
The Presentation of an Algorithm for Interference Detection in the Synthetic Aperture Radar

M. bayat^{*}, M. Moradi, j. Mazloun

^{*} Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology

(Received: 18/06/2021, Accepted: 04/12/2021)

Abstract

The synthetic aperture radar is an imaging radar that has a high resolution. The synthetic aperture radar image may be degraded by the interference of radio frequencies and an incomprehensible image may be created. Interferences in the synthetic aperture radars are divided into the three categories of , , and , which represent radio frequency noise interference, narrow band interference and wideband interference, respectively. To effectively reduce the interference in synthetic aperture radar images, first the presence of interference and its type should be asserted and then the interference reduction algorithms should be calculated according to interference type. In this paper an algorithm for the detection of interference and its type in the synthetic aperture radar images is presented. Whilst in the previous articles the SSD method is used for interference detection, in this paper we have used the Faster RCNN method based on neural network convolutional which has a higher speed and accuracy than the SSD method. In this method, first a neural network is trained with the ability of multiple classification. Then the Faster RCNN is constructed with the neural network and is trained by 25 time - frequency images from the artificial aperture radar signal. The trained network is able to detect any interference in the radar signal of a synthetic window with 99% accuracy. After detecting the interference by the proposed algorithm, the normalized least mean square filter is able to reduce the interference and improve the radar image. This filter operates similarly in decreasing all three types of interference.

Keywords: Radar, Radio Frequency Interference, Synthetic Aperture Radar, Convolutional Neural Network.

^{*} Corresponding author E-mail: meysam.bayat302@gmail.com

ارائه یک الگوریتم پیشنهادی به منظور تشخیص تداخل در رادار روزنه مصنوعی

میثم بیات^{۱*}، میلاد مرادی^۲، جلیل مظلوم^۳۱- استادیار، ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۳- دانشیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
(دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۳)

چکیده

رادار روزنه مصنوعی یک رادار تصویربرداری است که قدرت تفکیک بالایی دارد. ممکن است تصویر رادار روزنه مصنوعی بر اثر تداخل فرکانس‌های رادیویی تخریب شود و تصویری نامفهومی ایجاد شود. تداخل در رادار روزنه مصنوعی به سه دسته I_{WBLFMI} ، I_{NBLFMI} و I_{RFNI} تقسیم می‌شود. این تداخل‌ها به ترتیب بیانگر تداخل نویز فرکانس رادیویی، تداخل باند باریک و تداخل پهن باند هستند. برای کاهش مؤثرتر تداخل در تصاویر رادار روزنه مصنوعی ابتدا باید وجود تداخل و نوع آن مشخص شود. سپس با استفاده از الگوریتم‌های کاهش تداخل متناسب با نوع تداخل به کاهش تداخل پرداخته می‌شود. در این مقاله به ارائه الگوریتمی به منظور تشخیص تداخل و نوع آن در تصاویر رادار روزنه مصنوعی پرداخته می‌شود. در مقالات گذشته از روش SSD برای تشخیص تداخل استفاده شده است. در این مقاله برای تشخیص تداخل از روش Faster RCNN مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنی استفاده گردید که سرعت و دقت بالاتری نسبت به SSD دارد. در این روش ابتدا یک شبکه عصبی کانولوشنی با توانایی دسته‌بندی چندتایی آموزش داده می‌شود. سپس Faster RCNN با کمک شبکه عصبی ساخته شده و تعداد ۲۵ تصویر زمان-فرکانس از سیگنال رادار روزنه مصنوعی آموزش داده شد. شبکه آموزش دیده قادر است هر نوع تداخل در سیگنال رادار روزنه مصنوعی را با دقت ۹۹ درصد تشخیص دهد. سرانجام با استفاده از فیلتر تطبیقی حداقل میانگین مربعات نرمال شده کاهش تداخل انجام شد. بعد از شناسایی تداخل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده توانست تداخل را کاهش و تصویر رادار را بهبود دهد. این فیلتر در کاهش هر سه نوع تداخل به‌طور یکسان عمل نمود.

کلید واژه‌ها: رادار، تداخل فرکانس رادیویی، رادار روزنه مصنوعی، شبکه عصبی کانولوشنی.

۱- مقدمه

جهانی را فراهم کند که برای طیف وسیعی از کاربردهای علمی، تجاری و دفاعی مهم هستند. این رادار قادر به تولید تصاویر با دقت تفکیک بالا است. تفاوت اصلی بین رادارهای روزنه مصنوعی و روزنه واقعی در نحوه دستیابی به وضوح سمت است [۱، ۲]. جهت‌گیری عرضی که به‌عنوان جهت برد در تصویربرداری راداری هم شناخته می‌شود، بر جهت تصویربرداری عمود است [۱]. یکی از عوامل مخرب در کیفیت تصاویر رادار روزنه مصنوعی که بر قدرت تفکیک تصویر اثر می‌گذارد و باعث کاهش دقت تفکیک و از بین رفتن داده‌های تصاویر می‌شود تداخل است [۳]. سیگنال تداخلی که از سایر منابع تابش در همان باند فرکانس مشابه نظامی ساطع می‌شود، تداخل فرکانس رادیویی^۱ نامیده می‌شود [۳]. بیشتر منابع تداخل با فعالیت‌های انسانی در زمین ارتباط دارند. سامانه‌های رادار روزنه مصنوعی نسبت به تداخل فرکانس رادیویی آسیب‌پذیر هستند.

تصویربرداری رادارها باعث ایجاد تصاویر سطحی می‌شوند که در نگاه اول بسیار شبیه به تصاویر تولید شده توسط ابزارهای مرئی یا مادون قرمز است. در دوربین‌های تصویربرداری قدرت تفکیک تصویر بستگی به فاصله دوربین از صحنه دارد. وقتی دوربین از صحنه دور می‌شود، قدرت تفکیک پایین می‌آید و تنها اشیاء بزرگ‌تر را می‌توان در تصویر تشخیص داد. رادارهای تصویر بردار از اصول عملکرد کاملاً متفاوتی برای تولید تصاویر استفاده می‌کنند.

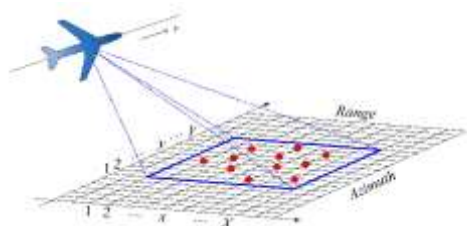
رادار روزنه مصنوعی یک ابزار سنسجش از راه دور فعال است [۱]. این رادار در باند مایکروویو کار می‌کند [۱، ۲]. رادار روزنه مصنوعی می‌تواند داده‌های ضروری برای درک تغییرات محیطی

* رایانامه نویسنده مسئول: m_bayat@ssau.ac.ir

^۱ Radio-Frequency Interference (RFI)

برخی ویژگی‌های آنها به کمک امواج رادیویی به کار می‌رود [۷، ۸]. رادارها به‌طور کلی به دو دسته روزنه واقعی و روزنه مصنوعی تقسیم می‌شوند. یک رادار روزنه واقعی به تفکیک پذیری ارائه شده توسط پرتو آنتن در جهت ردیابی مسیر برای تصویربرداری وابسته است [۸]. این بدان معنی است که قدرت تفکیک یک رادار روزنه واقعی در مسیر طولی، با اندازه آنتن و برد آن تعیین می‌شود. در فن‌آوری رادار روزنه مصنوعی قدرت تفکیک رادار مستقل از ابعاد آنتن است.

