

مدلی برای تشخیص اهداف و دسته‌بندی پالس‌های سیستم رادار ۶ آنتنی با شبکه‌های عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

الناز نصیرزاده^۱، سیاوش بیات^۲، شاهرخ قائم مقامی^۳

۱- پژوهشگر پسادکتر، مهندسی فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استادیار، مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- استاد، مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴)

چکیده

در این تحقیق مدلی برای تشخیص اهداف و دسته‌بندی پالس‌های دریافتی توسط سیستم رادار ۶ آنتنی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. مدل پیشنهادی از دو بخش کلی خوشه‌بندی و دسته‌بندی تشکیل شده است. در فرآیند خوشه‌بندی، پالس‌های مختلفی که توسط هر یک از آنتن‌های رادار دریافت می‌شوند به نحوی خوشه‌بندی می‌گردند که پالس‌های مربوط به هر هدف در خوشه مربوط به همان هدف قرار می‌گیرند و در انتها نتایج حاصل از خوشه‌بندی با الگوریتم‌های مختلف، توسط شاخص دان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در فرآیند دسته‌بندی نیز به کمک شبکه عصبی به پیش‌بینی زاویه هدفی که ویژگی‌های آن توسط آنتن‌ها دریافت شده، پرداخته شده است که وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. برای تنظیم پارامترها نیز از روش تاگوچی استفاده شده است که به کمک آن بهترین مقادیر پارامترها انتخاب شده و شبکه عصبی با کمک این مقادیر آموزش داده شده است و در پی آن دقت پیش‌بینی زاویه پالس دریافتی تا ۹۸٪/۵۵ افزایش پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: رادار، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک، دسته‌بندی، خوشه‌بندی

A Model for Detecting Targets and Classifying Pulses of 6-Antenna Radar Systems with Neural Networks Optimized by Genetic Algorithm

Abstract

In this research, a model for detecting targets and classifying the pulses received by the 6-antenna radar system using artificial neural networks optimized by genetic algorithm is presented. The proposed model consists of two main parts: clustering and classification. In the clustering process, the different pulses received by each of the radar antennas are clustered in such a way that the pulses of each target are placed in the cluster of the same target, and finally the results of clustering with different algorithms are evaluated by Dunn index. In the classification process, using the neural network, the target angle is predicted, the characteristics of which are received by the antennas, and the weights and biases of the neural network are optimized by a genetic algorithm. To adjust the parameters, Taguchi method has been used to select the best values of the parameters and the neural network has been trained with these values, and as a result, the accuracy of predicting the received pulse angle has increased to 98.55%.

Key words: Radar, Neural Network, Genetic Algorithm, Classification, Clustering

مقدمه

سیستم‌های راداری در نظارت و رهگیری هواپیماها و موشک‌ها، اهداف دریایی یا زمینی و اجرام فضایی، بحث‌های هواشناسی، اندازه‌گیری سرعت وسایل نقلیه، پیدا کردن مین در زمین، فرود دقیق، عکس‌برداری از کره‌های دیگر با رادار تصویری، پرهیز تصادم، نظارت بر اهداف جنبنده در زمین و نقشه برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۳].

امروزه مسئله اعمال الگوریتم‌های یادگیری بر روی سیگنال‌های دریافت شده توسط سیستم راداری، در تعدادی از برنامه‌های کاربردی مانند ردیاب رادیویی و ارتباطات موبایلی مورد استفاده قرار گرفته است [۱، ۴]. یادگیری و در پی آن کشف دانش، حوزه جدیدی میان رشته‌ای و در حال رشدی است که حوزه‌های مختلفی مانند پایگاه‌داده، آمار، علوم کامپیوتر و سایر زمینه‌های مرتبط را با هم تلفیق کرده تا اطلاعات و دانش ارزشمند نهفته در حجم بزرگی از داده‌ها را استخراج نماید [۳-۵].

