




Classification of Effective Parameters in Spaceborne and airborne SAR imaging

M. Bayat¹, M. Behzad Fallahpour^{2*}, H. Dehghani³, M.Jafari⁴

^{2*} PhD, Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2023 /04/06, Revised: 2023/04/23, Accepted: 2023/08/04, Published: 2023/08/24)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.5.1>

Abstract

The use of space borne and airborne SARs to obtain remote sensing information is increasing day by day due to the very high capabilities of this type of system. So that these types of systems are considered as a supplement for electro-optical systems. Many factors, parameters and sub-parameters are involved in SAR imaging, so it will be shown that there are more than forty effective parameters and sub-parameters in SAR imaging. This issue complicates the understanding of SAR performance, therefore, in this paper, while knowing the SAR imaging system in detail, all factors, parameters and sub-parameters effective in SAR images are extracted and for the first time, a comprehensive classification of them is made to be presented. This classification is important because by determining these parameters, the context is created for their analysis and finally, extraction of countermeasures specific to the SAR system is created. By presenting the SAR and scene matrix in this paper, it is possible to manage the acquisition of information from the attacker's SAR and implement this management in the form of different defense plans. For example, at the end of the paper, the simulation of the slope effect in SAR imaging will be discussed, and the RCS value of the sloped structure will be extracted as a countermeasure at different incident angles.

Keywords: : Synthetic aperture radar (SAR), Electronic warfare, Classification, SAR and Scene matrix, Information acquisition management.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: m_behzad_fp@yahoo.com

دسته‌بندی پارامترهای موثر در تصویربرداری رادارهای روزنه مصنوعی فضاپایه و هواپایه

میشم بیات^۱، مجتبی بهزاد فلاح پور^{۲*}، حمید دهقانی^۳، مهدی جعفری^۴

۱- دانشیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ۲- دکتری ۳- دانشیار و ۴- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۳، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.5.1>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) Creative Commons Attribution توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

استفاده از رادارهای روزنه مصنوعی (SAR) فضاپایه و هواپایه جهت کسب اطلاعات سنجنش از دور به دلیل قابلیت‌های بسیار بالای این نوع از سامانه‌ها، روز به روز در حال افزایش است. به طوریکه این نوع سامانه‌ها به عنوان مکملی برای سامانه‌های الکترواپتیکی محسوب می‌شوند. در تصویربرداری SAR عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای زیادی دخیل هستند به طوریکه نشان داده خواهد شد بیش از چهار پارامتر و زیرپارامتر موثر در این نوع از تصویربرداری وجود دارند. این موضوع باعث پیچیدگی درک عملکرد SAR می‌شود لذا در این مقاله تلاش می‌شود ضمن شناخت دقیق سامانه‌ی تصویربرداری SAR، کلیه‌ی عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای موثر در تصاویر SAR استخراج شده و برای اولین بار یک دسته بندی جامع از آنها ارائه گردد. این دسته بندی از آن جهت دارای اهمیت است که با تعیین این پارامترها زمینه برای تحلیل آنها و در نهایت استخراج راهکارهای مقابله مختص سامانه SAR ایجاد می‌شود؛ به طوریکه با ارائه ماتریس SAR و صحنه در این مقاله، می‌توان مدیریت کسب اطلاعات از SAR مهاجم را در دست گرفت و این مدیریت را در قالب طرح‌های مختلف پدافندی پیاده سازی نمود. به عنوان مثال در انتهای مقاله به شبیه سازی اثر شیب در تصویربرداری SAR پرداخته می‌شود و مقدار RCS سازه-ی شیبدار به عنوان یک راهکار مقابله، در زوایای فرود مختلف استخراج خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: رادار روزنه مصنوعی (SAR)، جنگ الکترونیک، دسته بندی، ماتریس SAR و صحنه، مدیریت کسب اطلاعات

۱- مقدمه

سامانه‌های تصویربردار غیرفعال، توانمندی‌های قابل توجهی در کسب اطلاعات دارند. لیکن وجود محدودیت‌هایی در آنها، استفاده از سامانه‌های تصویربرداری فعال را اجتناب ناپذیر می‌کند. از جمله محدودیت‌های سامانه‌های تصویربرداری غیرفعال می‌توان به عدم توانایی دید در شب، تضعیف و پراکندگی امواج توسط اتمسفر و عدم دید در شرایط جوی ابری، بارندگی و گرد و غبار اشاره نمود [۴-۶].

سامانه‌های تصویربرداری SAR علاوه بر پوشش‌دهی نقاط ضعف سنجنش از دور غیرفعال امکان اخذ اطلاعاتی را فراهم می‌آورند که توسط سنجنش از دور الکترواپتیکی امکان پذیر نیست. برای مثال در این نوع سامانه‌های تصویربرداری امکان ثبت فاز و ثبت اطلاعات در قطبیدگی^۷‌های مختلف وجود دارد. اطلاعات فاز برای اندازه گیری تداخل‌ها و تغییرات سطح بسیار مناسب بوده و می-

سامانه‌های سنجنش از دور^۳ تصویربردار به صورت فعال^۴ و غیر فعال^۵ عمل می‌کنند. سامانه‌هایی مثل تصویربردارهای الکترواپتیکی که فقط بازتاب سطوح را در طول موجهای مرئی و مادون قرمز ضبط می‌کنند، سامانه‌های سنجنش از دور غیر فعال و سامانه‌هایی مثل تصویربردارهای SAR^۶ که بازتاب امواج میکروویوی که خود به سطوح تابانده اند را اندازه گیری می‌کنند، در دسته سامانه‌های تصویربرداری فعال قرار دارند [۱-۳].

* رایانامه نویسنده مسئول: m_behzad_fp@yahoo.com

² System

³ Remote Sensing

⁴ Active

⁵ Passive

⁶ Synthetic Aperture Radar (SAR)

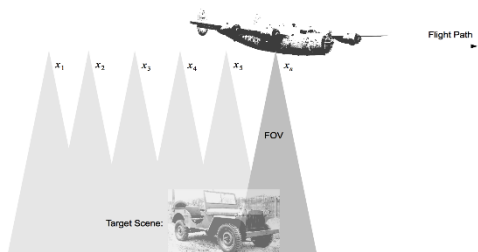
⁷ Polarization

۱۸] نیز به نوع نگاه در سامانه‌های SAR، مدهای عملکردی آن، عوامل موثر در پاسخ ضربه SAR، برخی از محدودیت‌های آن و جنبه‌های دیگری از رادارهای SAR که در تصاویر آن موثرند پرداخته شده است. اما در منابع مشابه یک دسته بندی جامع و مدون از عوامل تاثیرگذار در تصاویر SAR مشاهده نمی‌شود لذا تلاش می‌شود با یک نگاه کلی و از میان مراجع معتبر ضمن استخراج مهمترین عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای تاثیرگذار در تصاویر SAR به دسته بندی این عوامل نیز پرداخته شود.

این مقاله در ادامه از بخش‌های زیر تشکیل شده است: استخراج عوامل تاثیرگذار در تصاویر SAR در بخش دوم ارائه می‌شود. سپس در بخش سوم به ارائه دسته بندی نهایی پارامترهای تاثیرگذار در تصاویر SAR پرداخته می‌شود. در بخش چهارم اثر شیب در تصویربرداری SAR شبیه سازی می‌شود و در نهایت در بخش پنجم به بیان نتیجه گیری پرداخته خواهد شد.

۲- استخراج عوامل تاثیرگذار در تصاویر SAR

سامانه‌های SAR برای تصویربرداری نیاز به یک سکوی متحرک دارند تا از حرکت سکو استفاده کرده و در طول زمان با استفاده از یک آنتن کوچک، آنتن بزرگی را شبیه‌سازی کنند (دهانه مصنوعی) و بدین ترتیب به قدرت تفکیک بالایی در جهت سمت دست یابند (شکل ۱). این سامانه‌ها به صورت متوالی سیگنالی را در طول دهانه مصنوعی به سمت ناحیه تصویربرداری (صحنه) می‌فرستند و اکوی بازگشتی را دریافت می‌کنند. سیگنال ارسالی معمولاً از توان بالایی برخوردار است اما توان سیگنال بازگشتی به دلیل پراکنده شدن به جهات مختلف پایین است و در حد توان نویز محیط تصویربرداری (کانال) می‌باشد لذا نیاز است تا توسط بخش پردازش، اکوی بازگشتی از نویز جدا شده و تصویر نهایی استخراج گردد [۷].