رادار روزنه مصنوعی برای امور نقشه برداری و تصویربرداری از سطح زمین با قدرت تفکیک مناسب به‌صورت مستقل از نور و شرایط آب و هوایی مختلف با استفاده از امواج الکترومغناطیس در باند مایکروویو به کار می‌رود. معمولاً این فن‌آوری در هواپیماهای شناسایی با اهداف نظامی و غیرنظامی کاربرد دارد [۸، ۹]. شکل (۱) نحوه عملکرد رادار روزنه مصنوعی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی توسط هواپیما [۵].

وقتی رادار در طول مسیر پرواز حرکت می‌کند، پالس‌هایی به سمت هدف ارسال و اکوهای بازتابی را دریافت می‌کند. رادار بعد از ثبت و پردازش اکوهای دریافتی قادر به ترکیب آنها شده و تصویر هدف را می‌سازد. هنگامی که داده‌های دریافتی پردازش می‌شوند، موقعیت رادار به‌طور مداوم در حال تغییر است. این تغییر فاصله باعث ایجاد روزنه مصنوعی می‌گردد [۸، ۹].

قدرت تفکیک سمت برای یک رادار روزنه مصنوعی برابر با نصف اندازه آنتن‌های فیزیکی است و مستقل از فاصله بین حسگر و سطح است. در واقع یک آنتن کوچک‌تر در رادار روزنه مصنوعی وضوح بهتری می‌دهد. در این رادار هرچه آنتن فیزیکی کوچک‌تر باشد، ردپای آن بزرگ‌تر است. یعنی یک آرایه طولانی‌تر می‌تواند سنتز شود. این آرایه مصنوعی طولانی‌تر اجازه می‌دهد تا پهنای باند داپلر بزرگ‌تر گردد و وضوح سطحی بهتری ارائه شود. به‌طور مشابه، اگر دامنه بین حسگر و سطح افزایش یابد، ردپا فیزیکی افزایش پیدا می‌کند و منجر به زمان مشاهده طولانی‌تر و پهنای باند بزرگ‌تر داپلر می‌شود که با افزایش در برد مقابله می‌کند [۹].

از نظر نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید، تداخل‌ها به‌طور کلی به دو گروه تقسیم می‌شوند: تداخل باند باریک^۱ که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید کوچک‌تر از ۱ درصد است. تداخل پهن باند که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید بیشتر از ۱۰ درصد است. مقابله با تداخل باند باریک در مقایسه با تداخل پهن باند بسیار ساده‌تر است [۳، ۴].

کاهش تداخل برای به‌دست آوردن تصویر با کیفیت امری ضروری است. برای کاهش اثر تداخل روش‌های مختلفی وجود دارد. در مقاله [۵] برای کاهش تداخل از روش فیلتر شکافی استفاده گردیده است. همچنین مقاله [۶] از الگوریتم تجزیه تکرارشونده استفاده کرده است. در مقاله [۷] نیز از فیلتر وقتی برای کاهش تداخل استفاده شده است. نوع تداخل در روش‌های گذشته به خوبی تشخیص داده نمی‌شد. در واقع در برخی از اکوهای بازگشتی تداخلی وجود ندارد که نیاز به حذف آن باشد. بنابراین، استفاده از یک روش برای تشخیص دقیق تداخل بسیار حائز اهمیت است.

برای کاهش اثر تداخل ابتدا باید وجود تداخل در سیگنال دریافت شده توسط آنتن رادار روزنه مصنوعی و نوع آن تشخیص داده شود. اگر تداخل و نوع آن تشخیص داده شود، روش‌های مؤثر متناسب با نوع تداخل برای کاهش آن به کار گرفته می‌شود تا کیفیت تصاویر بعد از کاهش تداخل بهتر شود. به همین منظور در این مقاله ابتدا سیگنال رادار روزنه مصنوعی و سیگنال‌های تداخل شبیه‌سازی شده و سپس شبکه Faster RCNN برای تشخیص تداخل آموزش داده شد. در پایان نیز کاهش تداخل به کمک فیلتر وقتی حداقل میانگین مربعات نرمال شده^۲ انجام گردیده است. در بخش دوم این مقاله ساختار رادار روزنه مصنوعی بیان شده است. در بخش سوم سیگنال‌های تداخل رادار روزنه مصنوعی و روابط آن آورده شده‌اند. در بخش چهارم شبکه عصبی کانولوشنی و نتایج شبیه‌سازی روش Faster RCNN برای تشخیص تداخل آورده شده است. در بخش پنجم فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده برای کاهش تداخل در نرم افزار متلب پیاده سازی شد. سرانجام در بخش ششم نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- رادار روزنه مصنوعی

رادار یک سامانه رادیویی است که برای مشاهده، تشخیص و تعیین موقعیت هدف یا آشکارسازی اجسام و نیز اندازه‌گیری

¹ Narrowband Interference (NBI)

² Normalized Least Mean Squares (NLMS)

باشد که رادار روزنه مصنوعی تحت تأثیر آن قرار گرفته است. در این مقاله تداخل باند باریک از مجموع تداخل فرکانس رادیویی با تعدیل سینوسی و تداخل باند باریک مدوله شده فرکانس خطی به دست آمده است. چنین روش مدل سازی باعث دقت در ایجاد تداخل می شود و اثر کاهش تداخل را بهبود می بخشد. سیگنال تداخل در این مقاله به عنوان مجموع سیگنال تداخل نویز فرکانس رادیویی، سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی باند باریک و سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی پهن باند مدل شده است [۱۱، ۱۲].

تداخل نویز فرکانس رادیویی را می توان به صورت زیر مدل کرد [۱۱، ۱۲]:

$$I_{REFI}(\tau) = \sum_{i=1}^{L_R} A_R(\tau) \text{rect}(\tau/T_R) \exp\{j[2\pi f_R \tau + \phi_R]\} \quad (1)$$

که $I_{REFI}(\tau)$ سیگنال تداخل نویز فرکانس رادیویی $A_R(\tau)$ دامنه، T_R پهنای پالس، ϕ_R فاز، f_R نشان دهنده فرکانس سیگنال L_R مقادیر سیگنال تداخل را نشان می دهند. رابطه سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی باند باریک به صورت زیر است [۱۲]:

$$I_{NBLEMI}(\tau) = \sum_{n=1}^{L_N} A_n(\tau) \text{rect}(\tau/T_n) \exp\{j[\pi k_n \tau^2 + \phi_n]\} \quad (2)$$

که $I_{NBLEMI}(\tau)$ سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی باند باریک، $A_n(\tau)$ دامنه سیگنال، T_n پهنای پالس، ϕ_n فاز L_N مقادیر سیگنال تداخل و K_N نرخ chirp سیگنال تداخل را نشان می دهند. سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی پهن باند به صورت زیر است [۱۱، ۱۲]:

$$I_{WBLEMI}(\tau) = \sum_{w=1}^{L_W} A_w(\tau) \text{rect}(\tau/T_w) \exp\{j[\pi k_w \tau^2 + \phi_w]\} \quad (3)$$

که $I_{WBLEMI}(\tau)$ سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی پهن باند، $A_w(\tau)$ دامنه سیگنال تداخل، T_w پهنای پالس، ϕ_w فاز، L_W مقادیر سیگنال تداخل و K_W نرخ chirp سیگنال تداخل را نشان می دهند. با در نظر گرفتن شیفت زمانی رابطه کلی تداخل به صورت زیر به دست می آید [۱۱، ۱۲]:

$$\begin{aligned} I_{REFI}(\tau) &= A_R(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_R)/T_R) \exp\{j[2\pi f_R(\tau - \tau_R) + \phi_R]\} \\ I_{NBLEMI}(\tau) &= A_N(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_N)/T_N) \exp\{j[\pi K_N(\tau - \tau_N)^2 + \phi_N]\} \\ I_{WBLEMI}(\tau) &= A_W(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_W)/T_W) \exp\{j[\pi K_W(\tau - \tau_W)^2 + \phi_W]\} \end{aligned} \quad (4)$$

که $A_i(\tau)$ دامنه، ϕ_i فاز، τ_i شیفت زمان و T_i و پهنای پالس سیگنال مربوطه را نشان می دهند. در این عبارت، همه مؤلفهها از توزیع یکنواخت پیروی می کنند، به جز $A_R(\tau)$ که از توزیع ریلی پیروی می کند [۸].

