
A framework for multi-mode radars discrimination based on the extended PDW

M. J. Qalandari, S. M. Hosseini Andargoli^{*}, N. A. Zarei, M. Mollazadeh Gol Mahalleh

^{*} Associate Professor, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

(Received: 13/02/2022, Accepted: 12/04/2022)

Abstract

Due to ECCM techniques development in radars, the pulse separation methods in ESM systems rely on intra pulse modulation instead of analyzing pulse descriptive words by traditional methods. The extraction of pulse modulation is a suitable method but in the case of multi-mode radars, the number of targets is overestimated by changing the intra-pulse modulation. The purpose of this paper is to detect multi-mode radars with various types of internal modulation in a dense radar environment. The proposed solution is to add a multi-mode radars detection section to the existing pulse separation methods at the post processing stage. This method involves providing an appropriate framework for examining the separated pulse string by defining and selecting similarity criteria from the extended PDW. In this method, at first the distinguishing features of each radar are extracted and the similarity criteria of each feature are calculated to check the similarity between the two pulse strings. Input data contains information separated from real radars received by the ESM system. Due to the uncertainties of each criteria, similarity scores are applied in a fuzzy and normalized form to construct the training dataset. The data table is then used to train a perceptron neural network. The trained network can detect multimode radars automatically. To test the network, a section of the data table is applied to the network and the trained network has succeeded in distinguishing the multi-mode radars from distinct radars in 100% of test data without failure.

Keywords: Multi-mode radar, Radar pulse separation, Feature extraction, Neural network

^{*} Corresponding author E-mail: smh_andargoli@nit.ac.ir

ارائه چارچوبی برای تشخیص رادارهای چندحالتی مبتنی بر PDW توسعه یافتهمحمدجواد قلندری^۱، سید مهدی حسینی اندارگلی^{۲*}، نادعلی زارعی^۳، مهدی ملازاده گل محله^۴۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل،۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین^(ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳)

چکیده

با پیشرفت تکنیک‌های ECCM در رادارها، روش‌های تفکیک پالس در سیستم‌های ESM به جای بررسی کلمات توصیف‌کننده در روش‌های سنتی بر مدولاسیون درون پالسی تکیه نموده‌اند. استخراج مدولاسیون درون پالسی روش مناسبی بوده اما در مواجهه با رادارهای چندحالتی با تغییر مدولاسیون درون پالسی، تعداد اهداف را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زند. هدف از این مقاله تشخیص رادارهای چندحالتی با انواع مدولاسیون داخلی، در یک محیط متراکم راداری است. راه حل پیشنهادی افزودن بخش تشخیص رادارهای چندحالتی به روش‌های موجود تفکیک پالس در مرحله پردازش تکمیلی است. این روش شامل ارائه یک چارچوب مناسب جهت بررسی رشته پالس‌های تفکیک‌شده با تعریف و انتخاب معیارهای تشابه از PDW توسعه یافته است. در این روش ابتدا ویژگی‌های متمایزکننده هر رادار استخراج شده و معیارهای تشابه از هر ویژگی برای بررسی شباهت بین دو رشته پالس محاسبه می‌گردد. داده ورودی شامل اطلاعات تفکیک‌شده از رادارهای واقعی است که توسط یک سیستم شوند دریافت می‌گردد. به دلیل عدم قطعیت در هر یک از معیارها، امتیاز تشابه به صورت فازی و نرمالیزه شده لحاظ شده و داده‌های آموزش تکمیل می‌شود. سپس از جدول داده‌ها برای آموزش یک شبکه عصبی پرسپترون استفاده می‌شود. شبکه پس از آموزش در شرایط جدید، رادارهای چندحالتی را تشخیص می‌دهد. جهت تست شبکه، بخشی از جدول داده به شبکه اعمال شده و شبکه آموزش دیده شده در ۱۰۰ درصد داده‌های تست با موفقیت توانسته است رادارهای چندحالتی را از بین رادارهای متمایز تشخیص دهد.

کلیدواژه‌ها: رادار چندحالتی، تفکیک پالس راداری، استخراج ویژگی، شبکه عصبی**۱- مقدمه**

در حوزه فرکانس یا زمان تبدیل می‌شود. دقت خروجی این روش باز هم به تخمین تعداد خوشه‌ها در روش بدون ناظر و مقدار همبستگی انواع مدولاسیون درون پالسی در روش‌های طبقه‌بندی با ناظر بستگی دارد.

تعریف رادار چندحالتی، راداری با قابلیت تغییر نوع مدولاسیون داخلی یا بین پالسی در حین کار است؛ اما در اکثر منابع، فرض بر این است که رادار دارای یکی از انواع مدولاسیون‌های درون پالسی است و تحقیقات کمی در زمینه شناخت رادارهایی با قابلیت تغییر مود عملکرد انجام شده است. با این تغییر، تفکیک و خوشه‌بندی پالس‌ها در سیستم‌های شنود متداول به درستی انجام نشده و سیستم‌های جنگ الکترونیک در شناسایی نوع رادار و مشخصات آن دچار سردرگمی می‌شوند. هدف از این مقاله تشخیص رادارهای چندحالتی^۲ با انواع مدولاسیون درون پالسی است. تمایز بین یک رادار چندحالتی با چند رادار مجزا، به تحلیل دقیق و بهره‌گیری از همه شرایط ممکن نیاز دارد.

در این بخش قابلیت انواع روش‌های تفکیک پالس راداری با تمرکز بر رادارهای چندحالتی بررسی می‌شود. توسعه فناوری

پالس‌های متداخل دریافتی در یک گیرنده ESM باید از هم تفکیک شود تا پالس‌های متوالی مربوط به هر رادار به دست آمده و نوع رادار تعیین شود [۱]. الگوریتم‌های تفکیک پالس در حالت کلی شامل روش‌های خوشه‌بندی بر مبنای پارامترهای پالس [۲] و [۳]. جداسازی بر اساس زمان ورود پالس [۴]، [۵]، [۶] و [۷]، روش‌هایی ترکیبی از دو روش قبل [۸] و [۹]، و روش‌های مبتنی بر استخراج ویژگی [۱۰]، [۱۱] و [۱۲] هستند. به دلیل تغییر پارامترهای راداری، روش‌های سنتی پاسخگو نبوده و روش‌های جدید از روش‌های استخراج ویژگی استفاده می‌نمایند.

با توجه به تغییر اکثر پارامترهای راداری از پالسی به پالس دیگر، روش‌های استخراج ویژگی به جای بررسی کلمات توصیف‌کننده پالس (PDW^۱)، بر مشخصات درون پالسی مانند شکل پالس، نوع مدولاسیون پالس و مؤلفه‌های طیفی تکیه دارند [۱۳]. در این روش‌ها آنالیز زمان-فرکانس مانند تبدیل موجک به کار رفته و مؤلفه‌های سیگنال به یک بردار با ابعاد بالا

* رایانامه نویسنده مسئول: Smh_andargoli@nit.ac.ir

^۲ Multi-Mode Radar^۱ PDW: Pulse Description Word

مرجع [۱۹] برای حل مشکل رادارهای چندحالتی فقط به ترکیب استخراج ویژگی با داده‌های پارامتری اشاره می‌کند. مرجع [۱۳] فقط در نتیجه اشاره کرده که می‌تواند رادار با تغییر مدولاسیون را هم تشخیص دهد. در مقاله‌های [۲۰] و [۲۱] الگوریتم جدیدی برای تشخیص رادارهای چندحالتی با استفاده از روش داده‌کاوی فضایی و یک مدل ابری ارائه شده است. در این روش شعاع آستانه برای ارتباط داده‌های مختلف به یک رادار چندحالتی از طریق مقدار همبستگی و حداقل آنتروپی تعیین می‌شود. مرجع [۲۲] با تعریف ویژگی‌های عمدی و غیرعمدی و مشکلات استخراج ویژگی‌های ناخواسته، پیشنهاد استفاده از ترکیب مدولاسیون درون‌پالسی و بین‌پالسی با پارامترهای کلاسیک درون‌پالسی را در حد بررسی مروری دارد.