در این تحقیق مدلی برای تشخیص اهداف و دسته‌بندی پالس‌های دریافتی توسط سیستم رادار ۶ آنتی با استفاده شبکه‌های عصبی مصنوعی بهینه‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک ارائه است. بدین منظور سیستمی پیشنهاد داده‌ایم که به طور کلی از دو قسمت خوشه‌بندی و دسته‌بندی تشکیل شده است. هدف از خوشه‌بندی این است که پالس‌های مختلفی که توسط آنتن‌های رادار دریافت می‌شوند را به نحوی خوشه‌بندی کنیم که پالس‌های مربوط به هر هدف در خوشه مربوط به همان هدف قرار بگیرند. یعنی به اندازه تعداد اهداف خوشه داشته باشیم و هر پالس جدیدی که دریافت شد ابتدا بررسی شود که آیا داده واقعی است یا نویز (این را از طریق آستانه‌هایی که برای نویز بودن یک پالس تعیین کردیم به دست می‌آوریم) سپس در صورت اینکه تشخیص داده شد پالس دریافتی نویز نیست طی عملیات دسته‌بندی تعیین می‌شود که این پالس متعلق به کدامیک از هدف‌های دریافتی است.

در این روش پیشنهادی از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی زوایا استفاده شده که در آموزش آن از الگوریتم ژنتیک برای یادگیری بهینه‌وزن‌ها و بایاس‌ها بهره گرفته شده است. برای انتخاب بهترین مقادیر برای الگوریتم ژنتیک نیز از طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شده است و برای هر پارامتر پنج سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفتند و بهترین

مقادیر آنها که خطای زاویه کمتری را داشت استخراج گردید. سیستم پیشنهاد شده به طور تجربی در باند فرکانسی Ku اعتبارسنجی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شده است که دقت پیش‌بینی زاویه پالس‌های دریافتی برابر با ۹۸/۵۵٪ خواهد بود. بنابراین به کمک این سیستم پیشنهادی می‌توان زاویه مجموعه‌ای از پالس‌هایی که روی هم افتادگی دارند را بدون ابهام و با دقت بالایی تخمین زد.

ساختار مقاله بدین شرح است که در بخش دوم، تحقیقاتی که در زمینه سیستم‌های راداری و اعمال الگوریتم‌های مختلف بر روی آن‌ها انجام شده است مورد بررسی قرار گرفته و توضیحاتی در خصوص سیستم‌های راداری بیان شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی و متدولوژی تحقیق با جزئیاتی که شامل اعمال روش‌های خوشه‌بندی و دسته‌بندی بر پالس‌های دریافتی توسط سیستم راداری، نحوه نمایش جواب و پیش پردازش داده‌ها است مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم نتایج، با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی ارزیابی شده و بهترین مقادیر برای پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و شبکه با کمک بهترین پارامترها آموزش داده می‌شود و کارایی سیستم، اعتبارسنجی می‌گردد. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری کلی تحقیق ارائه شده است.

پیشینه تحقیق

به طور کلی حوزه پردازش و تجزیه تحلیل داده هر روز جذابیت و مقبولیت بیشتری پیدا می‌کند و با استفاده از تحلیل حجم‌های بیشتری از داده‌ها، می‌توان تحلیل‌های بهتر و پیشرفته‌تری را برای مقاصد مختلف، از جمله مقاصد تجاری، پزشکی و امنیتی ارائه داد و نتایج مناسب‌تری با توجه به پایگاه داده دریافت کرد [۳-۵].

یکی از حوزه‌هایی که امروزه به طور گسترده‌ای در آن از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود، حوزه پردازش و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های راداری است [۶]. در گذشته سیگنال‌های راداری بیشتر در سیستم‌های دفاعی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، اما امروزه برنامه‌های در حال ظهور، حوزه‌های جدیدی را برای سیگنال‌های راداری در پیش‌بینی هوا، کنترل آلودگی، مشاهدات فضایی و ناوبری‌ها به وجود آورده‌اند [۷-۹]. به نحوی که می‌توان گفت حوزه پردازش سیگنال‌های راداری وارد عرصه جدیدی شده و رویکردهای قدرتمندی برای پردازش