۳- سیگنال دریافتی رادار روزنه مصنوعی

در سامانه رادار روزنه مصنوعی، اکو دریافتی به صورت زیر مدل می شود [۹]:

$$S(\tau) = R(\tau) + I(\tau) + N(\tau) \quad (11)$$

که τ زمان، $R(\tau)$ سیگنال اصلی، $I(\tau)$ سیگنال تداخل و $N(\tau)$ نویز است. نویز سامانه با نویز گاوسی تقریب زده شده است [۹].

برای به دست آوردن اطلاعات در مورد سیگنال تداخل از اکوی دریافتی، بسیاری از داده ها برای آموزش شبکه یادگیری عمیق مورد نیاز هستند. براساس مدل و خصوصیات آماری سیگنال اکوی دریافتی، داده های مورد نیاز از طریق شبیه سازی تولید می شوند. برای شبیه سازی سیگنال تداخل باید تعداد زیادی از سیگنال های تداخل با مؤلفه های مختلف ایجاد شود. سپس چند نمونه از تداخل های شبیه سازی شده به عنوان مجموع سیگنال های تداخل به صورت تصادفی انتخاب شده و روی سیگنال اصلی اعمال می گردد. توجه به این نکته ضروری است که در برخی دیگر از مقالات از روش کدگذاری فاز به منظور حذف یا کاهش اثر تداخل استفاده شده است [۱۰].

۳-۱- تداخل فرکانس رادیویی در رادار روزنه مصنوعی

تصاویر رادار روزنه مصنوعی با دقت تفکیک بالا با تداخل هایی که فرکانس آنها در طیف فرکانس سیگنال های مفید قرار دارد، خراب می شوند. تداخل فرکانس رادیویی کم انرژی در الگوریتم تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی می تواند تا حدودی کاهش یابد، در حالیکه تداخل فرکانس رادیویی قوی در تصاویر رادار روزنه مصنوعی متمرکز باقی خواهد ماند؛ بنابراین، ایجاد یک روش شناسایی و روشی برای کاهش اثرات تداخل فرکانس رادیویی بر تصویربرداری رادار روزنه مصنوعی ضروری است [۷]. از نظر نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید، تداخل ها به طور کلی به دو گروه تقسیم می شوند: تداخل باند باریک که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید کوچک تر از ۱ درصد است. تداخل پهن باند که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید بیشتر از ۱۰ درصد است [۳، ۴].

با توجه به اینکه تداخل پهن باند عموماً از سایر سامانه های راداری حاصل می شود، می توان آن را با سیگنال مدولاسیون فرکانس خطی مدل سازی کرد. اما اگر تداخل باند باریک فقط به یک صورت مدل سازی شود نمی تواند شامل تداخل های متعددی

منطقه تصویربرداری شده توسط رادار به صورت کلی در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۲): تصویربرداری از یک منطقه به شعاع ۵ کیلومتر توسط رادار روزنه مصنوعی [۱۱].

از میان داده‌ها، داده f_{carB1} که متعلق به خودرو میتسوبیشی گالانت است به عنوان تصویر اصلی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مشخصات این خودرو در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): مشخصات خودرو [۱۱].

مؤلفه	مقدار
نام خودرو	میتسوبیشی گالانت
برچسب	f_{carB1}
طول	۴/۸۵ متر
عرض	۱/۸۴ متر
ارتفاع	۱/۴۷ متر
مختصات اقلیدوسی	-۴۶/۱۵۴، ۱۶/۵۳، ۰/۵۶

در شکل (۳) قسمت الف تصویر اصلی رادار روزنه مصنوعی با دقت تفکیک ۳۲۴×۳۲۴ مربوط به خودرو آورده شده است. همچنین در شکل (۳) قسمت ب) تصویر تخریب شده آن با استفاده از هر سه نوع تداخل تصادفی اضافه شده، شبیه‌سازی شده است.

برای به دست آوردن پالس‌های اکو حاوی سیگنال‌های تداخل، سیگنال اصلی و تداخل روی هم قرار می‌گیرند. در این مقاله برای مدل کردن تداخل از محدوده‌های مجاز تعیین شده در جدول (۱) برای هر یک از تداخل‌ها استفاده شده است.

جدول (۱): مؤلفه‌های سیگنال تداخل [۱۸].

نوع تداخل	مؤلفه‌ها	مقدار
RFNI	رنج فرکانس (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۰-۵۰
	رنج پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	رنج دامنه (dB)	(توزیع رایلی) ۳۰-۴۰
NBLFMI	رنج پهنای باند (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۰.۰۱-۰.۵
	رنج پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	رنج دامنه (dB)	(توزیع یکنواخت) ۳۰-۴۰
WBLFMI	رنج پهنای باند (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۵-۱۰
	رنج پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	رنج دامنه (dB)	(توزیع یکنواخت) ۳۰-۴۰

۲-۳- تشکیل تصویر رادار روزنه مصنوعی و تصویر تداخلی

طبق مقاله ارائه شده توسط جوشا و همکارانش در سال ۲۰۱۲ یک سامانه رادار روزنه مصنوعی دایره‌ای هوابرد محیطی به قطر ۵ کیلومتر را تصویربرداری نموده است. از آنجا که انتشار کامل داده‌ها به دلیل حجم آن امکان‌پذیر نبود، بنابراین داده‌های مربوط به ۵۶ هدف شامل ۳۳ خودروی غیر نظامی، ۲۲ بازتابنده نقطه‌ای و یک منطقه باز منتشر گردید. در جدول (۲) مشخصات رادار تصویر بردار آورده شده است [۱۱].

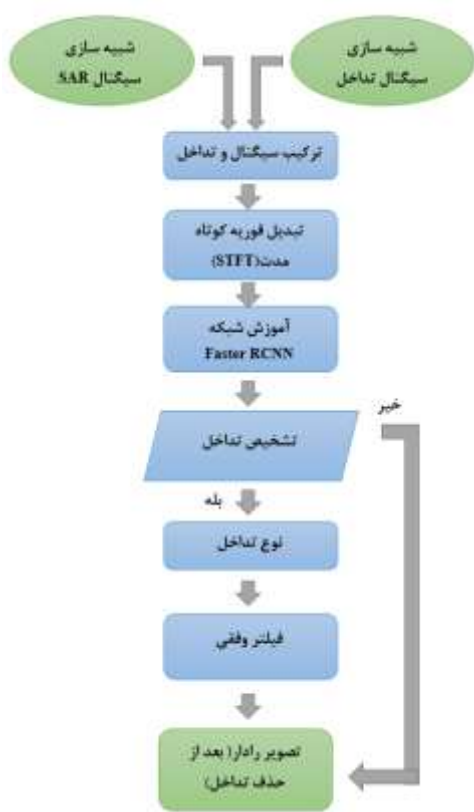
جدول (۲): مشخصات رادار تصویر بردار [۱۱].