در این مقاله روش پیشنهادی مبتنی بر یک چارچوب تحلیلی است که به روش‌های موجود تفکیک پالس افزوده می‌شود. چارچوب روش پیشنهادی جهت تشخیص رادارهای چندحالتی در بخش ۲ و معیارهای تشابه پیشنهادی که بر اساس EPDW^۱ به دست می‌آیند، در بخش ۳ توضیح داده می‌شود. بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی ارائه شده و مقاله در بخش ۵ نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- چارچوب پیشنهادی تفکیک پالس رادارهای چندحالتی

هدف این تحقیق آن است که با فرض تغییر مدولاسیون داخلی یک رادار چندحالتی تفکیک مناسبی صورت گیرد؛ یعنی در خروجی پردازشگر رادارهای چندحالتی به چند گروه مجزا تفکیک نشوند. داده‌های ورودی تحقیق، خروجی‌های تفکیک‌شده راداری است که از یک سیستم شنود حاصل می‌شود و خروجی آن تعیین رادارهای چندحالتی است که به چند رادار مجزا تفکیک شده‌اند. چارچوب پیشنهادی برای حل مسئله پیش‌گفته، ۴ مرحله زیر پیش‌بینی می‌شود:

(الف) جداسازی برحسب زاویه دریافت

(ب) تفکیک برحسب نوع مدولاسیون درون‌پالسی

(ج) تفکیک مدولاسیون‌های مشابه ناشی از رادارهای همکلاس و غیر همکلاس

(د) بررسی احتمال و تست رادار چند مده در خوشه‌های مجزا با تعریف ویژگی مناسب

سبب شده که تغییر یکی از پارامترها در زمان گذشته به راداری با تغییر حالت عملکرد تبدیل شود. اگر دقت تفکیک پالس بالا باشد، رادارهای چندحالتی و پارامتر متغیر به چند هدف مجزا تقسیم نخواهند شد.

روش خوشه‌بندی پارامتری با توجه به تغییر پارامترها در رادارهای چندحالتی برای تفکیک پالس مناسب نیست. تنها نکته قابل‌تذکر جهت تشخیص رادارهای چندحالتی، ثبات زاویه دریافت [۱۴] و احتمالاً انحراف معیار پارامترهایی چون فرکانس کاری رادار است. نوع خوشه‌بندی هم می‌تواند در نتیجه تأثیرگذار باشد. در خوشه‌بندی ترتیبی یا حول رهبر، قطع یک دنباله و تشکیل خوشه جدید باید با بررسی امکان وجود رادار چندحالتی صورت گیرد [۲]. با پیشرفت رادارها و انواع مدولاسیون بین‌پالسی، روش‌های آنالیز زمانی از دقت لازم برای تشخیص رادارهای چندحالتی برخوردار نیستند. البته پیدا کردن الگوی ارسال پالس می‌تواند در تعیین تعداد منبع انتشاری نقش به‌سزایی داشته باشد [۱۵].

در تفکیک پالس بر اساس مدولاسیون درون‌پالسی در تشخیص رادارهای چندحالتی نیز ضعف‌های زیر وجود دارد: الف) ممکن است دو هدف هم‌زمان از یک مدولاسیون درون‌پالسی استفاده نمایند. در این صورت با عدم بررسی پارامترهای دیگر، یک هدف فرض شده و در محاسبه پارامترهایی مانند PRI خطا رخ می‌دهد. تشخیص بین آن که آیا مدولاسیون مشابه، مربوط به دو رادار (با فرکانس مجزا) یا یک رادار پرش فرکانسی است، نیاز به بررسی بیشتری دارد. ب) ممکن است یک رادار چندحالتی بوده و بین انواع مدولاسیون‌های داخلی تغییر حالت دهد. ج) صرفاً با استخراج مدولاسیون درون‌پالسی تشخیص بین رادارهای همکلاس ممکن نبوده و یافتن مشخصه خاص برای هر رادار نیاز به استخراج ویژگی‌های بیشتر از شکل پالس و بررسی مدولاسیون‌های ناخواسته دارد.

مقاله‌های [۳]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸] و [۱۹] بدون ورود به بحث استخراج مدولاسیون درون‌پالسی و با روش‌های کلاسیک به بررسی رادارهای پارامتر متغیر و چندحالتی پرداخته‌اند. مراجع [۳] و [۱۶] از ثبات نسبی دامنه در سیستم‌های هوایی برای تعیین رادارهای پارامتر متغیر استفاده می‌کنند. در این مراجع رادارهای پرش فرکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۷] فقط در شبیه‌سازی اولیه، رادار با پارامتر متغیر ایجاد می‌کند. مرجع [۱۸] با افزایش شعاع آستانه در خوشه‌بندی از تفکیک رشته پالس‌ها بین دو حالت کاری رادار ممانعت می‌کند. این کار بدون توجه به احتمال وجود رادارهای دیگر در این فاصله نسبتاً زیاد، انجام شده و در هر صورت به تعداد اولیه خوشه‌ها وابسته است.

^۱. Extended Pulse Description Word

۱-۲- چارچوب پیشنهادی جهت تشخیص رادارهای چندحالتی

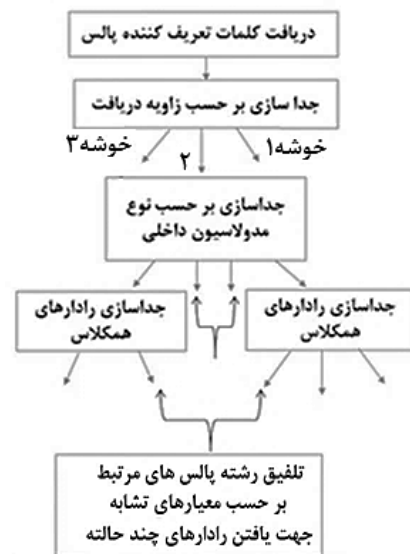
در شکل (۱) چارچوب پیشنهادی جهت تشخیص رادارهای چندحالتی نمایش داده شده است. این چارچوب در تشخیص رادارهای چندحالتی هم‌کلاس نیز موفق عمل می‌کند.

الف) جداسازی برحسب زاویه دریافت

قدم اول در جهت خوشه‌بندی پالس‌های راداری استفاده از ثبات زاویه و جهت دریافت سیگنال است. با این تفکیک احتمالاً چند رادار مختلف با زاویه نزدیک در یک دسته قرار می‌گیرند.

ب) تفکیک برحسب نوع مدولاسیون درون پالسی

در این الگوریتم پس از تفکیک برحسب زاویه، پالس‌ها بر اساس نوع مدولاسیون داخلی تفکیک می‌شوند. تا این مرحله، روش تفکیک همان روش مبتنی بر درخت تصمیم است؛ اما بر این اساس ممکن است رشته پالس مربوط به یک رادار چندحالتی به اشتباه به چند رشته پالس راداری تقسیم گردد.



شکل (۱). چارچوب پیشنهادی جهت تشخیص رادارهای چندحالتی

ج) تفکیک مدولاسیون‌های مشابه ناشی از رادارهای همکلاس و غیر همکلاس

در این بخش، با این احتمال که ممکن است مدولاسیون‌های مشابه ناشی از رادارهای همکلاس در یک خوشه قرار گیرند، به تفکیک پالس رادارهای همکلاس با استفاده از مشخصه‌های راداری پرداخته می‌شود. حتی چند رادار غیر همکلاس ممکن است از یک نوع مدولاسیون استفاده کنند که در این قسمت باید از هم تفکیک گردند.