در سال ۲۰۱۸، کانگ و همکاران [۱۵] بر دسته‌بندی رادار با استفاده از شبکه عصبی پیچشی^۹ تمرکز کردند. کار تحقیقاتی آنها با تعریف پارامترها، سپس تجزیه و تحلیل زمان و طیف سنجی بخش حقیقی سیگنال و در نهایت شناسایی سیگنال با تبدیل فوری کوتاه مدت^{۱۰} (STFT) آغاز شد. پس از مقایسه قسمت حقیقی و طیف‌سنج سیگنال رادار، آنها نتیجه‌گیری کردند که کارایی دسته‌بندی رادار به طور مستقیم با تعداد انتزاعات ویژگی‌ها^{۱۱} در ارتباط است.

در سال ۲۰۱۹، یانگ و همکاران [۱۶] از روش تبدیل بسته موجک^{۱۲} (WPT) و روش تجزیه بسته موجک^{۱۳} (WPD) روی سیگنال‌های رادار برای تجزیه و تحلیل زمان و فرکانس استفاده کردند. همچنین تعدادی مقاله مربوط به برنامه‌های دفاعی و نظارتی منتشر شده است که بر روی تکنیک‌های تشخیص سیگنال رادار و اندازه‌گیری پارامترهای مهم آن متمرکز شده‌اند [۱۷-۱۹]. برخی از مقالات نیز به تجزیه و تحلیل فرکانس زمان سیگنال پرداخته‌اند [۲۰-۲۲].

بگوی و همکاران [۷] نیز روی سیگنال‌های رادار و روش‌های استخراج ویژگی‌های مورد استفاده در تحلیل سیگنال‌های راداری تمرکز کرده‌اند. آنها تحلیل‌ها خود را با استفاده از مدل LSTM و با به کارگیری تبدیل موجک برای نویز زدایی انجام دادند و نشان دادند که تبدیل موجک Haar از بیشترین دقت برخوردار است.

در مرجع [۲۳] سیستم تک پالسی پیشنهاد شده است که بر اساس نرخ‌های پیچیده دلخواه بین خروجی‌های آنتن بنا نهاده شده است. در مرجع [۲۴] سیستم تک پالسی پیاده‌سازی شده است که بر اساس معماری مبتنی بر دامنه است و همچنین نشان داده شده است که برای نرخ‌های سیگنال به نویز^{۱۴} (SNR) که دارای مقدار 26dB یا بیشتر هستند، می‌توان خطای تخمین زاویه را به کمتر از ۱ رساند. یک سیستم تخمین زاویه بر اساس اختلاف‌های دامنه بین سیگنال‌های دریافتی توسط آنتن گیرنده/فرستنده در رادار ۸ آنتنی توسط لی و همکارانش در مرجع [۲۵] پیاده‌سازی شده است.

سیگنال پیشرفته طراحی شده است که می‌تواند به لطف تحولات الگوریتمی و پیشرفت مداوم در محاسبات سریع (که روز به روز ارزان‌تر نیز می‌شود)، قابل اجرا باشند.

در این بین شناسایی اهداف یکی از مهمترین کاربردهای رادارها می‌باشد که به طور گسترده مورد استفاده عملیاتی قرار گرفته است [۱۰]. شناسایی هدف را می‌توان نوعی مسئله دسته‌بندی در نظر گرفت که در آن بررسی می‌شود که آیا سیگنال آزمایش شده از انعکاس اهداف موجود تشکیل شده است یا صرفاً با نویزها مطابقت دارد. در واقع منظور از شناسایی اهداف، تشخیص صحیح اهداف در چشم‌انداز رادار است. پردازش سیگنال رادار سنتی شامل چندین فرآیند نظیر فیلتر کردن همسان، پردازش داپلر و آزمون فرضیه است. روش آزمون فرضیه کلاسیک در پردازش سیگنال رادار، روش CFAR^۱ است که از قانون نیومن-پیرسون برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند [۱۱].