مؤلفه	مقدار یا نوع
نوع سکو رادار	هواپیما
قطر منطقه تصویربرداری	۵ کیلومتر
حالت تصویربرداری	circular
تعداد مدار	۳۱
فرکانس مرکزی	۹/۷GHz
زاویه در نظر گرفته شده برای هر هدف	۳۶۰ درجه

۴- ساختار کلی تشخیص و کاهش تداخل

در این مقاله ابتدا سیگنال‌های رادار روزنه مصنوعی و سیگنال‌های تداخل در نرم افزار متلب شبیه‌سازی شدند. سپس برای آموزش شبکه عصبی سیگنال به حوزه زمان-فرکانس برده شد و شبکه عصبی جهت تشخیص تداخل آموزش داده شد. در صورت وجود تداخل از یک فیلتر وقتی جهت کاهش آن استفاده گردید.

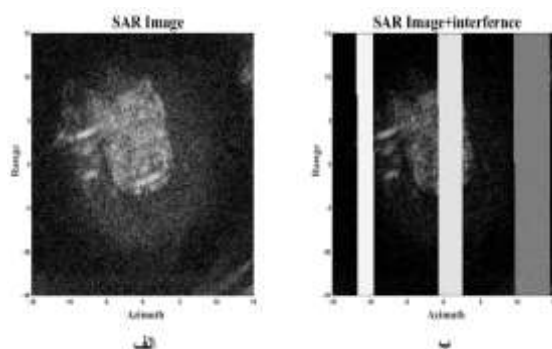
در این مقاله مراحل تشخیص و کاهش تداخل در رادار روزنه مصنوعی طبق نمودار بلوکی شکل (۶) انجام شده است.



شکل (۶): نمودار بلوکی کلی تشخیص و کاهش تداخل

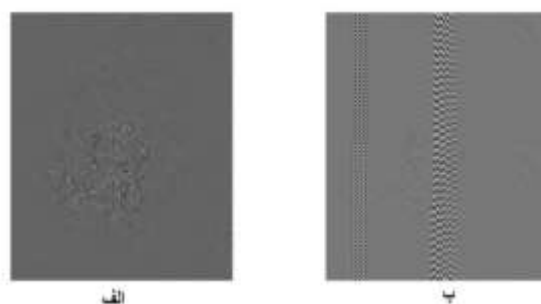
۴-۱- شبکه عصبی کانولوشنی

یکی از جنبه‌های هوش مصنوعی بینایی ماشین است. پیشرفت‌های حاصل شده در بینایی کامپیوتری با ظهور یادگیری عمیق در طول زمان ایجاد و کامل شده است. یادگیری عمیق در درجه اول بر مبنای الگوریتم خاصی به نام شبکه عصبی پیچشی یا شبکه عصبی کانولوشنی^۱ بوده است [۱۲]. در این مقاله برای تشخیص تداخل از شبکه عصبی استفاده شده است.



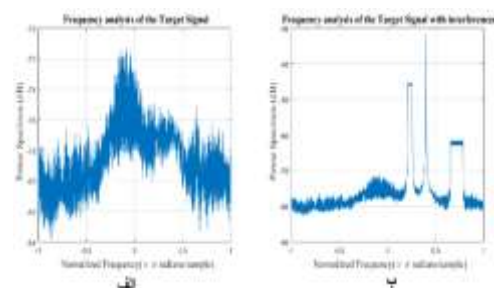
شکل (۳): (الف) تصویر رادار روزنه مصنوعی [۱۱] و (ب) تصویر رادار روزنه مصنوعی + تداخل‌ها

در حالت کلی داده‌های یک تصویر رادار روزنه مصنوعی مختلط است. برای واضح بودن تأثیرات تداخل روی تصویر معمولاً نمایش قسمت حقیقی کمک خوبی می‌کند. در این مقاله برای بهبود عملکرد تشخیص و کاهش تداخل، از تصویر حقیقی رادار روزنه مصنوعی نیز استفاده شده است. شکل (۴) تصویر مربوط به قسمت حقیقی داده‌های شکل (۳) را نشان می‌دهد.



شکل (۴): (الف) تصویر حقیقی رادار روزنه مصنوعی و (ب) تصویر حقیقی رادار روزنه مصنوعی + تداخل‌ها

تداخل در نمودار دامنه - زمان سیگنال رادار روزنه مصنوعی قابل مشاهده نیست. به همین دلیل برای مشاهده تداخل در سیگنال رادار روزنه مصنوعی از طیف فرکانسی استفاده می‌شود. در شکل (۵) طیف فرکانسی سیگنال رادار روزنه مصنوعی با تداخل و بدون تداخل قابل مشاهده است.



شکل (۵): (الف) طیف فرکانسی سیگنال اصلی رادار روزنه مصنوعی و (ب) طیف فرکانسی سیگنال با تداخل رادار روزنه مصنوعی

^۱ Convolutional Neural Network

این معماری‌ها نقش کلیدی در ساخت الگوریتم‌ها دارند [۱۵]. البته می‌توان با داشتن یک مجموعه تصاویر و ایجاد لایه‌های دلخواه یک شبکه عصبی کانولوشنی جدید ساخت.

۴-۲- تشخیص اشیاء

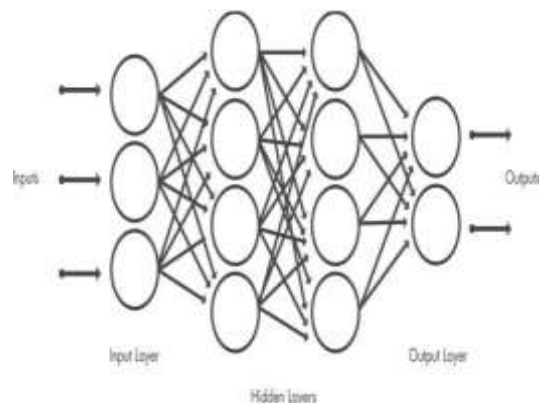
تشخیص اشیاء^۳ یک تکنیک بینایی رایانه‌ای برای پیدا کردن مواردی از اشیاء در تصاویر و یا ویدئو است. الگوریتم‌های تشخیص شیء معمولاً از یادگیری ماشین یا یادگیری عمیق برای تولید نتایج معنی‌دار استفاده می‌کنند [۱۵، ۱۶].

تکنیک‌های یادگیری عمیق به تعداد زیادی تصویر آموزشی دارای برچسب نیاز دارند، استفاده از واحد پردازش گرافیک^۴ برای کاهش زمان مورد نیاز برای آموزش مفید است. تشخیص اشیاء توسط روش‌هایی همچون^۵ RCNN، YOLO^۶ و SSD^۷ قابل پیاده‌سازی است [۱۶]. برای شناساندن اشیاء به شبکه عصبی باید تعدادی تصویر به شبکه معرفی و شیء مورد نظر در آن تصاویر برچسب زده شوند، این کار را آموزش شبکه عصبی می‌نامند. باید توجه داشت هرچه تعداد تصاویری که به شبکه آموزش داده می‌شود بیشتر باشد دقت شبکه بالاتر خواهد بود. از طرفی باید سعی شود که تصاویر مختلف از زوایا مختلف برای آموزش انتخاب شود، برای مثال اگر بخواهیم به شبکه عصبی تصویر خودرو آموزش داده شود باید تعدادی تصویر از خودروهای مختلف از فواصل دور و نزدیک و در رنگ‌های مختلف تهیه گردد تا تمام حالات تصویر یک خودرو به شبکه آموزش داده شود. با این کار دامنه آموزش شبکه بالا رفته و در نتیجه دقت آن نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

برچسب‌ها شامل ۴ عدد می‌باشند که این اعداد به ترتیب نشانگر نقطه شروع برچسب، طول افقی برچسب، طول عمودی و نقطه انتها برچسب می‌باشند. اگر بخواهیم به صورت کامل تر بگوییم یک فایل برچسب حداقل شامل دو ستون می‌باشد. ستون اول آدرس تصاویر و ستون دوم مختصات برچسب برای هر تصویر است.