شکل ۱: نحوه تصویربرداری SAR هواپایه

باتوجه به موارد بیان شده و مطابق شکل ۲ می‌توان ادعا کرد که در اطلاعات ثبت شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR، پنج عامل رادار، سکوی حامل سنجنده، بخش پردازش، ناحیه تصویربرداری (صحنه) و کانال نقش مهمی دارند که هر کدام از پارامترها و زیرپارامترهای فراوانی تشکیل شده‌اند. در این مقاله

توان با استفاده از آنها تغییرات ارتفاعی سطح را با دقت بسیار بالا استخراج نمود. از امکان اخذ اطلاعات در قطبیدگی‌های مختلف نیز جهت استخراج اطلاعاتی در ارتباط با شکل و جهت اهداف و بافت‌های مختلف سطح استفاده می‌شود [۷-۱۱].

باتوجه به قابلیت‌هایی که سامانه‌های تصویربرداری SAR ارائه نموده‌اند، نه تنها این نوع سنجش از دور به عنوان مکملی برای سنجش از دور الکترواپتیکی مطرح شده، بلکه در بسیاری از کاربردها به عنوان تنها گزینه مطرح می‌گردد. با این وجود، نحوه عملکرد در این نوع سامانه‌های تصویربرداری نسبت به سنجش از دور غیر فعال، بسیار پیچیده‌تر می‌باشد؛ به طوریکه عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای زیادی در تشکیل تصویر SAR دخیل هستند و همان طور که در همین مقاله نشان داده خواهد شد بیش از چهل پارامتر موثر در تصویربرداری SAR وجود دارد [۱۲ و ۱۳]. کارکردن با این حجم از پارامترها بسیار مشکل بوده لذا ارائه یک دسته بندی جامع از پارامترهای ذکر شده می‌تواند بسیار موثر باشد و این موضوع اصلی این مقاله است. دسته بندی ذکر شده قابلیت‌های زیر را ایجاد می‌کند:

- ۱- شناخت دقیق و سامانه‌ی سامانه SAR
- ۱- امکان تعیین پارامترهای موثر در تصویربرداری SAR از منظر جنگ الکترونیک.
- ۲- امکان ایجاد ماتریس دارایی و تهدید^۲. با تشکیل این ماتریس می‌توان به ارائه راهکارهای پدافندی مختص سامانه SAR در قالب تکنیک‌های جنگ الکترونیک فعال و غیرفعال پرداخت.
- ۳- امکان تحلیل پارامترهای موثر در تصویربرداری SAR. با دسته‌بندی ارائه شده مشخص می‌شود کدام پارامتر را می‌توان به صورت مستقل و یا وابسته مورد تحلیل قرار داد. این امر در انجام آزمایشهای^۳ HIL و^۴ SIL سامانه‌های SAR بسیار موثر است.

باتوجه به موارد بالا، مقاله حاضر را می‌توان یکی از کارهای پایه‌ای در زمینه رادارهای تصویربرداری SAR دانست. به عنوان مثال در [۱۴] تاثیر پارامترهای محیطی و راداری بر تصویربرداری SAR از اقیانوس و دریا مورد بررسی قرار گرفته است و یا در [۱۷-۱۵] تاثیر نویز لکه ای^۵ در تصاویر راداری و پلاریمتری و چگونگی کاهش آن مشاهده می‌شود. همچنین [۱۷ و ۱۶] منابع مطلوبی برای بیان الگوریتم‌های تشکیل تصویر (Omega-k, CSA, RDA) و نحوه اثرگذاری آنها در تصاویر SAR می‌باشند. در [۱۵] و [۲۵]-

¹ Texture

² Asset and threat matrix

³ Hardware In the Loop (HIL)

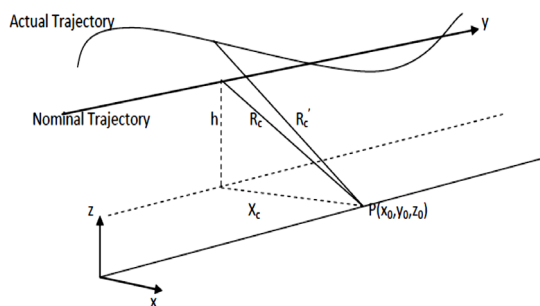
⁴ Software In the Loop (SIL)

⁵ Speckle Noise

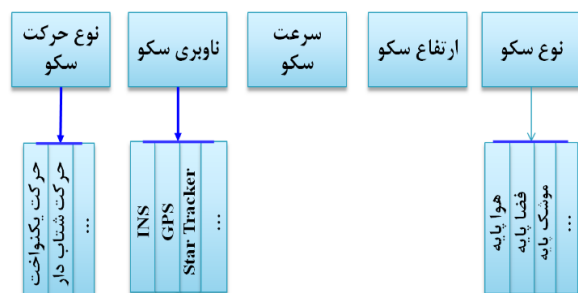
۲-۲- پارامترهای سکوی حامل سنجنده

سکوی حامل SAR نقش به‌سزایی در تصویربرداری SAR دارد. زیرا در این سامانه‌ها برای دستیابی به قدرت تفکیک مناسب در سمت، آنتن سامانه در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت داده شده و اطلاعات دریافتی توسط سامانه در طول این مسیر به صورت یکجا مورد پردازش قرار می‌گیرد. در این سامانه‌ها، در حالت ایده‌آل فرض بر آن است که در طول زمان داده برداری، فاز سیگنال دریافتی تنها تحت تاثیر جابجایی آنتن رادار بر روی مسیر از پیش تعیین شده است. به عبارت دیگر آنتن سامانه، مسیر مستقیم الخطی را با سرعت ثابت طی می‌کند. اما در عمل، به دلیل نیروهای وارد شده به سکوی و تغییرات به وجود آمده در سرعت آن و یا بخاطر نوسانات جوی، سکوی نسبت به مسیر مستقیم منحرف می‌شود لذا برآورده شدن این فرض تقریباً غیر ممکن است. به عبارت دیگر با توجه به نصب آنتن سامانه تصویربرداری بر روی یک سکوی پرنده، معمولاً مسیر طی شده توسط آنتن بر مسیر از پیش تعیین شده تطابق کامل ندارد (شکل ۵). این امر باعث ایجاد خطاهایی در تصاویر شکل دهی شده در خروجی سامانه خواهد شد [۲۸].

در سامانه‌های واقعی با استفاده از حسگرهای حرکتی نصب شده بر روی سامانه که به حسگرهای ناوبری مشهور هستند، جابجایی سامانه از مسیر ایده‌آل (جابجایی‌های ناخواسته) اندازه‌گیری شده و اطلاعات حاصل در بخش پردازش جهت تصحیح داده‌های سامانه تصویربرداری استفاده می‌شود [۲۸]. با توجه به موارد بیان شده مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای سکوی مطابق شکل ۶ دسته بندی می‌شود.

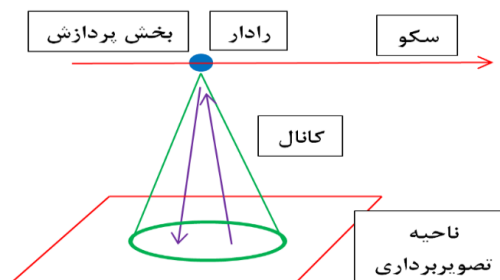


شکل ۵: نمایش حرکت ایده‌آل و حرکت واقعی سکوی [۲۸]

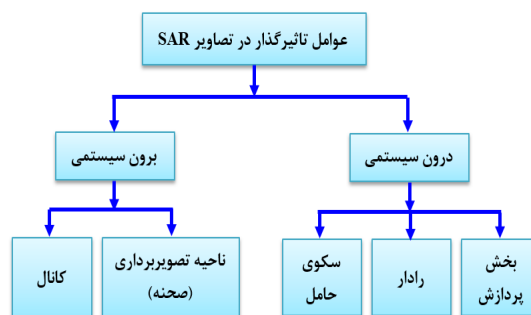


شکل ۶: دسته بندی مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در سکوی

این عوامل به دو دسته درون سامانه‌ی و برون سامانه‌ی تقسیم می‌شوند (شکل ۳) و در ادامه به استخراج مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در هر عامل پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که منظور از سامانه در بیان واژه‌های درون سامانه‌ی و برون سامانه‌ی، سامانه تصویربرداری SAR است.