اخیراً بسیاری از محققان بر روی بکارگیری رویکردهای نوین یادگیری برای تجزیه و تحلیل مسائل راداری متمرکز شده‌اند و آنها را برای کاربردهای راداری مختلف توصیه کرده‌اند. در مقاله [۱۲] و [۱۳] از رویکردهای نوین یادگیری برای شناسایی خودکار اهداف راداری (ATR): به معنی استفاده از ویژگی‌های سیگنال هدف برای شناسایی خودکار نوع هدف) استفاده کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۶، لی و همکاران [۱۴] با بکارگیری راهکارهای یادگیری عمیق، مبحث تشخیص ساطع‌کننده^۲ رادار را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک شبکه باور عمیق (DBN)^۳ را آموزش دادند و آموزش لایه به لایه حریصانه^۴ را با کمک ماشین بولتزمن محدود شده^۵ (RBM) با تنظیم محدود به کار گرفتند. در مطالعه آنها مقایسه‌ای بین روش‌های نسبت سیگنال به نویز^۶ (SNR)، پس انتشار خطا^۷ (BP) و ماشین بردار پشتیبان^۸ (SVM) برای تجزیه و تحلیل عملکرد انجام شده است.

⁸ Support Vector Machines

⁹ Convolutional Neural Network

¹⁰ Short Term Fourier Transform

¹¹ Feature abstractions

¹² Wavelet Packet Transform

¹³ Wavelet packet decomposition

¹⁴ Signal to noise ratio

¹ Constant false alarm rate

² Emitter

³ Deep Belief Network

⁴ Greedy Layer-wise Training

⁵ Restricted Boltzmann Machine

⁶ Signal-to-noise ratio

⁷ Back propagation

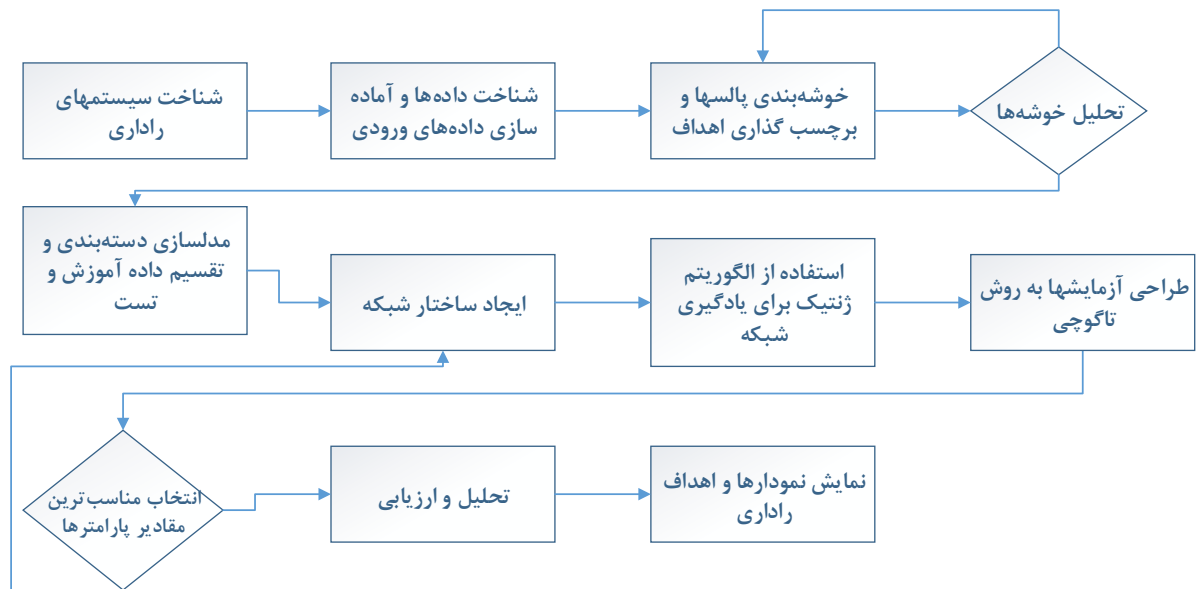
زاویه حدود ۲ درجه در یک محدوده زاویه با بیش از ۳۶۰ درجه و فرکانس پهنای باند ۱۱ گیگا هرتز به دست آمده است. رویکردی مشابه که همبستگی الگوی توان نامیده می‌شود در تعدادی از پرتوهایی که توسط رادیاتور الکترونیکی شناسایی شده‌اند توسط تیلفر و همکارانش در مرجع [۲۶] پیاده‌سازی شده است. در این مقاله هم کارایی بالا با خطای زاویه میانگین کمتر از ۱/۵ روی ۳۶۰ قطاع دایره کامل به دست آمده است. اگرچه در