اگر بخواهیم مختصات برچسب را به صورت دستی بیابیم کار زمان‌بری خواهد بود و دقت آن ممکن است پایین بیاید. برنامه Image Labeler در نرم افزار متلب راهی آسان برای علامت گذاری به عنوان برچسب‌های منطقه مورد علاقه فراهم می‌کند.

یک شبکه عصبی کانولوشن می‌تواند ده‌ها یا صدها لایه داشته باشد که هر کدام یاد بگیرند که ویژگی‌های مختلف یک تصویر را تشخیص دهند. مانند سایر شبکه‌های عصبی، شبکه عصبی کانولوشنی از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و بسیاری از لایه‌های پنهان در این بین تشکیل شده است.



شکل (۷): ساختار لایه لایه شبکه عصبی [۱۲].

این لایه‌ها عملیاتی را انجام می‌دهند که داده‌ها را با هدف یادگیری ویژگی‌های خاص تغییر دهند. لایه کانولوشن، لایه واحد خطی اصلاح شده^۱ و لایه تجمع^۲ سه لایه متداول هستند. کانولوشن تصاویر ورودی را از طریق مجموعه‌ای از فیلترهای کانولوشن قرار می‌دهد که هر کدام ویژگی‌های خاصی از تصاویر را فعال می‌کنند [۱۳]. واحد خطی اصلاح شده امکان آموزش سریعتر و مؤثرتر را با نگاشت مقادیر منفی به صفر و حفظ مقادیر مثبت فراهم می‌کند. این کار گاهی اوقات به عنوان فعال‌سازی شناخته می‌شود، زیرا فقط ویژگی‌های فعال شده به لایه بعدی منتقل می‌شوند [۱۳]. لایه تجمع با انجام نمونه‌گیری غیرخطی و کاهش تعداد مؤلفه‌هایی که شبکه برای یادگیری نیاز دارد، خروجی را ساده می‌کند [۱۳]. این عملیات در ده‌ها یا صدها لایه تکرار می‌شود و هر لایه یاد می‌گیرد ویژگی‌های مختلف را شناسایی کند. بعد از یادگیری ویژگی‌ها در بسیاری از لایه‌ها، معماری شبکه عصبی کانولوشنی به طبقه‌بندی می‌پردازد. یکی دیگر از لایه‌ها، لایه کاملاً متصل است که یک بردار از K را می‌دهد که در آن K تعداد کلاس‌هایی است که شبکه قادر به پیش‌بینی آن خواهد بود. این بردار شامل احتمالات برای هر کلاس از هر تصویر طبقه‌بندی می‌شود [۱۳، ۱۴].

معماری‌های گوناگونی از شبکه عصبی پیچشی مانند AlexNet، VGGNet، GoogLeNet و ResNet وجود دارد.

^۳ Object Detections

^۴ Object Detections (GPU)

^۵ Region Convolutional Neural Network

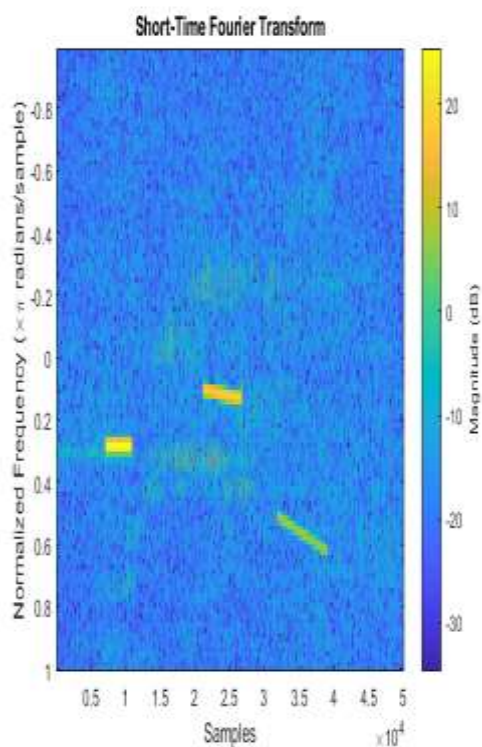
^۶ You Only Look Once

^۷ Single Shot Detector

^۱ Rectified Linear Unit

^۲ Pooling layer

اگر در سیگنال تصویر، تداخل ایجاد شود باندهای کوچک زرد رنگی در تصویر زمان-فرکانس مشاهده می‌شود که نشانگر تداخل هستند. برای اجرای الگوریتم تشخیص تداخل، سیگنال‌های مختلفی از رادار روزنه مصنوعی با تداخل‌هایی با مؤلفه‌های متفاوت تولید گردید. در تمام تصاویر تداخل‌ها برچسب زده شدند. برای نمونه در تصویر شکل (۹) هر سه نوع تداخل بر روی سیگنال اصلی رادار روزنه مصنوعی اعمال شده‌است. تداخل‌ها به ترتیب از سمت چپ تداخل نوع اول، نوع دوم و نوع سوم هستند. همچنین تداخل فرکانس رادیویی معمولاً یک باند طلایی افقی است. تداخل باند باریک یک باند زرد مایل است. تداخل پهن باند نیز یک باند سبز مایل است که شیب آن نسبت به تداخل باند باریک بیشتر است. علاوه بر مطالب بیان شده باید توجه داشت که ممکن است در سیگنال رادار روزنه مصنوعی به جای چند نوع تداخل مختلف چند مرتبه تداخل یک نوع ایجاد شود. برای مثال، می‌توان گفت چهار مرتبه تداخل نوع اول در سیگنال رادار روزنه مصنوعی ایجاد شده‌است.



شکل (۹): تحلیل زمان-فرکانس سیگنال با تداخل رادار روزنه مصنوعی.

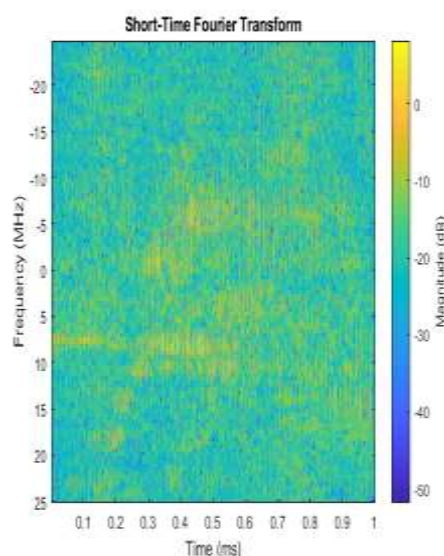
در این مقاله ۲۵ تصویر از نمای زمان-فرکانس سیگنال رادار روزنه مصنوعی با نسبت سیگنال به تداخل^۲ مختلف تولید و ذخیره گردید. این تصاویر به عنوان تصاویر آموزش شبکه مورد

می‌توان برچسب‌های مستطیلی، چندخطی، پیکسلی و چند ضلعی و برچسب‌های صحنه را در یک عکس یا دنباله تصویر ایجاد کنید [۱۷، ۱۸].