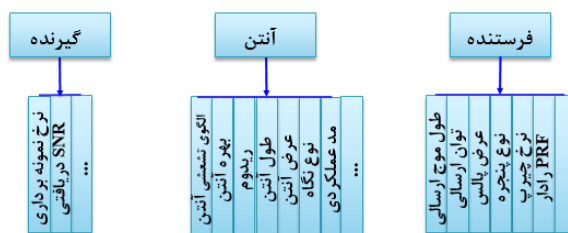
شکل ۲: استخراج عوامل تاثیرگذار در تصاویر SAR



شکل ۳: دسته بندی عوامل تاثیرگذار در تصاویر SAR

۲-۱- پارامترهای رادار

عامل رادار خود از سه پارامتر فرستنده، آنتن و گیرنده تشکیل شده است. هر کدام از این پارامترها دربرگیرنده زیر پارامترهای فراوانی می‌باشند. به طور مثال در بخش فرستنده، پلاریزاسیون موج ارسالی، توان سیگنال ارسالی و ... بسیار مهم هستند. همچنین در بخش آنتن، بهره آنتن، الگوی تشعشعی آنتن و ... از اهمیت بالایی برخوردارند و به همین ترتیب نرخ نمونه برداری و ... نیز در بخش گیرنده مهم می‌باشند [۲۶ و ۲۷]. با توجه به موارد بالا پارامترها و زیر پارامترهای موجود در عامل رادار که یک عامل درون سامانه‌ی محسوب می‌شود را می‌توان مطابق شکل ۴ دسته بندی نمود.



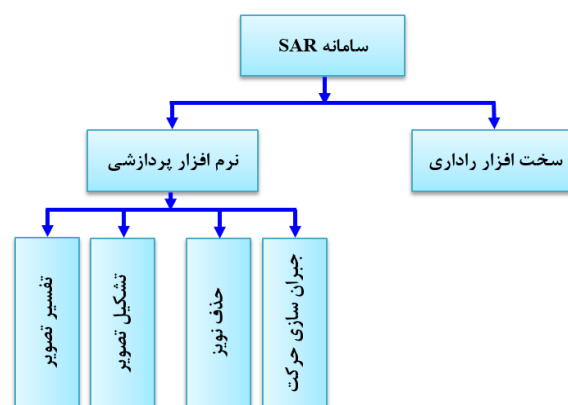
شکل ۴: دسته بندی مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در عامل رادار

۳-۲- پارامترهای بخش پردازش

سامانه‌های تصویربرداری SAR به‌طور کلی شامل دو بخش اساسی سخت افزار راداری و نرم افزار پردازشی می‌باشند. در واقع آنچه که باعث تفاوت SAR با سایر رادارها می‌شود همین بخش پردازش است که خود شامل چهار بخش حذف نویز، جبران سازی حرکت^۱، تشکیل تصویر و تفسیر تصویر است (شکل ۷). هر کدام از این بخش‌ها شامل پارامترهای فراوانی هستند که به طریقی در تصاویر SAR موثر می‌باشند. در ادامه ضمن تشریح بخش‌های مختلف پردازشی SAR به استخراج مهمترین پارامترهای آنها نیز پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- جبران‌سازی حرکت

منظور از بخش جبران‌سازی حرکت، جبران‌سازی خطاهایی است که در اثر عدم حرکت سکو در مسیر مستقیم به وجود می‌آید.



شکل ۷: دسته بندی زیربخش‌های مختلف رادار SAR

به‌منظور جبران‌سازی بایستی موقعیت دقیق پرنده و میزان انحراف آن از مسیر از پیش تعیین شده مشخص گردد. تعیین موقعیت پرنده به دو صورت امکان پذیر است:

۱- جبران حرکت با استفاده از داده‌های ذخیره شده از آنتن سامانه تصویربرداری

۲- جبران حرکت با استفاده از دستگاه‌های سنجش موقعیت در جبران حرکت با استفاده از داده‌های ذخیره شده از آنتن سامانه تصویربرداری، از داده خام ذخیره‌سازی شده توسط سامانه تصویربرداری به منظور استخراج موقعیت پرنده و سپس تصحیح آن استفاده می‌شود. دو دسته اصلی از روش‌هایی که بر مبنای داده خام اقدام به جبران‌سازی حرکت می‌نمایند عبارتند از روش تمرکز خودکار^۲ و جابجایی انعکاس پذیری^۳. در روش تمرکز

خودکار، سامانه سعی در استخراج پارامترهای لازم جهت متمرکز کردن تصویر از داده‌های خام دریافتی دارد. به عنوان مثال در یکی از الگوریتم‌های مورد استفاده در دسته الگوریتم‌های تمرکز خودکار به نام الگوریتم بهینه‌سازی تباین به روش تمرکز خودکار^۴، با استفاده از سعی و خطا، فاز بهینه سیگنال دریافتی برای رسیدن به حداکثر حد تفکیک در تصویر یا بخشی از آن استخراج می‌گردد [۲۹].

در روش جابجایی انعکاس پذیری، طیف فرکانسی داده‌های SAR بعد از فشرده‌سازی برد تحلیل می‌شود تا آثار مسیر پرواز حسگر استخراج شود. این روش با انجام فرآیندی سرعت رو به جلو و شتاب را تعیین می‌کند. با استفاده از این پارامترها، اصلاحات لازم روی داده‌های خام قابل انجام است [۳۰].

در روش جبران حرکت با استفاده از دستگاه‌های سنجش موقعیت، از سامانه‌های ناوبری موجود در سکو استفاده شده و موقعیت و وضعیت سامانه استخراج می‌گردد. سامانه‌های ناوبری موجود معمولاً در سه دسته سامانه ناوبری اینرسی (INS)^۵، سامانه‌های موقعیت یاب جهانی به مانند GPS^۶، Glonass و ... و یا سامانه‌های ناوبری با استفاده از نقاط مرجع آسمانی به مانند Star Tracker تقسیم بندی می‌شوند. این سامانه‌ها، موقعیت سکو که شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع سکو است را استخراج می‌کنند. سپس با استفاده از داده‌های شتاب‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های IMU^۷، وضعیت سامانه که شامل مولفه‌های زاویه‌ای Roll، Pitch و Yaw است در محل IMU اندازه‌گیری می‌شود و بدین ترتیب میزان انحرافات سکو از مسیر مستقیم و سرعت آن محاسبه می‌گردد. در برخی از سامانه‌ها علاوه بر اطلاعات دستگاه تعیین موقعیت از اطلاعاتی که به طور مستقیم از داده‌های SAR تخمین زده شده است نیز به عنوان مکمل اطلاعات استفاده می‌شود [۲۹ و ۳۰].

۳-۳-۲- حذف نویز

منظور از حذف نویز در این قسمت، حذف نویز لکه‌ای است. نویز لکه‌ای، نوعی اختلال در تصاویر راداری می‌باشد که باعث ظاهر شدن دانه‌های ریز و درشت (باقت فلفل نمکی) در تصویر می‌شود. این نویز که جز لاینفک تصاویر SAR محسوب می‌شود، زاینده ساختار بهم ریخته سطح و همچنین تداخل‌های سازنده و مخرب سیگنال‌های بازتابیده شده می‌باشد. به عنوان مثال یک سطح هموار مانند علفزار در شکل ۸ با در نظر نگرفتن اثر این اختلال در پیکسل‌های تصویر با درجه روشنایی یکسان مشاهده

^۴ Contrast Optimization Autofocus Algorithm(COAA)

^۵ Inertial Navigation System(INS)

^۶ Global Position System(GPS)

^۷ Inertial Measurement Unit(IMU)

^۱ Motion Compensation

^۲ Autofocus

^۳ Reflectivity Displacement Method (RDM)

عملکرد الگوریتم‌های نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر و نهایتاً مقایسه آنها، معمولاً دو رویکرد وجود دارد. در رویکرد اول الگوریتم‌ها در محیط بدون نویز مقایسه می‌شوند. این مقایسه نشان می‌دهد کدام الگوریتم از میزان تفکیک‌پذیری (درجه تباین) بالاتری برخوردار است. در رویکرد دوم میزان صحت عملکرد الگوریتم‌ها در حضور نویز کانال بررسی و مقایسه خواهد شد. اهمیت این مقایسه از آن جهت است که نشان می‌دهد کدام الگوریتم تقریب بهتری از یک فیلتر منطبق دو بعدی می‌باشد. برای اندازه‌گیری کیفیت نگاشت‌ها در هر دو محیط معیارهایی وجود دارد که عبارتند از: خطای میانگین مربعات^۱ (MSE)، نسبت بیشینه گلبرگ جانبی^۲ (PSLR)، بهره پردازش^۳، عرض پاسخ ضربه^۴ (IRW) و ... در نتیجه می‌توان ادعا کرد که نوع الگوریتم پردازشی به همراه مشخصات آن نقش به‌سزایی در تصاویر SAR دارد [۱۳].

