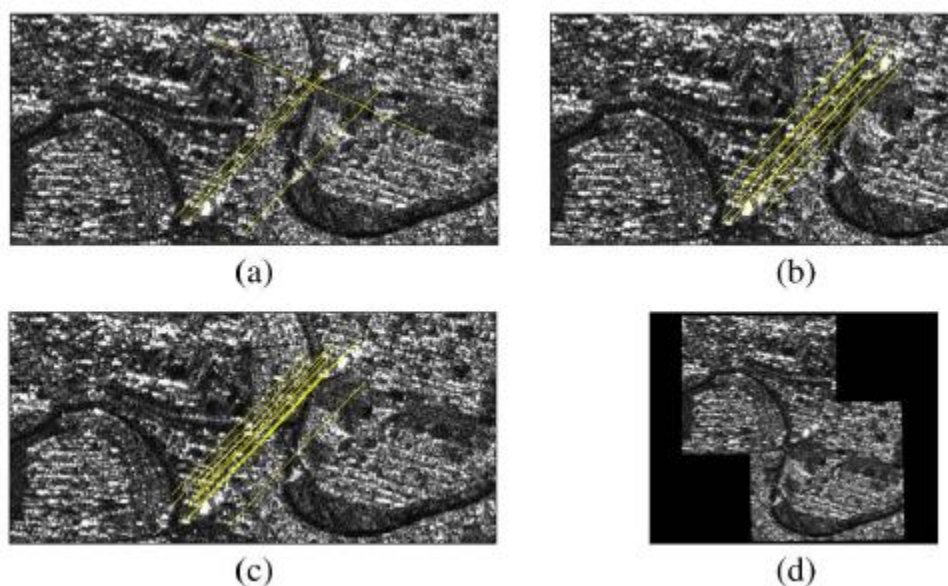
شکل 3. مقایسه GSS با فضای مقیاس ما. (الف) تصویر اصلی SAR، (ب) تصویر GSS، (ج) تصویر NDS.

B. مقایسه با سایر روش های ثبت تصویر

در اینجا، سه جفت از تصاویر واقعی SAR برای اعتبارسنجی رویکرد ما از نظر اثربخشی و دقت مورد استفاده قرار می گیرند و تفاوت انتقال دو تصویر در هر جفت تصویر عمدتاً شامل انتقال، چرخش، و مقیاس می شود که توسط تبدیل تکراری مدلسازی می شوند. روش ارائه شده با دو روش دیگر مقایسه شده است. الگوریتم تبدیل ویژگی فیلتر

دو جانبه نامتغیر با-مقیاس (BFSIFT) [7] به عنوان روش اول برای مقایسه در نظر گرفته شده است، در حالی که NDSS + SIFT روش در نظر گرفته شده دوم است. NDSS + SIFT در اینجا به روش ارائه چند-مقیاسی با استفاده از NDSS برای SIFT به جای GSS اصلی اشاره می نماید. یک مقایسه بین NDSS + SIFT و رویکرد ما برای نشان دادن عملکرد روش حذف نقطه دورافتاده ما استفاده می شود.

(1) مجموعه داده های 1-تصاویر از قطبش های مختلف: این جفت از تصاویر از سیستم رادار روزنه ساختگی هوابرد قطبیت سنجی و تداخل سنجی (PISAR) ژاپن به دست آمده است. تطبیقات موجود در مجموعه داده 1 با استفاده از سه روش که قبلاً ذکر شده است، در شکل 4 نشان داده شده است.

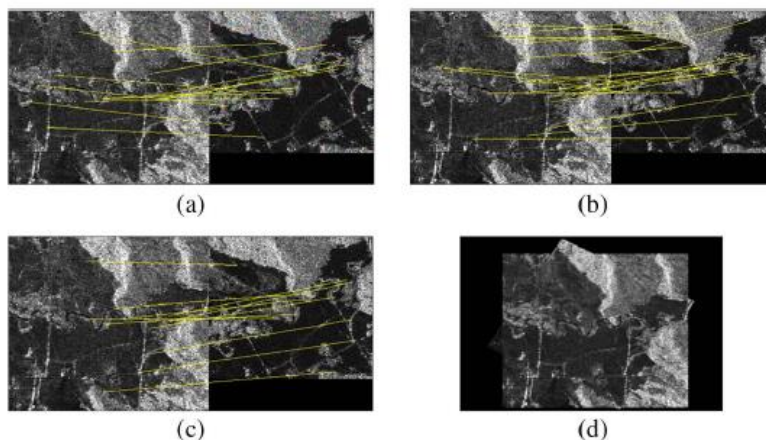


شکل 4. تطبیقات یافت شده در مجموعه داده های 1 با استفاده از (الف) BFSIFT، (ب) NDSS + SIFT، و (ج) روش پیشنهادی ما. تصویر مرجع در سمت چپ و تصویر حس شده در سمت راست نشان داده شده است. (د) نتیجه ثبت توسط روش پیشنهادی ما است.