۴-۲-۱. الگوریتم تشخیص تداخل در رادار روزنه مصنوعی

سیگنال رادار روزنه مصنوعی در حوزه فرکانس به صورت شکل (۸) به دست می‌آید. این روش نمایش تداخل و سیگنال در رادار روزنه مصنوعی یک روش با دقت پایین و به صورت چشمی است. در این مقاله برای تشخیص تداخل به صورت نرم افزاری و دقت بالا از تشخیص اشیاء استفاده شده‌است. اگر تداخل تشخیص داده نشود یعنی تصویر سالم و قابل بهره برداری می‌باشد. البته این فرض با پذیرش خطای ناشی از عدم تشخیص صحیح تداخل توسط شبکه عصبی است. چون شبکه عصبی دارای دقت بالایی در تشخیص تداخل است می‌توان این فرض را به عنوان یک فرض منطقی پذیرفت. اما اگر تصویر توسط تداخل تخریب شده باشد نوع تداخل توسط شبکه عصبی مشخص می‌شود و برای کاهش اثر تداخل از فیلترهای وقتی استفاده می‌گردد.

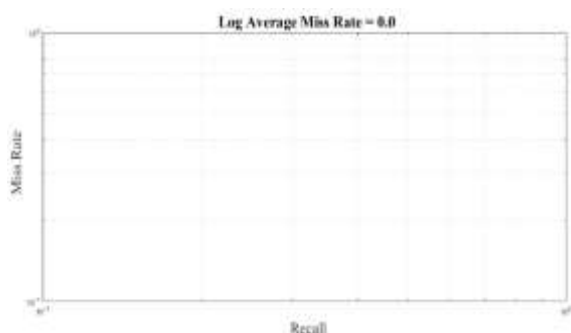
برای تهیه تصاویر جهت آموزش به شبکه عصبی ابتدا باید سیگنال تصویر رادار روزنه مصنوعی با الگوریتم تبدیل فوریه کوتاه مدت^۱ به حوزه زمان-فرکانس برده شود. در شکل (۸) تحلیل زمان-فرکانس سیگنال رادار روزنه مصنوعی رسم شده‌است. معمولاً تداخل در تحلیل زمان-فرکانس به صورت باندهای زرد رنگ قابل مشاهده است. در شکل (۸) چون تداخل در سیگنال وجود ندارد پس باندهای زرد رنگ در تصویر دیده نمی‌شود.



شکل (۸): تحلیل زمان-فرکانس سیگنال اصلی رادار روزنه مصنوعی.

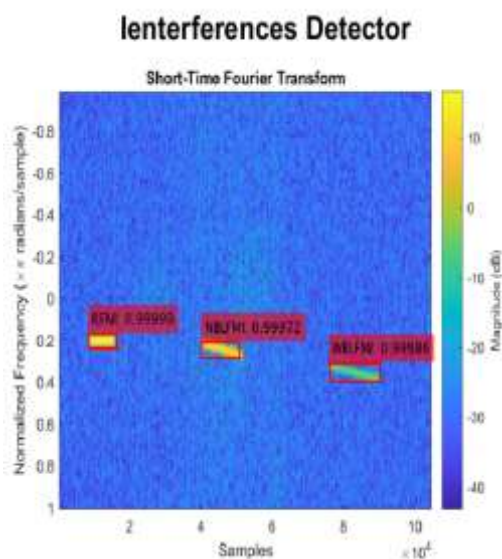
^۲ Signal-to-Interference Rate

^۱ Short-time Fourier transform



شکل (۱۲): نمودار خطا شبکه آموزش داده شده برای تشخیص تداخل.

شبکه آموزش داده شده برای تشخیص تداخل دارای دقت ۱۰۰ درصد و خطای صفر است. این دقت مربوط به تصاویر آموزش داده به شبکه است. برای آزمایش شبکه یک تصویر تداخلی جدید به شبکه داده می‌شود تا تداخل موجود در آن توسط شبکه شناسایی گردد. در تصویر شکل (۱۳) سه نوع تداخلی که به Faster RCNN آموزش داده شده مورد آزمایش قرار گرفته است که شبکه عصبی هر سه تداخل را با دقت بسیار بالایی شناسایی کرده است.

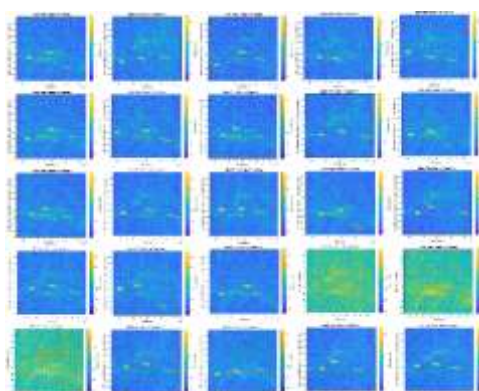


شکل (۱۳): تشخیص تداخلها با Faster RCNN

۵- کاهش تداخل به کمک فیلتر تطبیقی

فیلتر تطبیقی^۱ سامانه‌ای است که مؤلفه‌های خود را به نحوی تغییر دهد که توانایی پاسخ به تغییرات محیط اطراف خود را با توجه به اهداف خاصی داشته باشد. امروزه فیلترهای وقتی یا فیلترهای تطبیقی به دلیل پردازنده‌های سیگنال دیجیتال قوی و پیشرفت‌های الگوریتم‌های وقتی جدید، در حوزه‌های علوم

استفاده قرار گرفت. این تصاویر در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است.



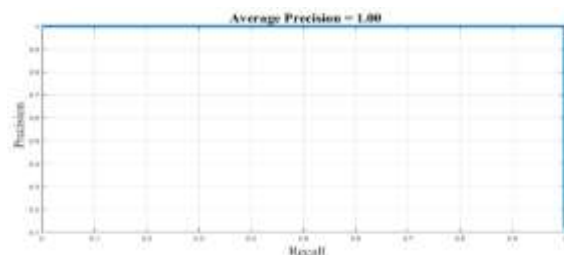
شکل (۱۰): تصاویر استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی.

برای آموزش شبکه Faster RCNN از تنظیمات جدول (۴) استفاده گردید و بقیه تنظیمات به صورت پیش فرض نرم افزار متلب انتخاب شد.

جدول (۴): تنظیمات آموزش Faster RCNN

نام تنظیمات	مقدار
Mini Batch Size	۱
Max Epochs	۲۰
Initial Learn Rate	۰/۰۰۱
Validation Frequency	۵۰
Verbose	True

نمودار دقت شبکه آموزش دیده و میانگین خطا آن به ترتیب در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) آورده شده‌است. هرچه نمودار دقت بالاتر و سمت راست‌تر باشد یعنی دقت شبکه آموزش دیده بالاتر است و هرچه نمودار خطا پایین‌تر و سمت چپ‌تر باشد یعنی خطا شبکه کمتر است.



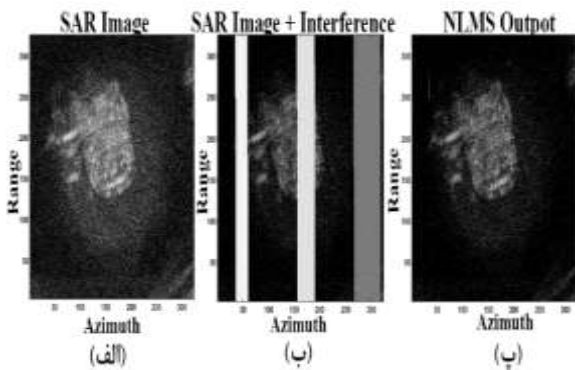
شکل (۱۱): نمودار دقت شبکه آموزش داده شده برای تشخیص تداخل.