۲-۳-۴- تفسیر تصویر

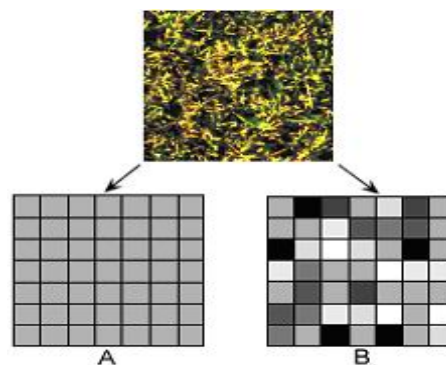
تفسیر تصاویر SAR و استخراج اطلاعات از آنها یکی از مراحل مهم در بخش پردازش تصاویر SAR محسوب می‌شود. تفسیر تصاویر SAR نقش به‌سزایی در تحلیل اثر پارامترهای موثر در تصاویر SAR دارد. به‌گونه‌ای که می‌توان تحلیل پارامترها را بر مبنای تفسیرپذیری تصاویر SAR انجام داد. به عنوان مثال، در ارائه راهکارهای پدافندی برای مقابله با SAR به دنبال ایجاد اختلال در تفسیر تصاویر دشمن هستیم و می‌خواهیم تفسیرپذیری آنها را دچار خطا و لغزش کنیم. در نهایت با توجه به موارد بالا مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای بخش پردازش در شکل ۹ جمع‌بندی می‌شود.

۲-۴- پارامترهای کانال

کانال یا محیط بین رادار و صحنه نقش مهمی در تصاویر SAR دارد. زیرا همواره از امواج مختلف و ناخواسته‌ای چون نویز و جمینگ پوشیده شده است؛ لذا در کیفیت تصاویر SAR نقش به‌سزایی خواهد داشت. برای مدل‌سازی این اثرات ناخواسته معمولاً آنها را به صورت جمع شونده به سیگنال خام برگشتی اضافه می‌کنند این در حالی است که نویز لکه‌ای که جزو ذات تصاویر SAR می‌باشد معمولاً به صورت ضرب شونده مدل می‌شود [۱۳]. شکل ۱۰ مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در عامل کانال را نشان می‌دهد.

می‌شود. حال آنکه در تصویر حقیقی به علت تداخل سیگنال‌های پراکنده شده پیکسل‌ها دارای درجات روشنایی متفاوت می‌باشند [۱۷].

نویز لکه‌ای کیفیت تصاویر را کاهش داده و تحلیل تصاویر را مشکل می‌سازد. بنابراین قبل از هرگونه پردازشی بر روی تصاویر SAR باید پیش پردازش‌هایی مبنی بر حذف این نویز انجام گیرد تا شناسایی اهداف در تصویر به خوبی حاصل گردد [۱۶]. برای حذف نویز لکه‌ای از تصاویر SAR دو دسته روش وجود دارد که عبارتند از: حذف نویز قبل از تشکیل تصویر و حذف نویز بعد از تشکیل تصویر. معمولاً برای حذف نویز بعد از تشکیل تصویر از فیلترهای مختلفی چون فیلتر میانه، Enhanced Frost، Lee و Frost و فیلتر Enhanced Lee استفاده می‌شود [۱۷]. بعضی از این فیلترها تفسیر بصری بهتری دارند و بعضی‌ها کاهش نویز بهتری انجام می‌دهند. لذا برای هر کاربردی، فیلتر خاصی استفاده می‌شود. به کارگیری این فیلترها می‌تواند نویز لکه‌ای را کاهش دهد اما آن را به طور کامل از بین نمی‌برد. به علاوه ممکن است چندین بار اعمال یک یا چند نوع فیلتر مورد نیاز باشد تا لکه را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. با این وجود با هر بار اعمال فیلتر تصویر محوتر شده و جزئیات مکانی بیشتری از دست می‌رود. لذا بهترین حالت برای حذف نویز لکه‌ای، حین تشکیل تصویر است. برای حذف نویز قبل از تشکیل تصویر از روش‌های Multilook و Look Sumation و ... استفاده می‌شود [۱۷].



شکل ۸: تاثیر نویز لکه‌ای در پیکسل‌های تصویر [۱۷]. تصویر A با فرض اینکه نویز لکه‌ای وجود نداشته باشد. در تصویر B نویز لکه‌ای باعث ایجاد دانه‌های ریز و درشت (بافت فلفل نمکی) در تصویر شده است.

۲-۳-۳- پارامترهای تشکیل تصویر

در سامانه‌های تصویربرداری SAR ابتدا یک فضای سیگنالی متناسب با منطقه تحت مشاهده در فرکانس مایکروویو تشکیل می‌شود. سپس این فضا توسط الگوریتم‌های مختلف تشکیل تصویر به فضای تصویری نگاشت داده خواهد شد. در این میان، آنچه از اهمیت بالایی برخوردار است، کیفیت نگاشت می‌باشد که کاملاً وابسته به نحوه عملکرد الگوریتم است. برای ارزیابی کیفیت

¹ Mean Square Error(MSE)

² Peak Side lobe Ratio(PSLR)

³ Processing Gain

⁴ Impulse Response Width(IRW)

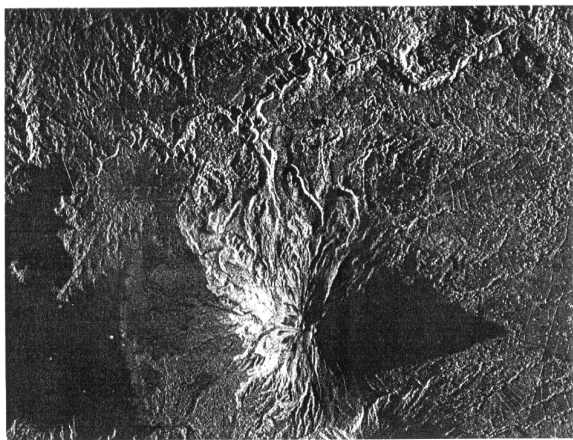
۲-۵-۱- سایه

سایه‌های رادار شامل مناطقی بر روی زمین هستند که امواج میکروویو را دریافت نمی‌کنند و به همین علت هیچ نوع بازگشتی نیز به سمت سنجنده ندارند. این سایه‌های راداری به علت شیب مثبت اشیاء (نسبت به جهت ارسال امواج) که مانع رسیدن امواج به منطقه پشت آنها می‌شود، تولید شده و در تصاویر راداری بسیار تاریک دیده می‌شوند (شکل ۱۱). سایه در تصاویر رادار یک کلید مهم برای تفسیر عوارض برجسته می‌باشد به طوری که می‌توان اطلاعات درباره صحنه، مانند ارتفاع یک شی را از طریق سایه بدست آورد [۳۱].