نتایج مقالات [۲۴] و [۲۶] امکان‌سنجی رسیدن به تخمین‌های دقیق زاویه تنها توسط پردازش دامنه بر اساس معیار توان و الگوهای ضبط شده نیاز به محاسبه روی همه قطاع‌های دایره‌ای زاویه‌دار به دست آمده است که این امر زمان پردازش را افزایش می‌دهد. این مسئله علاوه بر زمان لازم برای تعویض بین پالس‌ها، موضوع مهمی به شمار می‌آید. سیستمی که در این مقاله ارائه شده است از سیستم تک پالس الهام می‌گیرد و از داده دامنه استفاده می‌کند. به جای استفاده از تنها دو ورودی که در مرجع [۲۴] پیشنهاد شده است، ۹ تابع پالس توسط یک شبکه شکل گرفته است که از ابهامات جلوگیری می‌کند. ۹ مقدار دامنه نرمال شده توسط شبکه‌های عصبی پردازش شده‌اند که زاویه را روی کل محدوده جهات ممکن ارزیابی می‌کند. این روش سرعت پردازش را بالا می‌برد و مهم‌تر از آن همه الزامات فاز و کالیبراسیون دامنه را از بین می‌برد. رویکرد شبکه‌عصبی به طور موفقیت آمیزی در [۲۷] و [۲۸] برای سیستم‌هایی که تنها یک زاویه را تخمین می‌زدند مورد استفاده قرار گرفته بود. در مرجع [۲۹] تخمین‌های زاویه با استفاده از یک سیستم مبتنی بر شبکه عصبی و سایر الگوریتم‌های یادگیری مورد مقایسه قرار گرفتند. دقت هر دو رویکرد شبیه به هم بود اما روش شبکه عصبی به طور قابل توجهی از سرعت پردازش بالاتری برخوردار بود. سیستمی که در این تحقیق ارائه شده است جهت ورود را در یک قطاع دایره مخروطی پیدا می‌کند و بنابراین دو زاویه را تخمین می‌زند. روشی انتشاردهنده که با تنظیمات متفاوت آرایه به شکل L ، نیاز به تجزیه مقدار ویژه را از بین می‌برد، با موفقیت در مقاله [۳۰] پیاده‌سازی شده است. رویکردی بر اساس تجزیه مقدار منحصر به فرد ماتریس‌های همبستگی در [۳۱] ارائه شده است که از دقت بالایی برخوردار است. این تحقیقات عناصر را ایده‌آل فرض می‌کنند و از اتصال متقابل چشم پوشی می‌کنند. یک طرح برای جبران اتصال متقابل آرایه‌ای در مرجع [۳۲] برای