د) بررسی احتمال رادار چندحالتی در خوشه‌های مجزا با تعریف ویژگی مناسب

بعد از تفکیک رادارهای همکلاس در بند ج، در این بند تست تشابه بین همه زیرگروه‌های حاصل از بند ب و ج انجام می‌شود. در رادارهای چندحالتی مدولاسیون داخلی به صورت پالس به پالس یا دسته پالس تغییر می‌کند. در این حالت فرض بر این است بایستی پارامترهای مشابهی مانند پارامترهای آماری در مشخصات پالس یا شکل آن در بین پالس‌های ارسالی یک رادار که حالت کاری خود را عوض می‌کند، وجود داشته باشد.

برای تعیین رادارهای چندحالتی که مدولاسیون‌های متفاوتی دارند بایستی معیارهای تشابه در زیرگروه‌های مختلف بررسی شود تا رشته پالس‌های مجزا باهم تلفیق گردند.

۳- بردار معیارهای تشابه

با بررسی رشته پالس‌های مجزای حاصل از تفکیک نوع مدولاسیون برای رادارهای چندحالتی به دنبال معیارهایی هستیم که قابلیت اتکا داشته و برای یک رادار تغییر نکنند. این معیارها بر اساس کلمات PDW توسعه یافته^۱، برای بررسی شباهت یا عدم شباهت بین دو رشته پالس استخراج می‌گردند. به دلیل عدم قطعیت در هر یک از معیارها، امتیاز تشابه به صورت فازی تعیین می‌شود. مقادیر به دست آمده برای هر یک از معیارها در جدول داده ثبت شده و با توجه به سناریوی اعمالی در شبیه‌سازی برچسب مناسب لحاظ می‌گردد. سپس این جدول به یک شبکه عصبی آموزش داده شده و پس از آموزش برای داده‌های جدید، خود شبکه تصمیم‌گیری می‌نماید. این عمل نوعی طبقه‌بندی با ناظر است. بردار زیر خلاصه معیارهای تشابه است که می‌تواند از EPDW استخراج گردد. در ادامه هر یک از این معیارها توضیح داده می‌شود:

[زاویه، نوع مدولاسیون، شکل زمان-دامنه پالس، سطوح میانگین دامنه پالس‌ها، عدم هم‌زمانی رشته پالس‌ها، تشابه در انحراف معیار عرض پالس، تشابه در مقدار عرض پالس، تشابه در زمان صعود و نزول پالس، تشابه در شکل پالس، تشابه در عرض پالس باریک، نزدیکی فرکانس‌ها، انحراف معیار فرکانس‌ها، تشابه در PRI متوسط و...]

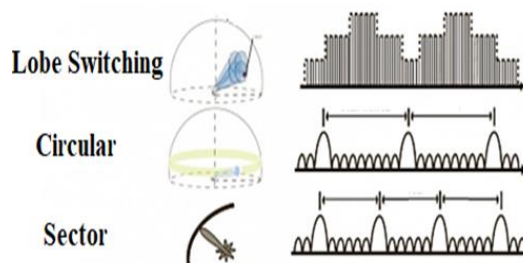
نظر به این که در داده‌های حقیقی در دسترس از یک سیستم شنود راداری، مشخصات شکل پالس، زمان صعود و نوع مدولاسیون داخلی لحاظ نشده، بررسی این موارد جزو اهداف ما در پژوهش‌های آتی خواهد بود.

¹ Extended Pulse Description Word

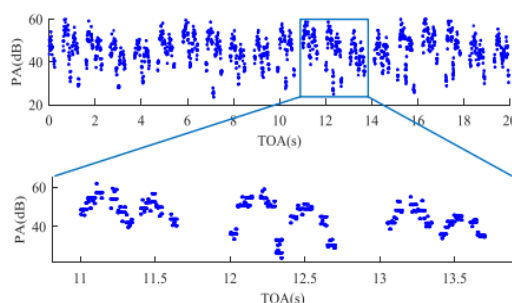
۱-۳- شکل زمان- دامنه

تصویر دامنه پالس دریافتی برحسب زمان در طی چند نمونه مرور آنتن رادار از دید گیرنده یک سیستم شنود مشابه حالت‌های شکل (۲) خواهد شد. انتظار می‌رود برای مرور یک رادار بین دو نمونه برداری متوالی از مقاطع زمانی، ارتباط مناسبی وجود داشته باشد. انتخاب بازه زمانی می‌تواند با تعداد قابل قبولی از پالس‌های دریافتی به نسبت PRF باشد. در شکل (۳) منحنی سهموی حاصل از نمودار دامنه زمان در گیرنده شنود نشان داده شده است.

عدم تطابق الگوی تغییرات دامنه برحسب زمان، عدم تطابق شیب در دو منحنی، مشاهده هم‌زمانی قابل توجه بین دو رشته پالس و تفاوت زیاد سطوح دامنه بین دو رشته پالس، می‌تواند مبین این موضوع باشد که این دو رشته مربوط به یک رادار نیستند. در این بخش، دو حالت اول یعنی الگوی تغییرات دامنه برحسب زمان و تطابق شیب در بحث همبستگی بررسی می‌شوند. با مرتب‌سازی دامنه برحسب زمان دریافت پالس‌ها در دو خوشه و درون‌یابی در هر دسته، انتظار می‌رود شکل‌های حاصل از دو نمودار که مربوط به یک منبع انتشاری چندحالتی هستند، همبستگی مناسبی داشته باشد. در نهایت برحسب مقدار همبستگی می‌توان به تشابه دو خوشه امتیاز داد.



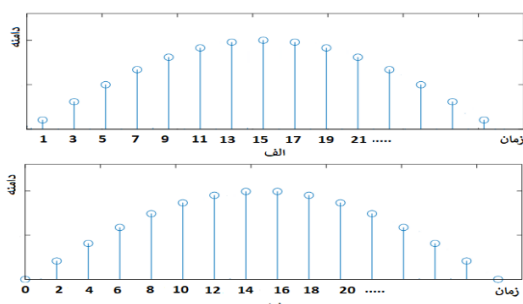
شکل (۲). در سمت چپ نوع مرور آنتن و در سمت راست دامنه پالس دریافتی برحسب زمان نشان داده شده است [۲۳].



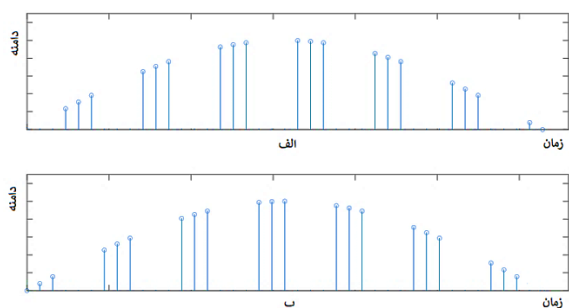
شکل (۳). سهموی حاصل از نمودار دامنه زمان در گیرنده شنود مرجع [۲۴]

تغییر مدولاسیون مطابق شکل (۴) می‌تواند به صورت پالس به پالس یا مطابق شکل (۵) به صورت دسته پالس باشد. در شکل (۶) یک نمونه داده واقعی تفکیک‌شده برحسب نوع

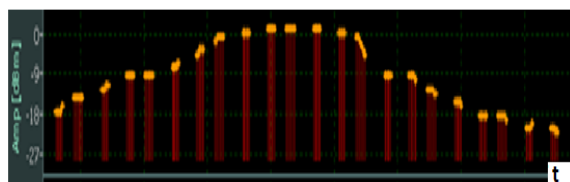
مدولاسیون از راداری چندحالتی نمایش داده شده که سبب ارائه نتیجه نادرست شده است.