¹ Adaptive Filter

جدول (۵): مؤلفه‌های فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده

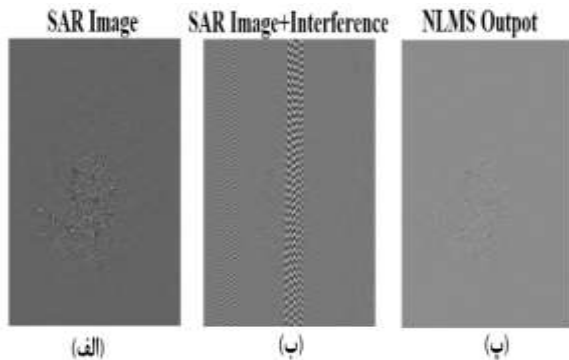
مقدار	مؤلفه
۸	Length
۰/۱	Step Size (μ)
۰	Initial Conditions

مقدار نسبت سیگنال به تداخل تصویر ورودی فیلتر برابر ۱۹/۳۷۱۳- در نظر گرفته شد. در شکل (۱۴) تصویر اصلی رادار روزنه مصنوعی، تصویر با وجود سه نوع تداخل و تصویر بعد از کاهش تداخل با کمک فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده قابل مشاهده است.



شکل (۱۴): الف) تصویر اصلی، ب) تصویر با تداخلها و پ) تصویر خروجی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده

همان طور که قبلاً در بخش ۲-۳ گفته شد رسم تصویر حقیقی سیگنال برای بهتر دیده شدن تداخلها و تأثیر فیلتر برای کاهش تداخل لازم است [۲۱، ۲۲].



شکل (۱۵): الف) تصویر حقیقی اصلی، ب) تصویر حقیقی با تداخلها و پ) تصویر حقیقی خروجی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده. برای دیدن تأثیر فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده طیف فرکانسی سیگنال اصلی، سیگنال با تداخل و سیگنال بعد از

مختلف مانند مخابرات، رادار، پردازش سیگنال‌های صوتی و رادیویی و حذف نویز به کار گرفته می‌شوند [۱۹، ۲۰].

۵-۱- فیلتر حداقل میانگین مربعات استاندارد

در الگوریتم حداقل میانگین مربعات استاندارد^۱، تنظیمات اعمال شده به بردار ضرایب در مرحله $n+1$ از حاصل سه ترم به دست می‌آید. مؤلفه μ تحت کنترل طراح است. بردار ورودی فیلتر $x(n)$ توسط منابع اطلاعات تعیین می‌شود. خطای تخمین $e(n)$ در مرحله n ام اندازه گیری می‌شود.

هنگامی که $x(n)$ بزرگ است، فیلتر حداقل میانگین مربعات می‌تواند دچار مشکل تقویت نویز گرادیان شود. برای حل این مشکل از فیلتر نرمالیزه شده حداقل میانگین مربعات استفاده می‌شود که در آن اصلاحات انجام شده بر روی بردار ضرایب وزن در مرحله $(n+1)$ ام متناسب با نرم بردار $x(n)$ در مرحله (n) ام نرمالیزه می‌شود [۱۹].

$$e^+(n) = (1 - \mu(n) x^T(n)x(n))e(n) \quad (4)$$

برای کمینه شدن (صفر شدن سمت چپ رابطه (۶)) باید:

$$\mu(n) = \frac{1}{x^T(n)x(n)} \quad (5)$$

$$w(n+1) = w(n) + \frac{1}{x^T(n)x(n)} e(n) x(n) \quad (6)$$

در عمل، به جای رابطه (۸) از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۱۹].

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\tilde{\mu}}{x^T(n)x(n) + \psi} e(n) x(n) \quad (7)$$

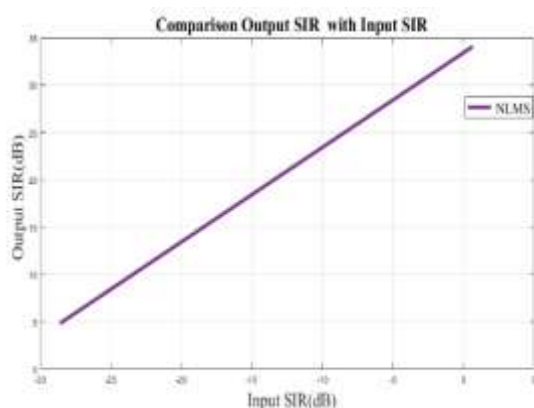
ψ به این منظور استفاده می‌شود که در مواقعی که $x^T(n)x(n)$ عدد کوچکی است، مخرج کسر خیلی کوچک نشود. $\tilde{\mu}$ اندازه گام فیلتر است که به وسیله آن می‌توان سرعت همگرایی کنترل نمود.

۵-۲- شبیه سازی فیلتر حداقل میانگین مربعات

نرمال شده جهت کاهش تداخل

فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده با مشخصات جدول (۵) در نرم افزار متلب پیاده سازی شد:

¹ Least mean squares (LMS)



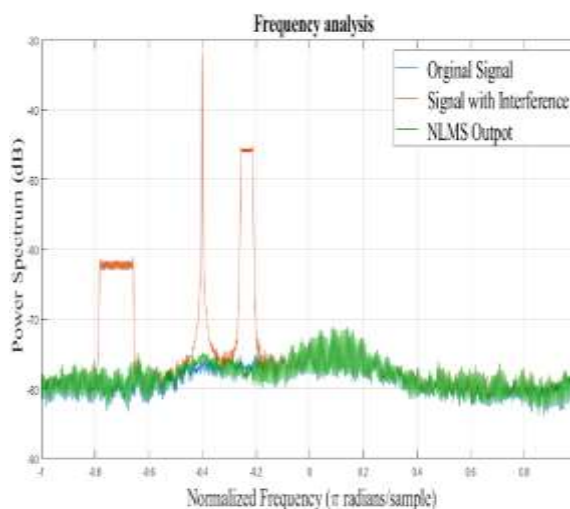
شکل (۱۸): نمودار نسبت سیگنال به تداخل خروجی و نسبت سیگنال به تداخل ورودی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده

نمودار رسم شده بیانگر این است که فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده در تمام نسبت‌های سیگنال به تداخل رفتار یکسانی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