(2) مجموعه داده ها 2-تصاویر از طول موج های متفاوت: دومین جفت در نظر گرفته شده از تصاویر از دو صحنه رادار روزنه ساختگی هوا (AIRSAR) تشکیل شده است (یک سنسور SAR هوا برد استفاده شده توسط

Propulsion Laboratory National Aeronautics and Space Administration/Jet. تطبیقات به

دست آمده در مجموعه داده 2 با استفاده از سه روش که قبلا شرح داده شده است، در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 5. تطبیقات یافت شده در مجموعه داده 2 با استفاده از (الف) BFSIFT، (ب) NDSS + SIFT، و (ج)

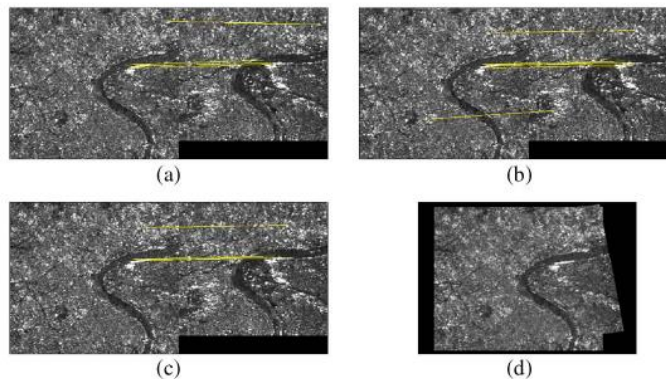
روش پیشنهادی ما. تصویر مرجع در سمت چپ و تصویر حس شده در سمت راست نشان داده شده است. (د) نتیجه

ثبت توسط روش پیشنهادی ما.

(3) مجموعه داده 3- تصاویر از زمان های مختلف: در این بخش، ما مجموعه داده را از صحنه های چند زمانی به

دست آمده توسط European Remote Sensing Satellite 2 (ERS-2) انتخاب می کنیم. تطبیقات موجود

در مجموعه داده 3 با استفاده از سه روش که قبلا ذکر شده است، در شکل 6 ارائه شده است.



شکل 6. تطبیقات یافت شده در مجموعه داده 3 با استفاده از (الف) BFSIFT، (ب) NDSS + SIFT، و (ج) روش پیشنهادی ما. تصویر مرجع در سمت چپ و تصویر حس شده در سمت راست نشان داده شده است. (د) نتیجه ثبت توسط روش پیشنهادی ما.

جدول 2 مقایسه کمی از روش ارائه شده با BFSIFT و NDSS + SIFT (* اولین شماره نشان دهنده نقاط کلیدی به دست آمده پس از حذف نقاط دورافتاده با استفاده از تجانس فاز است)

SAR images	method	Number of keypoints			RMSE/pixel	RMS_{LOO} /pixel	time/s
		Reference image	Sensed image	Match			
Dataset1	BFSIFT	1940	1902	5	8.35	5.42	45.79
	SIFT+NDSS	3237	3291	12	1.17	1.14	39.52
	Our approach	1914/3237 *	1807/3291	12	0.81	0.83	39.04
Dataset2	BFSIFT	556	335	14	24.47	23.06	41.12
	SIFT+NDSS	793	440	20	2.89	2.86	13.53
	Our approach	337/793	230/440	11	0.94	0.95	16.61
Dataset3	BFSIFT	590	503	4	0.95	0.97	38.72
	SIFT+NDSS	796	648	6	0.65	0.70	13.29
	Our approach	578/796	499/648	4	0.49	0.51	15.85

به منظور بررسی کمی عملکرد ثبت، ما خطای جذر-میانگین-مربعات (RMSE) را بین نقاط کلیدی متناظر اتخاذ می نماییم و می توان آن را به صورت زیر بیان نمود

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \quad (9)$$

که در آن (x_i, y_i) و (x'_i, y'_i) مختصات جفت نقطه کلیدی تطبیق نام هستند. n به معنی تعداد کل نقاط تطبیق است. علاوه بر این، دیگر اندازه موثر توصیف شده در [14] استفاده شده است، که از این به بعد به عنوان RMS_{LOO} اختصاص داده می شود. بر اساس روش باقی گذاشتن-یک مورد، اندازه گیری RMS_{LOO} به عنوان یک معیار بسیار عادلانه تر در نظر گرفته می شود. با توجه به RMSE و RMS_{LOO} ، دقت زیرپیکسل، رضایت بخش است. نتایج ارزیابی کمی برای هر روش در جدول 2 ذکر شده است.