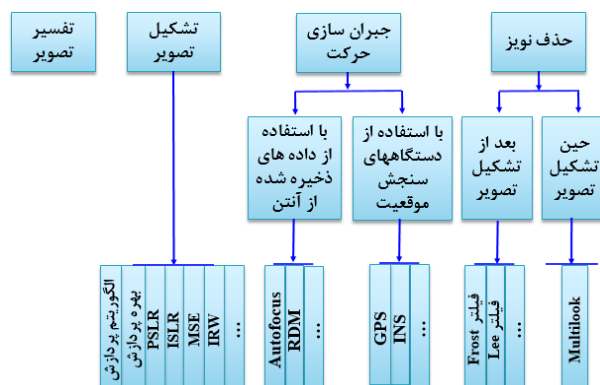
اندازه و شدت سایه‌های راداری به دو پارامتر مهم زاویه تورفتگی و شیب زمین بستگی دارد. به گونه‌ای که اگر شیب سطوح پشتی تپه‌ها و برآمدگی‌های سطح زمین بیشتر از زاویه تورفتگی باشند، توسط پالس راداری روشن نمی‌شوند و در تصویر به صورت سایه کامل دیده می‌شوند (شکل ۱۲).

۲-۵-۲- کوتاه نمایی

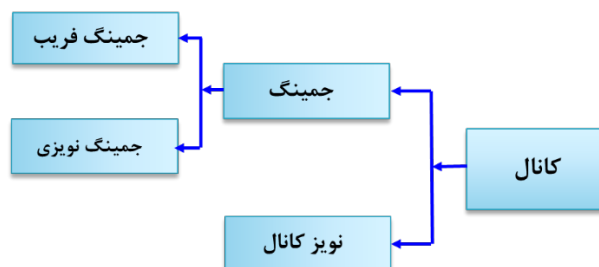
کوتاه‌نمایی در تصویر رادار، فشرده شدن ترکیب صحنه است. کوتاه‌نمایی وقتی به بیشترین مقدار خود می‌رسد که یک شیب تند برای پرتو رادار قائم باشد، یا به عبارتی، زاویه فرود محلی صفر باشد در نتیجه بالا و پایین یک تپه موقعیت یکسانی از تصویر را اشغال می‌کند. برای یک شیب مفروض یا دامنه تپه، اثرات کوتاه‌نمایی همراه با افزایش زاویه فرود کاهش می‌یابد. به طوریکه در زاویه فرود تقریباً 90^0 ، اثرات کوتاه‌نمایی حذف می‌شود، اما سایه شدید ممکن است اتفاق بیافتد. لذا در تعیین زاویه فرود، همیشه بین اتفاق افتادن سایه و پدیده کوتاه‌نمایی یک مصالحه^۶ وجود دارد (شکل ۱۳) [۳۲-۳۶].



شکل ۱۱: وجود سایه در تصویر راداری SAR [۳۱]



شکل ۹: دسته بندی مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در بخش پردازش



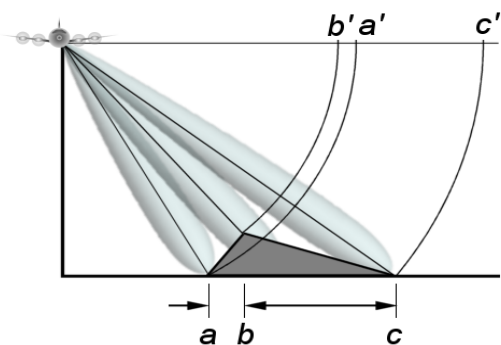
شکل ۱۰: دسته بندی مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در بخش کانال

۲-۵- پارامترهای ناحیه تصویربرداری

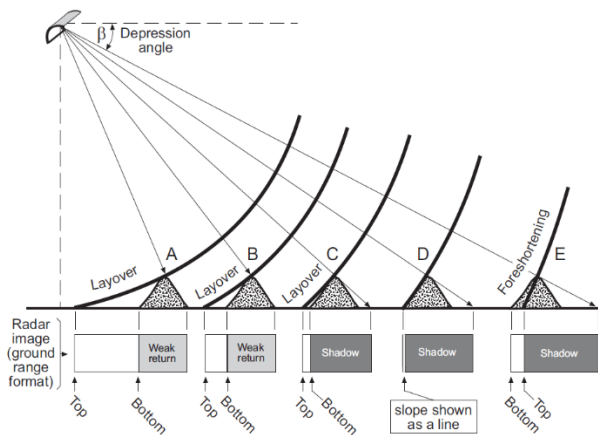
ناحیه تصویربرداری از پارامترهای زیادی چون شیب سطح، جنس سطح، ناهمواری سطح و ... تشکیل شده است که هر کدام به گونه‌ای در تصاویر SAR نقش دارند. در واقع هر کدام از این عوامل بر روی مقدار RCS^۱ صحنه تاثیر گذاشته و RCS هم در میزان روشنایی تصاویر SAR نقش دارد. به عنوان مثال عامل شیب معمولاً باعث ایجاد سه اعوجاج هندسی مهم به نام‌های وارونگی^۲، کوتاه‌شدگی^۳ و سایه‌های راداری^۴ در تصاویر SAR می‌شود. تمامی این پدیده‌ها تابعی از زاویه فرود محلی^۵ هستند که خود تابعی از زاویه دید و شیب محلی سطح زمین می‌باشد. به عبارت دیگر تاثیر شیب سطح بر زمان رفت و بازگشت سیگنال رادار به گونه‌ای است که باعث می‌گردد تا سیگنال بازگشتی از نقاط مختلف سطح با فاصله زمانی تقریباً یکسان به رادار برسند و باعث ایجاد خطا در محاسبه فاصله شوند. در ادامه این پدیده‌ها مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرند [۳۱].

^۱ Radar Cross Section (RCS)^۲ Layover^۳ Foreshortening^۴ Shadowing^۵ Local Incident Angle^۶ Tradeoff

پس همان‌طور که مشاهده شد، از آنجایی که سامانه‌های تصویربرداری SAR سامانه‌های جانب‌نگر هستند وجود پدیده سایه در آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. به علاوه این نوع از سامانه‌ها به دلیل اندازه‌گیری برد مایل در این هندسه خاص، در مقابل سطوح شیب دار معمولاً دچار خطاهای کوتاه‌نمایی و وارونگی ارتفاع می‌شوند. شکل ۱۵ نحوه ایجاد این سه پدیده را نشان می‌دهد.

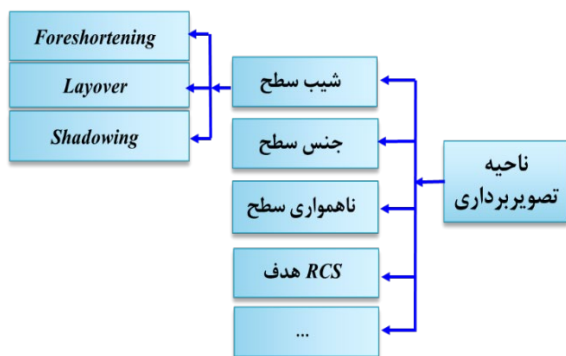


شکل ۱۴: چگونگی شکل‌گیری وارونگی ارتفاع [۳۲]

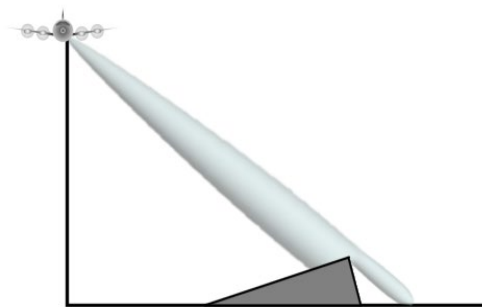


شکل ۱۵: نحوه شکل‌گیری سایه، کوتاه‌نمایی و وارونگی ارتفاع در یک شکل [۳]

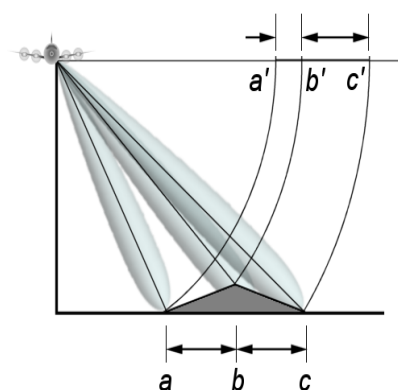
باتوجه به موارد بالا مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در ناحیه تصویربرداری مطابق شکل ۱۶ دسته‌بندی می‌شوند.