شکل (۴). نمایش منحنی دامنه-زمان دو خوشه در صورت تعلق به یک رادار چندحالتی با تغییر مدولاسیون پالس به پالس (با فرض مدولاسیون نوع a در شکل الف و مدولاسیون نوع b در شکل ب)



شکل (۵). نمایش منحنی دامنه-زمان با فرض دریافت ۳ پالس در هر دسته. (با فرض مدولاسیون نوع a در شکل الف و مدولاسیون نوع b در شکل ب)



شکل (۶). یک نمونه داده واقعی تفکیک‌شده برحسب نوع مدولاسیون از راداری چندحالتی

۱-۱-۳- همبستگی شکل‌های زمان-دامنه به‌عنوان معیار تشابه

می‌توان همبستگی شکل‌های حاصل از منحنی زمان-دامنه را به‌عنوان معیاری برای تشابه دو رشته پالس در نظر گرفت. این منحنی‌ها پس از انجام رگرسیون و درون‌یابی باهم مقایسه و مقدار همبستگی آن‌ها به‌عنوان معیار تشابه در نظر گرفته می‌شود.

- تقریب منحنی با شبکه عصبی

به تقریب منحنی درون‌یابی، مدل‌سازی و رگرسیون نیز گفته می‌شود. برای تقریب منحنی‌ها و پر کردن فضاها میانی از رگرسیون به کمک شبکه عصبی استفاده می‌شود. سپس با

برای محاسبه همبستگی پس از نمونه‌گیری از همبستگی پیرسون با رابطه (۱) استفاده شده و عدد حاصل برابر ۰/۹۵۴۷ است که همبستگی بالایی را بین این دو شکل نشان می‌دهد.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right) \quad (1)$$

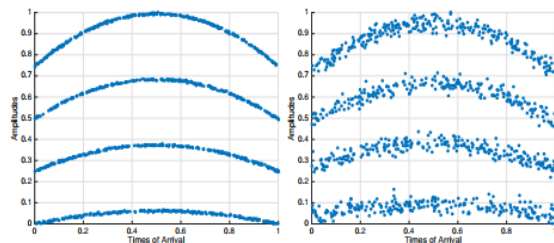
که در آن کمیت‌ها به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

xi و yi نمونه‌های معادل در دو بردار هستند.

۲-۱-۳- بررسی سطوح میانگین دامنه

از دید یک سیستم شوند، توان دریافتی از مدهای مختلف یک رادار چندحالتی تقریباً سطح ثابتی دارد. شکل (۱۰) توان دریافتی از ۴ رادار را با سطوح دامنه مختلف به همراه نویز نرمال را نشان می‌دهد. با بررسی سطوح دامنه دریافتی در دو زیرگروه می‌توان حدس زد که سیگنال‌ها با در نظر گرفتن احتمال، مربوط به یک رادار یا مربوط به چند منبع انتشاری هستند. در صورتی که سیگنال‌های دریافتی مربوط به حالت‌های مختلف یک رادار چندحالتی باشند، انتظار می‌رود که سطوح دامنه دریافتی در دو حالت تفاوت چندانی نداشته باشند.



(a) Data, $\sigma^2 = 0.0001$ (b) Data, $\sigma^2 = 0.01$

شکل (۱۰). دامنه‌های مختلف در مرور مربوط به ۴

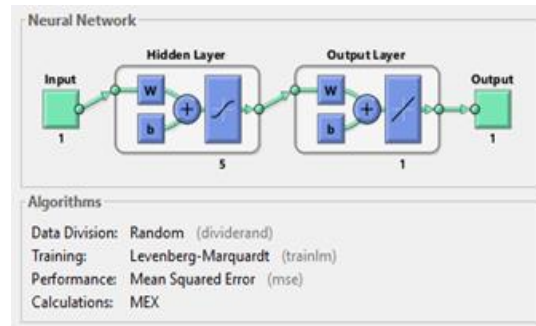
رادار مجزا مرجع [۲۳]

از این رو، مقایسه میانگین دامنه‌های دو خوشه حاصل از تفکیک درون پالسی در یک بازه مشخص زمانی می‌تواند یکی از معیارهای بررسی شباهت باشد. برای امتیاز تشابه رابطه (۲) را می‌توان نوشت:

$$s = 1 - \frac{(|\bar{\mu}_a - \bar{\mu}_b|)}{\sqrt{(\bar{\mu}_a^2 + \bar{\mu}_b^2)}} \quad (2)$$

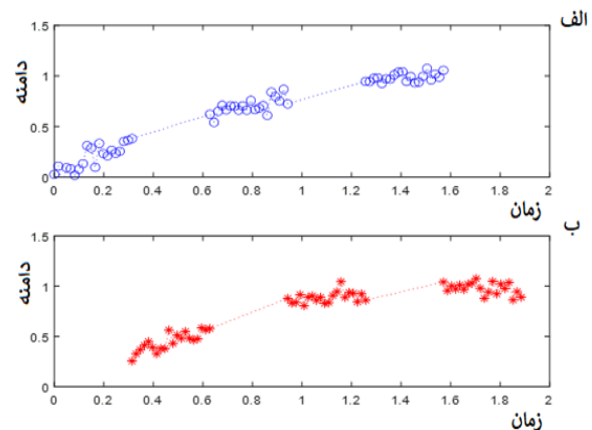
حاصل این رابطه عددی بین صفر و یک است. هر چه مقادیر متوسط دامنه‌ها در دو خوشه به هم نزدیک‌تر باشد، امتیاز تشابه به یک نزدیک‌تر است.

نمونه‌برداری از دو منحنی و بررسی همبستگی درصد تشابه به صورت احتمال تعیین می‌شود. عمل تقریب به کمک یک شبکه عصبی پیش‌رو چندلایه با ۵ لایه مخفی و یک لایه خروجی که تنظیمات آن در شکل (۷) نشان داده شده است، انجام می‌شود.

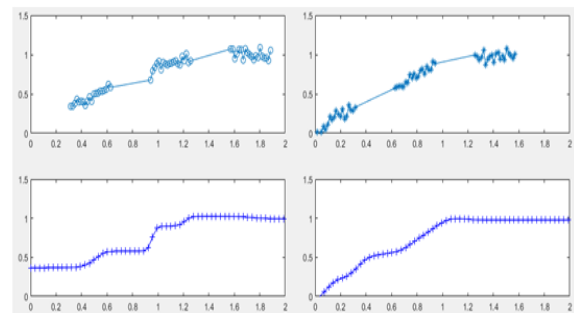


شکل (۷). شبکه عصبی چندلایه برای آموزش و تقریب منحنی

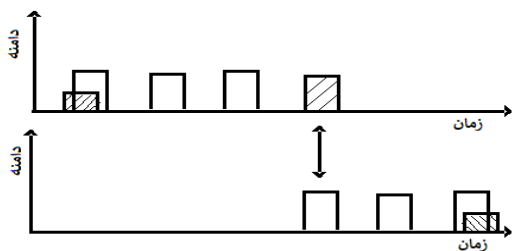
در شکل (۸) تغییر مدولاسیون داخلی و تفکیک آن در دو خوشه با نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. سپس کل مسیر منحنی‌ها در هر دو شکل به کمک شبکه عصبی مدل‌سازی و در شکل (۹) نمایش داده شده است.