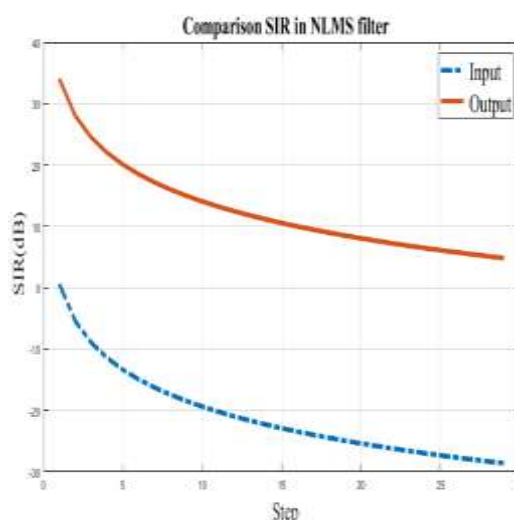
در این مقاله انواع تداخل شبیه‌سازی شد. بعد از شبیه‌سازی، سیگنال تداخل روی سیگنال رادار روزنه مصنوعی اعمال شد. هنگامی که سیگنال رادار روزنه مصنوعی دچار تداخل می‌شود تصویر به دست آمده قابل بهره برداری نیست. برای کاهش اثر تداخل روی تصاویر رادار روزنه مصنوعی ابتدا باید وجود و نوع تداخل در سیگنال رادار روزنه مصنوعی مشخص شود. در این مقاله برای تشخیص وجود تداخل به صورت دقیق از روش Faster RCNN مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشنی استفاده گردید. برای این منظور تعداد ۲۵ عدد تصویر زمان-فرکانس از سیگنال رادار روزنه مصنوعی حاوی تداخل به عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شد. دقت دیتای آموزش داده شده در شبکه عصبی جهت تشخیص تداخل ۱۰۰٪ است که امری کاملاً منطقی و طبیعی است. دقت شبکه آموزش داده شده برای ارزیابی برابر ۹۹٪ به دست آمد. براساس نتایج شبیه‌سازی، هر سیگنال اکوی دریافتی توسط آنتن رادار روزنه مصنوعی به شبکه عصبی داده شد، در صورت وجود تداخل، نوع آن توسط شبکه عصبی مشخص گردید. در واقع استفاده از روش پیشنهادی قدرت تفکیک سه نوع تداخل را از یکدیگر بالا می‌برد و در نتیجه هنگام حذف تداخل نتیجه بهتری حاصل می‌گردد. مزیت بزرگ روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌هایی که برای شناسایی و حذف تداخل به کار می‌رود در این است که با شناخت دقیق نوع تداخل روش مناسب با آن نوع تداخل، جهت حذف تداخل به کار می‌رود. در نهایت پس از تشخیص تداخل و نوع آن، به کمک فیلتر تطبیقی

کاهش تداخل در شکل (۱۶) رسم شده است. خروجی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده با رنگ سبز رسم شده که به دلیل کاهش تداخل بسیار شبیه سیگنال اصلی با رنگ آبی شده است.



شکل (۱۶): طیف فرکانسی سیگنال اصلی، سیگنال با تداخل‌ها و خروجی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده

نسبت سیگنال به تداخل خروجی فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده ۱۴/۰۷۹۶ است. همان‌طور که مشاهده شد فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده تصویر را بهبود داد. برای مشاهده تأثیر این فیلتر بر تداخل‌ها با نسبت‌های مختلف، نمودار شکل (۱۷) رسم شده است.



شکل (۱۷): نمودار مقایسه نسبت سیگنال به تداخل در فیلتر حداقل میانگین مربعات نرمال شده

در شکل (۱۸) برای مشاهده نتیجه فیلتر تطبیقی جهت کاهش تداخل، نمودار نسبت سیگنال به تداخل خروجی و نسبت سیگنال به تداخل ورودی فیلتر آورده شده است.

- S. Suzuki, "An Autocorrelation-Based Radio Frequency Interference Detection and Removal Method in Azimuth-Frequency Domain for SAR Image," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 10, pp. 5736–5751, 2017.
- [12] Y. L. Li, X. Y. Li, and Z. M. Zhou, "Side-Lobe Reduction for Radio Frequency Interference Suppression via Clipping of Strong Scatterers," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 13, pp. 1178–1182, 2016.
- [13] K. E. Dungan, J. N. Ash, J. W. Nehrbass, J. T. Parker, L. A. Gorham, and S. M. Scarborough, "Wide Angle SAR Data for Target Discrimination Research," *Proc. SPIE*, vol. 21, pp. 83-94, 2012.
- [14] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-time Object Detection," In *Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, USA, pp. 779–788, 2016.
- [15] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, "Going Deeper With Convolutions," In *Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, USA, PP. 1-9, 2015.
- [16] S. Chen, H. Wang, F. Xu, and Y.Q. Jin, "Target Classification Using the Deep Convolutional Networks for SAR Images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, PP. 4806–4817, vol. 54, 2016.
- [17] J. Matuszewski, "Radar Signal Identification Using a Neural Network and Pattern Recognition Methods," In *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, ; pp. 79–83, 2018.
- [18] J. Jiao, Y. Zhang, H. Sun, X. Yang, X. GAO, and W. Hong, "A Densely Connected End-to-End Neural Network for Multiscale and Multiscene SAR Ship Detection," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 20881–20892, 2018.
- [19] M. Bayat and M. H. Madani, "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Remove the CWI in Loran Navigation System Receivers," *J. Advanced Defence Sci. and Tech.*, vol. 5, pp. 50-62, 2018.
- [20] M. Bayat and J. Mazloum, "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Eliminate the Effect of Single-frequency Jammer in Warplane Data Link," *J. Aeronautical Eng.*, vol. 18, pp.51-59, 2016.
- [21] J. Kim, J. Y. Sung, and S. H. Park, "Comparison of Faster-RCNN, YOLO, and SSD for Real-Time Vehicle Type Recognition," *IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia)*, pp. 1-4, 2020.
- [22] M. Tao, J. Su, and Y. Huang "Mitigation of Radio Frequency Interference in Synthetic Aperture Radar Data: Current Status and Future Trends," *Licensee MDPI, Remote Sensing*, vol. 11, pp. 24-38, 2019.
- حداقل میانگین مربعات نرمال شده اثر تداخل کاهش داده شد. نسبت سیگنال به تداخل قبل از فیلتر برابر ۱۹/۳۷۱۳- بود که بعد از حذف تداخل توسط فیلتر وفقی این مقدار به ۱۴/۰۷۹۶ تغییر پیدا کرد.

۷- مراجع

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A Tutorial on Synthetic Aperture Radar," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, pp. 6–43, 2013.
- [2] M. Tao, F. Zhou, and Z. Zhang, "Wideband Interference Mitigation in High-resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, pp. 74–87, 2015.
- [3] Z. Yang, W. Du, Z. Liu, and G. Liao, "WBI Suppression for SAR Using Iterative Adaptive Method," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 9, pp. 1008–1014, 2016.
- [4] A. Camps et al, "Radio-frequency Interference Detection and Mitigation Algorithms for Synthetic Aperture Radiometers," *J. Algorithms*, vol. 4, no. 4, pp. 155-182, 2011.
- [5] J. Su, H. Tao, M. Tao, J. Xie, Y. Wang, and L. Wang, "Time-Varying SAR Interference Suppression Based on Delay-Doppler Iterative Decomposition Algorithm," *J. Remote Sens.*, DOI:10.3390/rs10091491, vol. 10, pp. 1-19, 2018.
- [6] F. Weiwei, Z. Feng, and T. Mingliang, "Interference Mitigation for Synthetic Aperture Radar Based on Deep Residual Network," *J. Remote Sens.*, vol. 11, pp. 16-54, 2019.
- [7] J. Yu, J. Li, B. Sun, J. Chen, and C. Li, "Multiclass Radio Frequency Interference Detection and Suppression for SAR Based on the Single Shot Multi Box Detector," *J. Sensors*, vol. 18, PP.1-17, 2018.
- [8] M. Tao, F. Zhou, J. Liu, Y. Liu, Z. Zhang, and Z. Bao, "Narrow-band Interference Mitigation for SAR Using Independent Subspace Analysis," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, pp. 5289–5301, 2014.
- [9] Y. Huang, G. Liao, J. Li, and J. Xu, "Narrowband RFI Suppression for SAR System via Fast Implementation of Joint Sparsely and Low-rank Property," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, pp. 2748–2761, 2018.
- [10] M. Bayat and M. H. Madani, "Analysis of Cross-Rate Interference Cancellation by Use of a Novel Phase Code Interval in Loran Navigation System," *J. Institute of Navigation*, vol. 64, pp.365–376, 2017.
- [11] R. Natsuaki, T. Motohka, M. Watanabe, M. Shimada, and