شکل ۱۶: دسته‌بندی مهمترین پارامترها و زیرپارامترهای موجود در ناحیه تصویربرداری



شکل ۱۲: نحوه ایجاد سایه [۳۲]



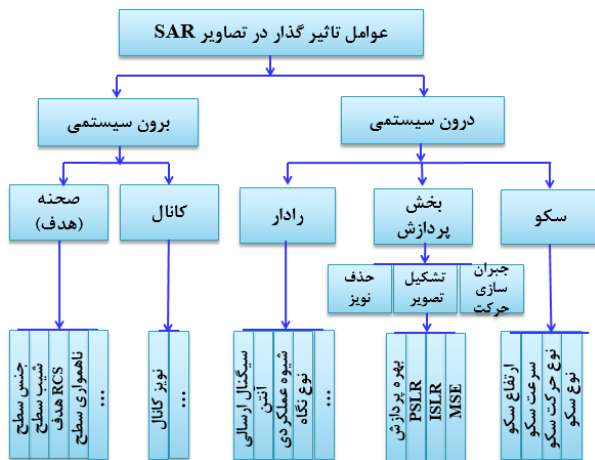
شکل ۱۳: چگونگی پدید آمدن کوتاه‌نمایی [۳۲]

۲-۵-۳- وارونگی

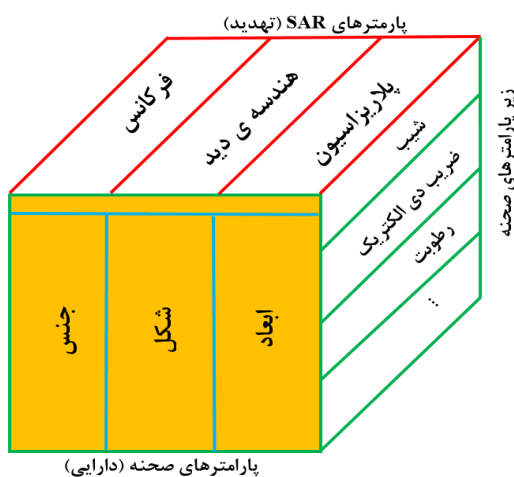
وارونگی ارتفاع یک نمونه شدید از پدیده کوتاه‌نمایی است. وارونگی ارتفاع وقتی اتفاق می‌افتد که انرژی انعکاس یافته از قسمت بالایی یک مختصه برجسته، قبل از رسیدن اکو از قسمتهای پائین‌تر آن، توسط سنجنده دریافت شود. در مورد اشیایی که دارای شیب و ارتفاع زیاد و با زوایای فرود محلی کوچک هستند، همیشه نوک شی به سنجنده نزدیک‌تر است، بنابراین موج ابتدا به نقاط بالایی شی برخورد کرده و سپس اکو مربوط به نقاط پایینی شیب به سمت سنجنده حرکت می‌کند در نتیجه نقاط بالایی زودتر از نقاط پایینی شی ثبت شده و به این ترتیب نوعی اعوجاج در تصویر به وجود می‌آید و باعث جابجایی موقعیت در تصاویر راداری می‌شود. میزان جابجایی به میزان اختلاف زمان برخورد جبهه موج با بخش‌های بالا و پائین شی بستگی دارد. در شکل ۱۴ چگونگی شکل‌گیری وارونگی نمایش داده شده است.

پدیده وارونگی برای اشیاء نزدیک‌تر به سنجنده (با فرض ثابت بودن شیب) نسبت به اشیاء دورتر شدیدتر است. تجهیزات تصویربرداری راداری فضاپایه بیشتر در معرض این نوع تخریب هستند در حالیکه در تصویربرداری بوسیله هواپیما این پدیده (به استثناء فواصل بسیار نزدیک) بسیار کمتر رخ می‌دهد [۳۱].

دارایی در فرکانس‌های متفاوت از سنجنده تهدید به شکل‌های مختلفی ظاهر می‌شود.



شکل ۱۷: استخراج و دسته بندی کلیه عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای تاثیر گذار در تصاویر SAR



شکل ۱۸: ماتریس SAR و صحنه. تحلیل پارامترهای دارایی با توجه به مشخصات تهدید

باتوجه به موارد بیان شده در قسمت بعد به شبیه سازی اثر شیب به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای صحنه پرداخته خواهد شد.

۴- شبیه سازی اثر شیب در تصویربرداری SAR

در این قسمت به شبیه سازی اثر شیب در تصویربرداری SAR پرداخته خواهد شد. همان طور که قبلا بیان شد عامل شیب سه صورت سایه، کوتاه نمایی و وارونگی در تصویر SAR مشاهده می‌شود. برای شبیه سازی این مقوله یک سازه هرمی شیبدار مطابق شکل ۱۹ در محیط نرم افزاری CST تشکیل می‌گردد. سپس با استفاده از یک SAR فرضی که مشخصات آن در جدول ۱ آمده، به تصویربرداری از این سازه در زوایای فرود مختلف پرداخته می‌شود. بدین ترتیب فضای تصویری جسم شیبدار در

۳- دسته بندی نهایی پارامترهای تاثیر گذار در تصاویر SAR

تا اینجا مهم‌ترین عوامل، پارامترها و زیرپارامترهای موثر در تصاویر SAR استخراج و دسته بندی شد. جمع بندی تمام موارد بیان شده در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. این شکل یک دسته بندی کامل و جامع از عوامل تاثیر گذار در تصاویر SAR را نشان می‌دهد لذا از اهمیت بالایی برخوردار است.

دسته بندی ذکر شده قابلیت های زیر را ایجاد می کند:

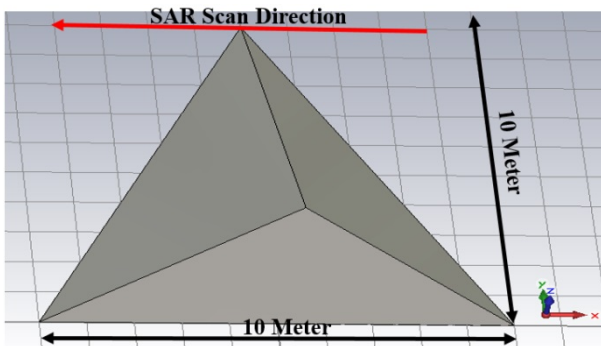
- ۱- شناخت دقیق از سامانه ی SAR
- ۲- امکان تعیین پارامترهای موثر در تصویربرداری SAR از منظر جنگ الکترونیک و پدافند غیرعامل.
- ۳- امکان ایجاد ماتریس دارایی و تهدید. با تشکیل این ماتریس می‌توان به ارائه راهکارهای پدافندی مختص سامانه SAR در قالب تکنیک‌های جنگ الکترونیک فعال و غیرفعال پرداخت.

- ۴- امکان تحلیل پارامترهای موثر در تصویربرداری SAR. با دسته بندی ارائه شده مشخص می‌شود کدام پارامتر را می‌توان به صورت مستقل و یا وابسته مورد تحلیل قرار داد.