آرایه جهت ورود دو بعدی مدور ارائه شده است. در مرجع [۳۳] سیستم چند پالسی برای بیش از یک هدف در رادارهای چند ورودی- چند خروجی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به طور کلی دو دسته رادار چند ورودی- چند خروجی وجود دارند. در دسته اول، آنتن‌های فرستنده به نسبت فاصله‌ای که از هدف دارند، به طور گسترده‌ای از هم جدا شده‌اند. بنابراین اهداف می‌توانند از جهات مختلف به طور همزمان شناسایی شوند [۳۴، ۳۵]. دسته دوم رادارهایی هستند که در آن آنتن‌های فرستنده و گیرنده به نسبت محدوده اهداف، نزدیک هم قرار گرفته‌اند [۳۶]. در مرجع [۳۷] نیز روشی برای شناسایی اهداف متحرک ارائه شده است. در یک محیط چند مسیری که چندین تک سیگنال ورودی از جهات مختلف وارد می‌شوند و دارای دامنه‌های متغیر هستند، سیستم باید با پردازش دامنه زمانی رزولوشن بالا تقویت شود تا بتوان سیگنال‌ها را دسته‌بندی نمود [۲].

با توجه به مطالعه تحقیقات گذشته به این نتیجه رسیدیم که روش شبکه عصبی برای پیش‌بینی زاویه پالس‌های دریافتی نسبت به سایر روش‌ها نتیجه بهتری داشته است. بنابراین ما نیز از این روش استفاده کرده‌ایم و برای بهینه‌سازی آن مقالات مختلفی را مطالعه کردیم و به این نتیجه رسیدیم که امروزه از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه عصبی استفاده می‌گردد. بارواج و تیواری روش بسیار جالبی برای بهبود شبکه عصبی از طریق الگوریتم ژنتیک پیشنهاد داده‌اند. تعدادی از محققان پیشنهاد داده‌اند که از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم کردن وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی استفاده شود [۳۸، ۳۹]. این در حالی است که تحقیقات پیشین از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه عصبی استفاده نکرده بودند. بنابراین در سیستم از الگوریتم ژنتیک برای یادگیری بهینه وزن‌ها و بایاس‌های شبکه استفاده کردیم.

متدلوژی تحقیق

در این تحقیق برای خوشه‌بندی و دسته‌بندی پالس‌های دریافتی سیستم رادار ۶ آنتنی از شبکه عصبی بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. متدلوژی کلی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است و الگوریتم پیشنهادی نیز در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱- متدولوژی تحقیق

```

Begin
Load samples of dataset
Normalize features
Set the percent of the training (xtr%) and testing data(xts%)
Divide xtr% of dataset as training and xts% for testing dataset.
%Network Structure:
Set the number of neurons in input, hidden and output layers
Generate neural network structure
%Train network Using Genetic Algorithm:
Set population size
Set number of generation
Set crossover rate
Set mutation rate
Initialize population with random candidate solution
Evaluate each candidate based on the difference between real output and estimate output in Neural
Network trained with the value of each chromosome
Set the best fit, bestSol
Set iteration ←0
do while (iteration < numOfGen)
    Select the best fit individual for parents based on the result of network
    Apply crossover on structure of the selected parents
    Apply mutation on structure of the solution
    Evaluate the fitness of new individuals based on the result of network
    Replace least fit individual in the population with new individuals
    Update the bestSol
    Iteration++
endwhile
Return the bestSol

```

شکل ۲- شبه کد الگوریتم پیشنهادی

داده‌های مورد استفاده جهت اجرای الگوریتم

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، حاصل از داده‌هایی است که توسط ۶ آنتن سیستم راداری در چهار باند فرکانسی S، C، X و Ku که در جدول ۱ نشان داده شده اند، دریافت شده‌اند.

جدول ۱- فرکانس باندهای مختلف راداری

نام باند	حداقل فرکانس	حداکثر فرکانس
باند S	۲ GHz	۴ GHz
باند C	۴ GHz	۸ GHz
باند X	۸ GHz	۱۲ GHz
باند Ku	۱۲ GHz	۱۸ GHz