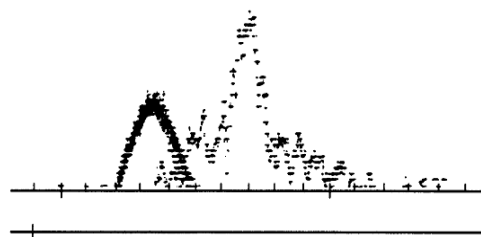
شکل (۸). شبیه‌سازی پالس‌های تفکیک‌شده بر اساس نوع مدولاسیون داخلی برای یک رادار چندحالتی با تغییر مدولاسیون (شکل الف مربوط به مود ۱ و شکل ب مربوط به مود ۲ رادار است)



شکل (۹). نتیجه رگرسیون کل مسیر اسکن دامنه در دو مود رادار چندحالتی مربوط به شکل (۸)



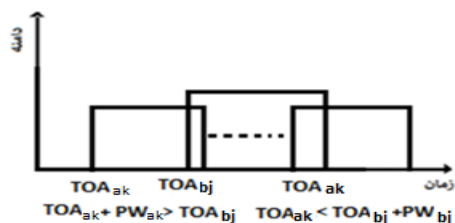
شکل (۱۲). برای رادار چندحالتی پدیده چند مسیری بین دو خوشه حاصل از تفکیک نوع مدولاسیون نیز ممکن است رخ دهد.



شکل (۱۱). نمایش همزمانی دریافت پالس در بخشی از مرور دو رادار با مرور دورانی مرجع [۲۵]

شکل (۱۳) در صورت وجود یکی از دو شرط رابطه (۳) برای تعدادی از پالس‌های دو رشته پالس a و b، درصدی از همزمانی برقرار است:

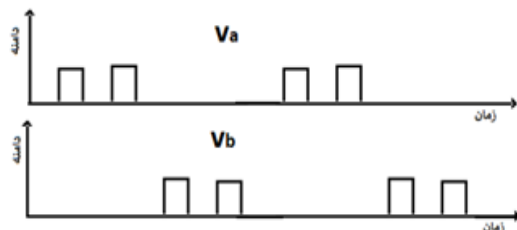
$$TOA_{bj} - PW_{ak} < TOA_{ak} \leq TOA_{bj} \leq TOA_{ak} + PW_{bj} < TOA_{bj} \leq TOA_{ak} \quad (3)$$



شکل (۱۳). نمایش شرط همزمانی بین پالس‌های دو رشته

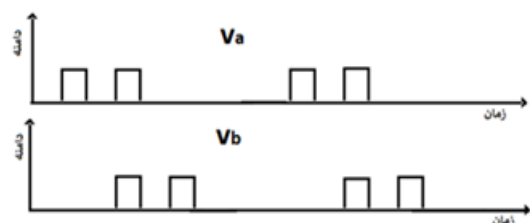
مطابق شکل (۱۴) با فرض عدم همزمانی و وجود پدیده چند مسیری، رابطه (۴) برقرار است.

$$\frac{1}{t} \left(\int_{t_1}^{t_2} (v_a \wedge v_b) dt \right) \approx 0 \quad (4)$$



شکل (۱۴). عدم همزمانی بین دو رشته پالس راداری

۱-۱- شکل (۱۵) همزمانی بین دو رشته پالس راداری مربوط به دو رادار را نشان می‌دهد. پس از تبدیل دامنه‌ها به یک، درصد همزمانی به عرض پالس و همزمانی دریافت بستگی دارد.



شکل (۱۵). همزمانی بین دو رشته پالس راداری مربوط به دو رادار.

۲-۳- بررسی همزمانی بین رشته پالس‌ها

منظور از همزمانی، احتمال دریافت دو یا چند پالس راداری مختلف در یک زمان است. احتمال دارد که سیگنال چند رادار در کانال‌های مجزای فرکانسی به صورت همزمان دریافت شود درحالی که این احتمال برای پالس‌های متوالی یک رادار بسیار کم بوده و مربوط به پدیده چند مسیری است. بررسی همزمانی دریافت پالس می‌تواند معیاری برای تشخیص وجود یک رادار چندحالتی که بین دو حالت سوئیچ می‌کند یا وجود دو رادار مجزا باشد.

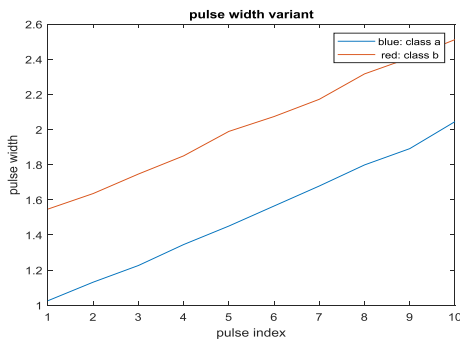
در مسئله کنونی هدف بررسی همزمانی در پالس‌های دریافتی بین خوشه‌هایی است که از نظر نوع مدولاسیون جدا شده‌اند. همزمانی دریافت پالس می‌تواند مجزا بودن دو رادار را نشان دهد. پالس‌های مربوط به دو نوع مدولاسیون که دارای همپوشانی زمانی هستند، نمی‌توانند مربوط به یک رادار چندحالتی باشند. همزمانی دریافت سیگنال از یک رادار، می‌تواند ناشی از پدیده چند مسیری نیز باشد. با وجود پدیده چند مسیری اگر همزمانی پالس‌ها از حدی بیشتر باشد با دو رادار مواجه هستیم نه یک رادار چندحالتی. شکل (۱۱) تغییرات دامنه پالس دو رادار روی هم افتاده را در طول زمان نشان می‌دهد.

- بررسی پدیده چند مسیری

اگر سیگنال‌ها مربوط به یک رادار چندحالتی باشند با توجه به ارسال متوالی پالس‌ها و درصد پالس روی پالس کم به دلیل پدیده چند مسیری، احتمال درصد همزمانی بالا وجود ندارد. با پدیده چند مسیری در تداخل با پالس‌های یک خوشه مشکل خاصی وجود ندارد و معمولاً سیگنال با دامنه بزرگ‌تر موردقبول است [۲۵]؛ ولی همزمانی ناشی از پدیده چند مسیری، بین دودسته پالس یک رادار چندحالتی نیز ممکن است رخ دهد. در شکل (۱۲) این حالت نمایش داده شده است.

- همزمانی به عنوان معیار تشابه

وقتی همزمانی بین رشته پالس‌ها خیلی بالا باشد، بالطبع پالس‌های دریافتی مربوط به یک رادار چندحالتی نیستند. مطابق



شکل (۱۷). نمودار تغییرات عرض پالس در یک خوشه

جدول (۱). واریانس عرض پالس در دو خوشه

v (PW1)	V(PW2)
۰/۱۱۳۰	۰/۱۱۹۱

تشابه تقریبی مقدار واریانس تا دو رقم اعشار نمایانگر تشابه در مقدار تغییرات اعمال شده به عرض پالس در دو خوشه مجزا است. در نتیجه این دو رشته پالس می‌توانند به هم مرتبط بوده و مربوط به یک منبع انتشاری باشند. امتیاز تشابه برای تغییرات عرض پالس برابر است با:

$$\alpha_1 = \frac{4p1}{p1}, \quad \alpha_2 = \frac{4p2}{p2}, \quad s = 1 - \frac{|\alpha_1 - \alpha_2|}{\sqrt{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)}} \quad (6)$$

در این فرمول مقدار $4p$ برابر با مقدار واریانس در عرض پالس‌های متغیر دو رشته پالس است که برای عرض پالس ثابت نیز صدق می‌کند.