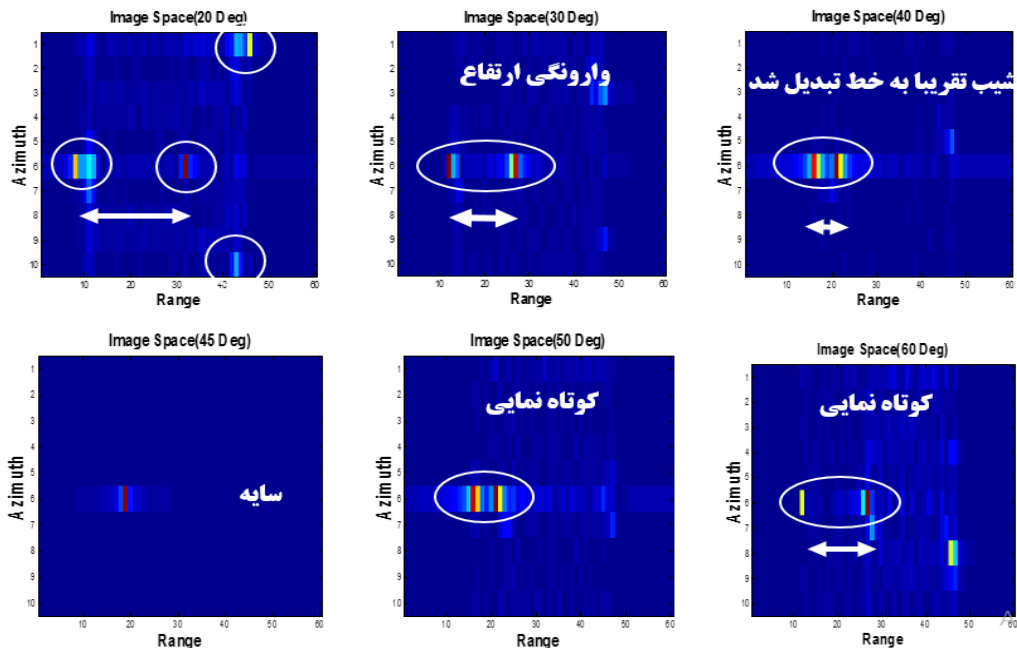
به عنوان مثال برای تعیین عوامل تاثیر گذار در تصاویر SAR از دیدگاه پدافند غیرعامل باید گفت که عوامل درون سامانه ی موجود در شکل ۱۷ کاملا وابسته به سامانه ی تهدید بوده و در اختیار نیروهای خودی نمی‌باشند لذا برای جنگ الکترونیک مناسب نیستند اما در مقابل، عوامل برون سامانه ی هستند که تقریبا در اختیار نیروهای خودی بوده و می‌توانند مبنای برنامه ریزی برای پدافند غیرعامل باشند. به علاوه کانال و صحنه تصویربرداری از عوامل برون سامانه ی محسوب می‌شوند که عمدتا عامل صحنه برای پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار می‌گیرد و عامل کانال برای جمنینگ فعال مناسب می‌باشد.

همچنین باتوجه به شکل ۱۷ می‌توان به استخراج ماتریس دارایی و تهدید مطابق شکل ۱۸ پرداخت. این ماتریس برای ارائه راهکارهای پدافندی مختص سامانه SAR بسیار مناسب است و مشخص می‌سازد با استفاده از کدام پارامتر می‌توان به ارائه راهکار مد نظر پرداخت. به علاوه این ماتریس نشان می‌دهد عامل صحنه به عنوان مهمترین عامل در پدافند غیرعامل، مستقل نبوده و وابسته به مشخصات تهدید است به طوریکه دو ماتریس تهدید و دارایی همواره باید با همدیگر دیده شوند. به عنوان مثال اینکه یک سطح (دارایی) در تصویر راداری ناصاف (روشن) به نظر آید، تا حد زیادی به طول موج SAR (مشخصه تهدید) وابسته است. یک سطح خاص ممکن است برای یک رادار با طول موج کوتاه ناصاف باشد اما برای طول موج‌های بلندتر صاف باشد. در نتیجه عامل

البته لازم به ذکر است که این راهکار در صورتی قابل استفاده است که اطلاعات کاملی در مورد پارامترهای مختلف سکوی حامل سنجنده SAR در اختیار باشد. در غیر این صورت بخشی که برای یک سنجنده در سایه قرار دارد، ممکن است برای یک سنجنده دیگر در سایه قرار نداشته باشد. یا در حالت دیگر، بخشی که در یک مسیر پروازی در سایه قرار داد ممکن است در مسیر پروازی دیگر در سایه نباشد. لذا اگر جهت حرکت و مشخصات سامانه‌ی تصویربرداری SAR مشخص باشد (این مسئله در مورد سکوه‌های ماهواره‌ای معمولاً رخ می‌دهد) می‌توان از این راهکار برای پنهان کردن اهداف و تاسیسات در مقابل سیستم‌های تصویربرداری SAR استفاده نمود. اثر کوتاه‌نمایی نیز در تصاویر مربوط به زوایای فرود ۵۰ و ۶۰ درجه به خوبی دیده می‌شود.



شکل ۱۹: مدل سه بعدی ایجاد شده از یک سازه‌ی هرمی شیبدار در محیط نرم افزاری CST. جهت حرکت SAR از راست به چپ صفحه. ارتفاع هرم نیز ۱۰ متر می‌باشد.



شکل ۲۰: فضاهای تصویری استخراج شده از سازه‌ی هرمی شیبدار در زوایای فرود مختلف

زوایای فرود مختلف استخراج شده و در شکل ۲۰ نشان داده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود اثر سایه، کوتاه‌نمایی و وارونگی ارتفاع به خوبی مشخص است. ابتدا در زاویه‌ی ۲۰ درجه کنج‌های مربوط به شکل هرمی موجود در شکل ۱۹ در فضای تصویری SAR نشان داده شده است. زیرا مطابق با تئوری RCS، بیشترین بازگشتی معمولاً مربوط به نقاط کنج می‌باشد و بازگشتی از سطوح صاف تقریباً ناچیز است. با دقت در شکل ۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که هرچه زاویه فرود کمتر باشد وارونگی ارتفاع بیشتر است و با افزایش زاویه فرود به حالتی نزدیک می‌شویم که تقریباً شیب به خط راست در تصویر تبدیل می‌شود. وارونگی ارتفاع در شکل مربوط به زاویه‌ی فرود ۳۰ درجه به وضوح قابل مشاهده است همچنین در شکل مربوط به زاویه‌ی فرود ۴۰ درجه تبدیل شدن شیب به خط راست تقریباً مشهود است. سپس در زاویه‌ی فرود ۴۵ درجه سایه‌ی کامل به خوبی مشاهده می‌شود یعنی هیچ قسمتی از موج از بالای سطح شیب دار عبور نکرده و در فضای تصویری، پشت آن کاملاً تاریک می‌گردد. در واقع شبیه‌سازی مربوط به شکل ۴۵ درجه نشان می‌دهد که می‌توان جهت پنهان کردن تجهیزات و تاسیسات در مقابل سیستم‌های تصویربرداری SAR حداکثر استفاده را از سازه‌های شیبدار کرد و آنها را در سایه‌ی به وجود آمده مخفی نمود. لذا از منظر پدافند غیرعامل می‌توان موضوع مورد نظر (تجهیزات و یا تاسیسات و ...) را در سایه ایجاد شده قرار داد. این سایه می‌تواند به صورت مجازی یا حقیقی ایجاد شده باشد.

۶- مرجع‌ها

- [1] B. Zhao, L. Huang, B. Li, S. Liu, W. Bao, "One-bit splitting deceptive jamming against SAR"; Journal of Defense Technology, vol. 18 pp. 1760-1777, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.09.018>
- [2] S. M. Dejong and F. Van der Meer, Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain, edition, Springer, New York, 2005.
- [3] J. A. Richards, "Remote Sensing with Imaging Radar"; Springer, New York 2009.
- [4] K. Yang, Y. Wei, Ma. Fangfang, "A Large-Scene Deceptive Jamming Method for Space-Borne SAR Based on Time-Delay and Frequency-Shift with Template Segmentation"; Remote Sens. Vol. 12(1) pp. 53-63. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12010053>
- [5] H. Huang, Z. Huang and Y. Zhou, "Jamming Research to SAR based on Frequency Characteristic"; 2nd IEEE International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), pp. 144-147, 2010. 10.1109/ICSPS.2010.5555268
- [6] W. Ye, H. Ruan, S. Zhang and L. Van, "Study of Noise Jamming Based on Convolution Modulation to SAR"; IEEE, International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), pp. 169-172, 2010. 10.1109/CMCE.2010.5609875
- [7] B. Lv, "Simulation Study of Noise Convolution Jamming Countering to SAR"; IEEE International Conference on Computer Design and Applications (ICCCA), pp.130-133, 2010. 10.1109/ICCCA.2010.5541408
- [8] X. Tian and G. Fang, "Study on the Jamming to Synthetic Aperture Radar"; IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2008. 10.1109/ICCEA.2004.1459377
- [9] Y. Lee, J. Park, W. Shin and K. Lee, "A study on jamming performance evaluation of noise and deception jammer against SAR satellite"; 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp.1-3, 2011.
- [10] Q. Liu, J. Dong, X. Wang, S. Xing, and B. Pang, "An Efficient SAR Jammer With Direct Radio Frequency Processing (DRFP)", in: Progress In Electromagnetic Research (PIER Journal), pp. 293-309, 2013. 10.2528/PIER12092404
- [11] Tian, Ti.; Feng, Z.; Yuchen Li.; Weiwei, F, "Evaluation of SAR Deception Jamming Effect based on Convolutional Neural Network"; 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp. 25-32, 2019. 10.1109/APSAR46974.2019.9048464
- [12] L. Nan and Q. Changwen, "Research on Jamming Synthetic Aperture Radar Technologies"; 1st IEEE Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp. 563-566, 2007.
- [13] H, Dehghani. K, Mousazadeh. "SAR Imagery Systems Corrupt Based on Reflectors"; Scientific Journal of Advanced Defense Science and Technology, vol 4 pp. 239-246, 2014.