از سه روش مورد استفاده برای مقایسه، روش پیشنهادی ما، بهترین عملکرد را در میان مقایسه ها ارائه می دهد. با بازرسی بصری، به نظر می رسد که نتایج ثبت [یعنی، شکل 6- (d) 4] در تمام مجموعه داده ها معتبر و دقیق هستند. در شکل 6-4 و جدول دوم، ما مشاهدات زیر را انجام دادیم: 1) به جز مجموعه داده 3، با توجه به وجود

تطبیقات نادرست، دو مجموعه داده دیگر نمی تواند با موفقیت توسط روش BFSIFT ثبت شود، همانطور که در شکل 4 (a) و 5 (a) ارائه شده است. 2) روش مبتنی بر NDSS می تواند نقاط کلیدی بیشتر را نسبت به روش BFSIFT استخراج نماید. با توجه به زمان اجرا (همه نتایج زمان بندی بر روی یک PC 2.7 گیگاهرتز به دست آمده اند)، رویکرد ما به وضوح از روش BFSIFT بهتر عمل نمود. 3) اگر چه NDSS + SIFT عملکرد ثبت بهتری را در مقایسه با روش BFSIFT در تصویر SAR به دست آورد، به یک مقدار نسبتا بالا از RMSE منجر می شود که نتیجه غیر قابل قبول است. 4) در مقایسه با BFSIFT، روش ما نه تنها تعداد بیشتری از نقاط کلیدی اولیه را حاصل می نماید، بلکه همچنین دارای دقت تطبیق بسیار بالاتری است. در همین حال، از نظر دقت تطبیق، روش ما بهتر از NDSS + SIFT عمل می کند. این مزیت از مرحله حذف نقطه دورافتاده ما با اطلاعات تجانس فاز ناشی می شود که آن نقاط کلیدی اشتباه را حذف می نماید.

به طور کلی، مزیت رویکرد ما از نظر کمی و کیفی با اشاره به شکل 4-6 و جدول دوم قابل رویت است. دقت هماهنگی روش پیشنهادی ما در عرض یک پیکسل است.

4. نتیجه گیری

در این مقاله، یک الگوریتم جدید برای ثبت SAR مطرح شده است، که ترکیبی از SIFT، انتشار غیرخطی، و تجانس فاز می باشد. در الگوریتم ما، NDSS با ROEWA برای ارائه چند-مقیاسی تصاویر SAR استفاده می شود، و به طور موثر نویز نقطه ای را کاهش می دهد و جزئیات ریز را در تصویر به طور همزمان حفظ می نماید. ROEWA برای محاسبه گرادیان در ایجاد فضای مقیاس ما استفاده می شود، و مزایای آن از نظر تجربی بر روی تصویر نشان داده است. در نهایت، اطلاعات تجانس فاز در هر نقطه کلیدی به عنوان یک نشانه برای مردود نمودن نقاط کلیدی نادرست استفاده می شود.

یک مقایسه از روش پیشنهادی با روش NDSS و BFSIFT + SIFT داده شده است و نتیجه نشان داده است که تعداد نقاط کلیدی به دست آمده با استفاده از روش ما بیشتر از BFSIFT با فیلتر دو طرفه است. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل اطلاعات تجانس فاز برای نقاط کلیدی، روش ما دارای یک بهبود قابل توجه در دقت تطبیق است.

REFERENCES

- [1] F. Wang *et al.*, "Unsupervised change detection on SAR images using triplet Markov field model," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 697–701, Jul. 2013.
- [2] D. G. Lowe, "Distinctive image features form scale-invariant keypoints," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, Nov. 2004.
- [3] H. Goncalves, L. Corte-Real, and J. A. Goncalves, "Automatic image registration through image segmentation and SIFT," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 7, pp. 2589–2600, Jul. 2011.
- [4] F. Dellinger, J. Delon, Y. Gousseau, J. Michel, and F. Tupin, "SAR-SIFT: A SIFT-like algorithm for applications on SAR images," in *Proc. IEEE IGARSS*, 2012, pp. 3478–3481.
- [5] P. Schwind, S. Suri, P. Reinartz, and A. Siebert, "Applicability of the SIFT operator for geometrical SAR image registration," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 31, no. 8, pp. 1959–1980, Mar. 2010.
- [6] P. F. Alcantarilla, A. Bartoli, and A. J. Davison, "KAZE features," in *Proc. ECCV*, 2012, pp. 214–227.
- [7] S. Wang, H. You, and K. Fu, "BFSIFT: A novel method to find feature matches for SAR image registration," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 649–653, Jul. 2012.
- [8] L. P. Dorado-Muñoz, M. Vález-Reyes, A. Mukherjee, and B. Roysam, "A vector SIFT detector for interest point detection in hyperspectral imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 50, no. 11, pp. 4521–4533, Nov. 2012.
- [9] P. Pietro and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 12, no. 7, pp. 629–639, Jul. 1990.
- [10] J. Weickert, B. M. T. H. Romeny, and M. A. Viergever, "Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 7, no. 3, pp. 398–410, Mar. 1998.
- [11] R. Fjortoft, A. Lopes, P. Marthon, and E. Cubero-Castan, "An optimal multiedge detector for SAR image segmentation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 3, pp. 793–802, May 1998.
- [12] J. Weickert, *Anisotropic Diffusion in Imaging Processing*. Stuttgart, Germany: B. G. Teubner, 1998.
- [13] A. Wong and D. A. Clausi, "ARRSI: Automatic registration of remote-sensing images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 5, pp. 1483–1493, May 2007.
- [14] H. Goncalves, J. A. Goncalves, and L. Corte-Real, "Measures for an objective evaluation of the geometric correction process quality," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 292–296, Apr. 2009.