۳-۳-۲- مقدار عرض پالس

اگر دو نوع مدولاسیون داخلی مربوط به یک رادار باشد، با توجه به ملاحظات توان و انرژی برگشتی از هدف و حداکثر برد بدون ابهام، انتظار می‌رود پهنای باند ویدئو تقریباً یکسان باشد.

$$\Delta T = |\overline{T_a} - \overline{T_b}| \quad (7)$$

می‌توان امتیاز تشابه را به صورت رابطه (۸) نوشت.

$$S = 1 - (\Delta T / \max(\overline{T_a}, \overline{T_b})) \quad (8)$$

در این فرمول مقدار ΔT که برحسب واحد میکروثانیه لحاظ می‌شود، برابر است با مقدار اختلاف بین میانگین عرض پالس‌ها در دو رشته پالس که برای عرض پالس متغیر و ثابت نیز صدق می‌کند. امتیاز حاصل در صورت برقراری شرط، عددی بین صفر و یک خواهد شد.

پس از تبدیل دامنه‌ها به یک و صفر منطقی، می‌توان سطح زیر منحنی حاصل and منطقی بین دو رشته پالس در دو PDW را بر سطح زیر منحنی یکی از آن‌ها تقسیم نموده و امتیاز تشابه در عدم هم‌زمانی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$s = 1 - \frac{(\int_{t1}^{t2} (v_a \wedge v_b) dt)}{(\int_{t1}^{t2} v_a dt)} \quad (5)$$

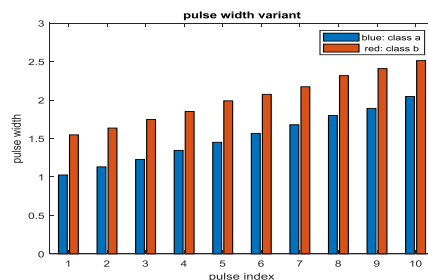
در صورت عدم هم‌زمانی انتظار می‌رود که امتیاز تشابه تقریباً برابر یک شود. برای دو رادار با زمان‌های دریافت متفاوت که هیچ‌گونه هم‌پوشانی در پنجره زمانی انتخابی بین t_1 تا t_2 ندارند، امتیاز عدم هم‌زمانی دلیلی بر چندحالتی بودن رادار نبوده و در این موارد امتیاز عدم هم‌زمانی صفر لحاظ می‌گردد.

۳-۳- پارامترهای شکل پالس

به‌منظور توصیف شکل پالس، راحت‌تر این است که از توصیف‌کننده‌های حوزه زمانی که به راحتی اندازه‌گیری می‌شوند و می‌توانند به عملکرد رادار مرتبط باشند، استفاده شود. انتخاب‌های معمول، عرض پالس، زمان‌های صعود و فرود و تغییرات عمودی یا غیرعمودی در عرض پالس (حتی دامنه پالس) هستند [۱]. همچنین این اندازه‌گیری‌ها شامل تغییرات این مقادیر (به‌عنوان مثال بی‌ثباتی عرض پالس) هم می‌شوند [۲۵].

۳-۳-۱- واریانس عرض پالس

با فرض تغییرات عمودی یا غیرعمودی عرض پالس می‌توان برحسب احتمال انتظار داشت که واریانس این تغییرات در دو خوشه تقریباً در یک محدوده باشد. می‌توان با بررسی واریانس عرض پالس، شباهت بین خوشه‌ها را تشخیص داد. در تغییرات غیرعمودی فرض می‌شود که این مقادیر برای هر دو حالت در یک محدوده بوده و در تغییرات عمودی نیز به دلیل مسائل آشکارسازی، تغییرات زیادی نمی‌تواند اعمال شود. شاید حداکثر تغییرات به صورت درصدی از عرض پالس به صورت لغزشی باشد. با شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی یک نمونه رادار چندحالتی مقادیر خروجی به صورت شکل (۱۶) به دست آمده که در آن عرض پالس به صورت خطی مطابق شکل (۱۷) در حال افزایش است.



شکل (۱۶). نمودار میله‌ای مقدار عرض پالس متغیر در یک خوشه (رشته پالس‌های هم‌رنگ حاصل تفکیک زاویه و نوع مدولاسیون a و b هستند).

۳-۴- بررسی تغییرات فرکانسی

در رادار پرش فرکانسی صرف‌نظر از نوع مدولاسیون داخلی، فرکانس RF به‌صورت پالس به پالس یا دسته پالس تغییر می‌کند. به‌طور معمول در یک رادار دارای تغییر فرکانس، مقدار پرش فرکانس یا دیگر انواع آن در یک بازه محدود تغییر می‌کند و تغییرات زیادی ندارد. جدول (۲) از مرجع [۱] به‌عنوان نمونه نشان داده شده است:

جدول (۲). پارامترهای متغیر راداری و محدوده تغییرات فرکانس

در RF چند رادار مربوط به مرجع [۲۶]

Radar label	RF / MHz	PW / μ s
1	3165-3410 (agile)	8.36-12.68
2	2950-3175 (agile)	10.75-16.24
3	3450-3710 (agile)	16.63-20.42
4	2945-3195 (agile)	19.30-23.66

برای یک رادار پرش فرکانسی، طیف سیگنال در یک بازه محدود گسترده شده، در حالی که برای چند رادار در فرکانس‌های مختلف، مقادیر فرکانس‌ها در طیف سیگنال گسترده شده و تغییر زیادی خواهد داشت. این نکته می‌تواند وجه تمایز بین یک رادار پرش فرکانسی با چند رادار مجزا در کنار دیگر معیارهای تشابه باشد. تغییر فرکانسی به‌صورت پرش فرکانسی با مدولاسیون درونی LFM نیز سازگار بوده و در هر فرکانس مرکزی ناشی از پرش فرکانس، فرکانس آن در طول پالس در یک محدوده کم به‌صورت خطی تغییر می‌کند.

۳-۴-۱- معیار شباهت در نزدیکی فرکانس

تشابه فرکانسی بین دو رادار می‌تواند معیار مهمی جهت تشخیص شباهت دو رشته پالس تفکیک شده باشد. از طرفی رادارهای پیشرفته معمولاً دارای پرش فرکانسی یا روش‌های دیگر تغییر فرکانس هستند. اگر تغییر فرکانس RF در میانگین رشته پالس‌های دو خوشه زیاد بوده و در حد چند گیگاهرتز باشد، به‌احتمال زیاد مربوط به چند رادار مجزا بوده و در غیر این صورت مربوط به یک رادار پرش فرکانسی است. با استفاده از فرمول (۹) هرچه فرکانس‌های دو رشته پالس به هم نزدیک‌تر باشند، نمره شباهت بیشتر می‌شود. این فرمول به نحوی انتخاب شده که هرچه مقدار اختلاف فرکانس‌ها نسبت به مقدار میانگین آن‌ها کمتر باشد، نمره تشابه بیشتر خواهد شد.

$$S = \frac{2 \times f_{min}}{f_{max} \times |f_2 - f_1| + (f_1 + f_2)} \quad (9)$$

جدول (۳). امتیاز تشابه در معیار نزدیکی فرکانس

f1	f2	S
۲۰	۳۰	۰/۱۱
۱۵	۲۰	۰/۲۲
۲	۴	۰/۳۳
۲	۳	۰/۴۸
۸	۱۰	۰/۵۳
۴	۵	۰/۵۷
۹	۱۰	۰/۶۲
۱۴	۱۴/۵	۰/۷۷
۱۴	۱۴/۲	۰/۹۰

۳-۴-۲- انحراف معیار فرکانس

به دلیل ساختار ذاتی تجهیزات فرستنده، به‌خصوص لامپ‌های فرستنده و تقویت‌کننده مایکروویو، تغییرات جزئی یا انحراف فرکانس RF در طول ارسال یک یا چند پالس به دلایل مختلف وجود دارد. بررسی مقدار تغییرات برای دو رشته پالس حتی در حالت پرش فرکانس نیز می‌تواند مشخصه‌ای از یکسان بودن فرستنده دو پالس یا رشته پالس باشد. برای مدولاسیون‌های داخلی به‌غیر از LFM مقدار انحراف معیار فرکانس در طول پالس و میانگین آن برای دو رشته پالس قابل‌محاسبه است. برای LFM که فرکانس به‌صورت عمدی در طول پالس تغییر می‌کند، مقدار انحراف نصف محدوده پهنای باند LFM خواهد بود.