جدول ۱: مشخصات SAR فرضی برای تصویربرداری از ساختار شیبدار

مشخصات	مقادیر
قدرت تفکیک مکانی سمت	1 m
قدرت تفکیک مکانی برد	0.25 m
فرکانس کاری	10 GHz
پلاریزاسیون	HH
زاویه فرود (θ)	20, 30, 40, 45, 50, 60 Deg
زاویه اسکن (\emptyset)	90 Deg

۵- نتیجه‌گیری

عوامل، پارامترها و زیر پارامترهای تأثیرگذار در تصاویر SAR بسیار متنوع هستند به گونه ای که نشان داده شد بیش از ۴۰ پارامتر زیر در تصاویر SAR دخیلند.

- ۱- قطبیدگی ۲- زاویه دید ۳- زاویه فرود ۴- فرکانس کاری ۵- ریدوم ۶- طول آنتن ۷- عرض آنتن ۸- بهره آنتن ۹- گین آنتن ۱۰- شیوه عملکردی SAR ۱۱- نوع الگوریتم پردازشی ۱۲- توان سیگنال ارسالی ۱۳- نرخ چیرپ ۱۴- نرخ نمونه برداری ۱۵- نوع سکو ۱۶- سرعت سکو ۱۷- الگوریتم جبران سازی حرکت ۱۸- الگوریتم حذف نویز ۱۹- نوع آنتن ۲۰- بهره پردازش ۲۱- پنجره سیگنال ارسالی ۲۲- سطح مقطع راداری ۲۳- شکل هدف ۲۴- ابعاد هدف ۲۵- شیب ۲۶- سایه ۲۷- نوع نگاه ۲۸- جنس هدف ۲۹- زاویه تورفتگی ۳۰- زاویه لوچی (Squint) ۳۱- زاویه فرود محلی ۳۲- ضریب دی الکتریک ۳۳- الگوی آنتن ۳۴- برد مایل ۳۵- فرکانس تکرار پالس (PRF) رادار ۳۶- عرض پالس ۳۷- SNR دریافتی ۳۸- جیمینگ ۳۹- نویز کانال ۴۰- ناهمواری سطحو

این تعدد از پارامترها بر پیچیدگی این نوع از سامانه‌ها می‌افزاید؛ لذا در این مقاله برای اولین بار یک دسته بندی جامع از پارامترهای فوق ارائه شد. این دسته بندی از جهات مختلف دارای اهمیت است. به عنوان مثال با شبیه‌سازی اثر شیب در تصاویر SAR نشان داده شد که اثر شیب در تصاویر SAR به سه صورت سایه، وارونگی و کوتاه‌نمایی می‌باشد و هرچند زاویه فرود کمتر باشد وارونگی ارتفاع بیشتر است و با افزایش زاویه فرود به حالتی نزدیک می‌شویم که شیب تقریباً به خط راست در تصویر تبدیل می‌شود. همچنین نحوه بوجود آمدن سایه در تصاویر SAR به عنوان یک عامل مهم جهت مقابله با سامانه‌های SAR نیز شبیه‌سازی گردید.

- [29] M. Labowski and P. Kaniewski, "Motion Compensation for unmanned aerial vehicles Synthetic Aperture Radar"; IEEE Signal Processing Symposium, pp.1-5, 2015. 10.1109/SPS.2015.7168304
- [30] L. Zhang, G. Wang, Z. Qiao and H. Wang, "Azimuth Motion Compensation With Improved Sub Aperture Algorithm for Airborne SAR Imaging"; IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, pp. 184 – 193, 2017. 10.1109/LGRS.2016.2621054
- [31] K. Fu, Y. Zhang, X. Sun, F. Li, H. Wang and F. Dou, "A Coarse-to-Fine Method for Building Reconstruction From HR SAR Layover Map Using Restricted Parametric Geometrical Models"; IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004 – 2008, 2016.
- [32] S. Papsion and R. M. Narayanan, "Classification via the Shadow Region in SAR Imagery"; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 969 – 980, 2012. 10.1109/TAES.2012.6178042
- [33] F. Amjadipour, M. B. Fallahpour, H. Dehghani, "The Impact of Building Orientation and Visibility Geometry in SAR Images"; Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 12 pp. 319-334, 2021. 20.1001.1.26762935.1400.12.4.9.1.
- [34] M. B. Fallahpour, H. Dehghani, A. J. Rashidi, A. Sheikhi, "Extraction of Point Target Model of Distributed Targets Using SAR Images"; Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 8 pp. 265-274, 2017. 20.1001.1.26762935.1396.8.3.9.1
- [35] S. F. Tafty, M. Karimi, M. B. Fallahpour, "Improvement of the Accuracy and Reduction of the Computational Complexity of the Discrete Polynomial-Phase Transform Method for the Estimation of Chirp Signal Parameters"; Radar journal, vol. 5 (2) pp. 57-66, 2017. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1396.5.2.5.1>
- [36] N. S. Vaez, M. B. Fallahpour, H. Dehghani, "The Study of False Target Creation in Synthetic Aperture Radars"; Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 12 pp. 307-317, 2021.
- [14] N. Harris, R. Ringrose, K. Oddie, A. Pritchard, C. Anderson and T. Macklin, "The Effect of Radar and Environmental Parameters on Space-Based SAR Ocean Imaging"; IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS), pp. 916-918, 1998.
- [15] P. Singh and R. Shree, "Analysis and effects of speckle noise in SAR images"; 2nd IEEE International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA), pp. 1-5, 2016.
- [16] G. D. Martino, A. Iodice, D. Riccio and G. Ruello, "Equivalent Number of Scatterers for SAR Speckle Modeling"; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, pp. 2555-2564, 2014.
- [17] G. D. Martino, M. Poderico, G. Poggi, D. Riccio, and L. Verdoliva, "Benchmarking Framework for SAR Despeckling"; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, March, pp. 1596-1615, 2014. 10.1109/TGRS.2013.2252907
- [18] I. G. Cumming and F. H. Wong, "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data"; edition, Artech House, London, 2006.
- [19] M. Sumeckh, "Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms"; Wiley Interscience, New York, 1999.
- [20] W. L. Melvin and J. A. Scheer, "Principles of Modern Radar"; SciTech, 2013.
- [21] G. Wei, C. Songsong and H. Xiaoguang, "Design Scheme of Seeker Equivalent Device of Missile-Borne Synthetic Aperture Radar"; 10th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 254-258, 2012. 10.1109/INDIN.2012.6301376
- [22] H. Yang, Z. Cao, Y. Pi and S. Liu, "Target Detection in High-Resolution SAR Images via Searching for Part Models"; IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, pp. 664-668, 2017. 10.1109/LGRS.2017.2669945
- [23] Doerry, Armin Walter. Performance limits for Synthetic Aperture Radar. No. SAND2006-0821. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2006.
- [24] Doerry, Armin Walter. Anatomy of a SAR impulse response. No. SAND2007-5042. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2007.
- [25] Oliver, Chris, and Shaun Quegan. Understanding synthetic aperture radar images. SciTech Publishing, 2004.
- [26] P. P. Iraola, M. R. Cassola, F. D. Zan, P. L. Dekker, R. S., and A. Reigber, "Efficient Evaluation of Fourier-Based SAR Focusing Kernels"; IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014. 10.1109/LGRS.2013.2296371
- [27] S. Kim, J. Sung and A. Torre, "In-Orbit Antenna Pattern Extraction Method for Active Phased Array SAR Antennas"; Antenna and Wireless Propagation Letters, IEEE, pp.1-4, 2015. 10.1109/LAWP.2015.2443129
- [28] J. Song C. Xu, "A SAR motion compensation algorithm based on INS and GPS"; IET International Radar Conference (IET IRC), pp. 576-581. 2020. 10.1049/icp.2021.0815