در واقع آنتن‌های فرستنده ابتدا امواجی را به محیط اطراف فرستاده‌اند و بازخورد آن‌ها توسط آنتن‌های گیرنده دریافت شده است. این سیگنال‌ها توسط سیگنال ژنراتورها ایجاد می‌شوند. سیگنال ژنراتور دستگامی است که قادر است سیگنال‌ها (امواج) الکترونیکی با مقدار دامنه (ولتاژ) و فرکانس مورد نظر ما را تولید نماید و آن را به خروجی برای وارد کردن به مدار و کارهای دیگر اعمال کند. بازخوردهای دریافت شده توسط آنتن‌های گیرنده به صورت تک پالس‌هایی هستند که یازده ویژگی برای هر یک از آن‌ها ذخیره شده است. این یازده ویژگی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. این مقادیر در قالب فایل‌های توصیف کننده پالس (PDW) وارد پردازشگر اطلاعات می‌شود. TOA زمان دریافت پالس است و مقدار آن برای محاسبه PRF اهمیت زیادی دارد. زمان ورود n امین سیگنال از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$TOA(n) = TOA(n - 1) + PRI \quad (1)$$

برای انجام عملیات خوشه‌بندی ابتدا با توجه به محدوده باندهایی فرکانسی، آن‌ها را در دسته‌های مربوط به خود قرار دهیم. پس از اجرای این مرحله داده‌های مربوط به باند C که در محدوده ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ هستند از داده‌های مربوط به باند S که در محدوده ۱۸۵۰ تا ۴۰۰۰ هستند جدا می‌شوند و به

همین ترتیب داده‌های مربوط به باندهای مختلف به طور جداگانه در خوشه‌های مربوطه قرار داده می‌شوند.

جدول ۲- ویژگی‌های پالس‌های دریافت شده توسط رادار

مشخصه	توضیح
شناسه (ID)	به هر پالس شناسه‌ای اختصاص داده شده است که به کمک آن بتوان پالس مورد نظر را شناسایی نمود. به نحوی این پارامتر به عنوان کلید اصلی ^{۱۵} پالس‌ها در پایگاه داده شناخته می‌شود.
زاویه ^{۱۶} (AOA)	این ویژگی زاویه دریافت سیگنال را بر حسب درجه نشان می‌دهد. اندازه‌گیری AOA را می‌توان با تعیین جهت انتشار موج فرکانس رادیویی که روی آنتن رخ داده یا از روی حداکثر قدرت سیگنال در حین چرخش آنتن، انجام داد. همچنین AOA را می‌توان با اندازه‌گیری اختلاف زمان رسیدن (TDOA) ^{۱۷} بین عناصر منفرد آرایه محاسبه کرد.
فرکانس ^{۱۸} (PRF)	این ویژگی فرکانس پالس دریافتی را بر حسب مگاهرتز نشان می‌دهد. فرکانس تکرار پالس (PRF) تعداد پالس‌های یک سیگنال تکرار شده در یک واحد زمان خاص است که به طور معمول با پالس در ثانیه یا هرتز اندازه‌گیری می‌شود. فاصله تکرار پالس (PRI) نیز فاصله زمانی بین پالس‌ها است. لازم به ذکر است که این دو پارامتر با عبارت $PRF = 1 / PRI$ بهم مرتبط می‌شوند.
زمان ورود ^{۱۹} (TOA)	این ویژگی زمان ورود پالس به سیستم رادار را نشان می‌دهد. در واقع زمانی را بیان می‌کند که آن پالس توسط رادار دریافت شده است. بعبارتی می‌توان گفت TOA زمان مطلق است که سیگنال رادیویی از یک فرستنده خارج می‌شود به یک گیرنده از راه دور می‌رسد. TDOA نیز تفاضل بین TOA ها می‌باشد.
پهنای پالس ^{۲۰} (PW)	طول پالس به معنی طول موج پالس دریافتی توسط رادار است.
آنتن ۱ تا ۶	این ۶ ویژگی، مقادیری که ۶ آنتن رادار دریافت کرده‌اند را نشان می‌دهد.

پیش پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

به منظور انجام عملیات خوشه‌بندی باید ویژگی‌هایی در نظر گرفته شوند که همه پالس‌های موجود در یک خوشه در آن

¹⁸ Pulse repetition frequency

¹⁹ Time of arrival

²⁰ Pulse width

¹⁵ Primary Key

¹⁶ Angle of arrival

¹⁷ Time difference of arrival