- محاسبه مقدار تشابه حاصل از انحراف معیار:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta f_1}{f_1}, \alpha_2 = \frac{\Delta f_2}{f_2} \quad (10)$$

$$S = 1 - \frac{|\alpha_1 - \alpha_2|}{\sqrt{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)}}$$

در این فرمول مقدار Δf برابر با مقدار واریانس فرکانس‌های دو رشته پالس است. اگر نسبت انحراف معیار به فرکانس مرکزی در هر دو خوشه نزدیک باشد، مقدار شباهت تقریباً برابر یک خواهد شد. در داده فعلی رادارها بدون پرش فرکانس بوده و برای استفاده از فرمول مشابه برای یک رادار چندحالتی پرش فرکانسی باید از روش زیر استفاده کرد:

الف) خوشه بندی برحسب تعداد پرش فرکانس،

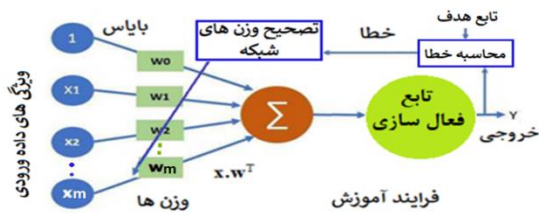
ب) محاسبه انحراف معیار در هر خوشه،

ج) محاسبه میانگین انحراف معیار برای هر رشته پالس

۳-۴- تخمین PRI متوسط

با وجود تغییر مدولاسیون بین پالسی می‌توان بر روی PRI متوسط حساب کرد؛ یعنی در هر رشته پالس مقدار PRI متوسط برای یک بازه مناسب، حساب شده و باهم مقایسه شوند. معمولاً

خطای خروجی و حرکت در جهت بیشترین شیب گرادیان است. شکل (۱۹) ساختار کلی و الگوریتم آموزش را نشان می‌دهد.



شکل (۱۹). معماری و فرآیند آموزش پرسپترون تک لایه

برای تابعی با m ویژگی (x1, x2 ... xm) و n حالت در ورودی که در هر حالت به ازای x(n) مقدار d(n) معین است، می‌توان نوشت:

$$E(w(n)) = \frac{1}{2} e^2(n) \tag{۱۳}$$

با هر داده ورودی آموزشی، وزن‌ها یکبار تصحیح شده و این روند تا رسیدن به خطای مطلوب یا مقدار تکرار موردنظر کاربر، ادامه می‌یابد.

$$e(n) = d(n) - \sigma(\sum_{j=0}^m x_j(n) w_j(n)) \tag{۱۴}$$

$$w(n+1) = w(n) - \eta(\nabla E(n)) \tag{۱۵}$$

$$\nabla E(n) = \frac{\partial E(w(n))}{\partial w(n)} = e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w(n)} = e(n) \sigma'[-x(n)^T] \tag{۱۶}$$

$$w(n+1) = w(n) + \eta e(n) x(n) y(n) [1 - y(n)] \tag{۱۷}$$

شبه کد برنامه: Pseudocode

```

START
Initialization:
set w(0) = 0, Set desire response in d
input example:
(vector x(n) and desired d(n))
PROGRAM whileLoop until e < ε
Set e = 0;
PROGRAM for Loop
Compute actual response of perceptron:
y(n) = sgn[x(n) w^T(n)]
Adapt weight vector:
w(n+1) = w(n) + η[d(n)-y(n)]x(n)y(n)[1- y(n)]
comput e: e = e + 1/2 Σi (yi - di)²
    
```

PRI متوسط به‌سادگی با اندازه‌گیری زمان بین اولین (t0) و آخرین پالس (tN) و تقسیم آن بر تعداد بازه‌های پالس تخمین زده می‌شود:

$$\overline{PRI} = \frac{t_N - t_0}{N} \tag{۱۱}$$

این کار را می‌توان به کمک یک شمارنده در حالت متوسط گیری دوره تناوب انجام داد. امتیاز تشابه برابر است با:

$$S = 1 - (\Delta \overline{PRI} / \max(\overline{PRI}_a, \overline{PRI}_b)) \tag{۱۲}$$

۴- آموزش شبکه عصبی با سناریوی واقعی

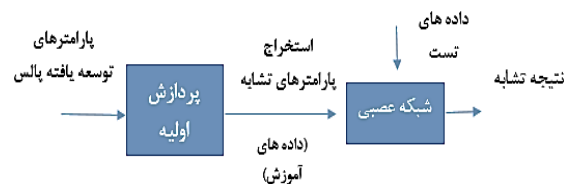
در این تحقیق داده‌های آموزش بر اساس داده‌های واقعی که از جدول داده‌های یک سیستم شنود دریافت شده ساخته شد. در این سناریو معیارهای شباهت بین ۱۰ رادار متفاوت محاسبه و داده‌های رادارهای متفاوت در جدول آموزش با برچسب صفر ثبت گردید. همچنین داده‌های مربوط به رادارهای چندحالتی به دلیل وجود محدودیت در دسترسی به داده‌های سیستم واقعی از روی داده‌های رادارهای واقعی تک‌حالتی، شبیه‌سازی گردید. معیارهای شباهت برای رادارهای چندحالتی نیز محاسبه و داده این رادارها در جدول آموزش با برچسب ۱ ثبت شد.

داده‌های در دسترس، شامل اطلاعات تفکیک شده از رادارها برحسب نوع مدولاسیون بوده و فرض شده که جهت دریافت یکسان دارند. کلمات PDW این داده‌ها شامل زمان ورود، دامنه دریافت، فرکانس و عرض پالس است. مقادیر به‌دست آمده بر این اساس به‌عنوان داده‌های با ناظر محسوب می‌گ

ردند. سپس با آموزش یک شبکه عصبی برای شرایط جدید تصمیم‌گیری خواهد شد. این جدول در پیوست الف نمایش داده شده است.

- شبیه‌سازی با استفاده از یک شبکه عصبی پیش رو

شبکه‌های عصبی می‌توانند پس از یادگیری یک سیستم با ناظر و تصحیح وزن‌ها به‌عنوان یک طبقه بند مناسب برای شرایط جدید ورودی تصمیم‌گیری نمایند. شکل (۱۸) روش کلی به‌کاربرده شده در این مقاله را نشان می‌دهد:



شکل (۱۸). روش کلی به‌کاربرده شده در مقاله

الگوریتم یادگیری و اصلاح وزن‌ها بر اساس کمینه کردن

است. این روش شامل پردازش تکمیلی بررسی رشته پالس‌های تفکیک‌شده و استخراج معیارهای تشابه است. در این روش ویژگی‌های متمایزکننده هر رادار استخراج شده و معیارهای تشابه از هر ویژگی برای بررسی شباهت بین دو رشته پالس محاسبه می‌گردد. هر یک از معیارها به‌تنهایی شامل عدم قطعیت بوده و نمرات تشابه به‌صورت فازی لحاظ می‌گردد. برای این کار ابتدا جدول داده از پارامترهای تفکیک‌شده رادارهای واقعی حاصل از یک سیستم شنود استخراج می‌گردد. این جدول شامل معیارهای تشابهی است که با توجه به نوع داده‌ها از ویژگی‌های متمایزکننده رادارها به‌دست‌آمده است. با توجه به عدم قطعیت تصمیم‌گیری در هر یک از معیارها، از شبکه عصبی برای تصمیم‌گیری استفاده شده است. پس از آموزش شبکه عصبی با داده‌های با برچسب برای شرایط جدید خود شبکه تصمیم‌گیری می‌کند. برای تست شبکه ۲۰ درصد از جدول داده به‌عنوان داده تست به شبکه اعمال و پاسخ نهایی ۱۰۰ درصد درست ارزیابی شده است. البته در یک محیط عملیاتی متراکم راداری با پالس‌های درهم‌رفته انتظار می‌رود دقت تشخیص کاهش یابد که در تحقیقات آتی به آن پرداخته می‌شود. نوآوری این مقاله استخراج ویژگی‌های متمایزکننده و ایده معیارهای تشابه برای تشخیص رادارهای چندحالتی است.

۶- مراجع

- [1] J. Dudeczyk, "Radar Emission Sources Identification Based on Hierarchical Agglomerative Clustering for Large Data Sets," *Journal of Sensors*, vol. 2016, pp. 1879327, 2016.
- [2] M. A. M. j. Ghalandari, E. Morady, "Nearest neighbor method with priority selection of denser clusters by analysis of similarity matrix for radar pulse clustering," *Marine Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 13-24, 2016. (in Persian)
- [3] K. Gençol, A. Kara, and N. At, "Improvements on deinterleaving of radar pulses in dynamically varying signal environments," *Digital Signal Processing*, vol. 69, pp. 86-93, 2017.
- [4] N. G. a. P. S. Vimala, "Generation and Deinterleaving of Radar Signals in Electronic Warfare Environment using SDIF Histogram Algorithm," *International Journal of Scientific Research and Reviews*, vol. 7, pp. 10, 2018.
- [5] F. Paisana, N. J. Kaminski, N. Marchetti, & L. A. DaSilva, "Signal Processing for Temporal Spectrum Sharing in a Multi-Radar Environment," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 3, no. 2, pp. 123-137, 2017.
- [6] E. Norgren, "Pulse repetition interval modulation classification using machine learning," 2019.

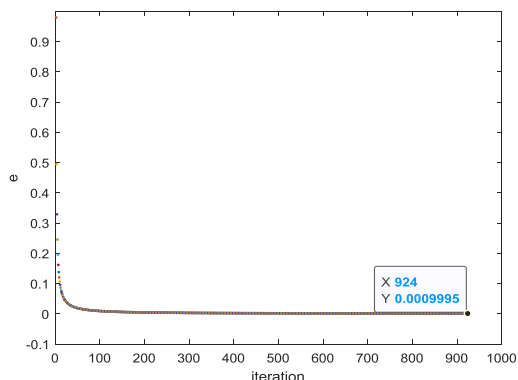
END for
END while
END

۵- آموزش جدول شباهت به یک شبکه عصبی

شبکه عصبی با جدولی که بر مبنای ویژگی‌های قابل‌استخراج از داده‌های تفکیک‌شده یک سیستم شنود به‌دست‌آمده است، آموزش داده می‌شود. این جدول در پیوست الف نمایش داده شده است. پس از آموزش شبکه عصبی، تصحیح وزن‌های شبکه و یادگیری روابط غیرخطی حاکم بر جدول داده‌ها، خود شبکه برای ورودی جدید تصمیم خواهد گرفت. در حقیقت این کار نوعی طبقه‌بندی با ناظر داده‌های ورودی است.

تست شبکه پس از آموزش

سپس بردار ورودی تکمیل شده در بخش ۳، شامل ۸ معیار تشابه و ۹۵ حالت ورودی به شبکه اعمال می‌گردد. بردار معیارهای تشابه از ۶ ویژگی استخراج‌شده از پالس‌های راداری به دست آمده است. شرایط ورودی ۵ رادار چندحالتی و ۱۰ رادار مجزا را شبیه‌سازی می‌کنند. در فرآیند آموزش، ۸۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده آموزش و ۲۰ درصد به‌عنوان داده تست در نظر گرفته شده و عملکرد شبکه عصبی به کمک آن سنجیده می‌شود. شکل (۲۰) شیب کاهشی منحنی خطا را با تکرار آموزش نشان می‌دهد. این خطا، اختلاف خروجی شبکه با مقدار مطلوب برای هر حالت ورودی است. پس از آموزش، شبکه با داده‌های تست بررسی و خروجی با مقدار مطلوب مقایسه شده است. به ازای ۱۰۰ درصد داده‌های تست، پاسخ شبکه درست ارزیابی شده است.



شکل (۲۰). شیب کاهشی منحنی خطای تعریف‌شده با تکرار آموزش

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک چارچوب مناسب برای تشخیص رادارهای چندحالتی از میان چند رادار با ویژگی‌های متفاوت پیشنهاد شده

- [17] G. Revillon, A. Mohammad-Djafari, & C. Enderli, "Radar emitters classification and clustering with a scale mixture of normal distributions," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 1, pp. 128-138, 2018.
- [18] Z. Wu, Z. Yang, H. Sun, Z. Yin, & A. Nallanathan, "Hybrid radar emitter recognition based on rough k-means classifier and SVM," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2012, no. 1, pp. 1-9, 2012.
- [19] G. Zhang, "Intra-pulse modulation recognition of advanced radar emitter signals using intelligent recognition method." pp. 707-712, 2006.
- [20] Q. Guo, P. Nan, & J. Wan, "Signal classification method based on data mining for multi-mode radar," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 1010-1017, 2016.
- [21] J. Wan, P. Nan, Q. Guo, & Q. Wang, "Multi-mode radar signal sorting by means of spatial data mining," *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, no. 5, pp. 725-734, 2016.
- [22] S. Q. Wang, J. Bai, X. Y. Huang, C. Y. Gao, & P. F. Wan, "Analysis of radar emitter signal sorting and recognition model structure," *Procedia Computer Science*, vol. 154, pp. 500-503, 2019.
- [23] G. Revillon, "Uncertainty in radar emitter classification and clustering," 2019.
- [24] Q. Guo, L. Teng, L. Qi, X. Ji, & J. Xiang, "A Novel Radar Signals Sorting Method-Based Trajectory Features," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171235-171245, 2019.
- [25] R. Wiley, *ELINT: The interception and analysis of radar signals*: Artech, 2006.
- [26] M. Li, M. He, J. Han, & Y. Tang, "A new clustering and sorting algorithm for radar emitter signals." p. 012009, 2020.
- [7] Y. Liu, & Q. Zhang, "Improved method for deinterleaving radar signals and estimating PRI values," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 5, pp. 506-514, 2018.
- [8] A.-L. He, D.-G. Zeng, J. Wang, & B. Tang, "Multi-parameter signal sorting algorithm based on dynamic distance clustering," *Journal of Electronic Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 249-253, 2009.
- [9] Z.-M. Liu, & S. Y. Philip, "Classification, denoising, and deinterleaving of pulse streams with recurrent neural networks," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 1624-1639, 2018.
- [10] S. Wei, Q. Qu, H. Su, J. Shi, X. Zeng, & X. Hao, "Intra-pulse modulation radar signal recognition based on Squeeze-and-Excitation networks," *Signal, Image and Video Processing*, pp. 1-9, 2020.
- [11] Y. Huang, W. Jin, B. Li, P. Ge, & Y. Wu, "Automatic modulation recognition of radar signals based on manhattan distance-based features," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 41193-41204, 2019.
- [12] X. Liao, B. Li, & B. Yang, "A Novel Classification and Identification Scheme of Emitter Signals Based on Ward's Clustering and Probabilistic Neural Networks with Correlation Analysis," *Computational intelligence and neuroscience*, vol. 2018, 2018.
- [13] T. R. Kishore, & K. D. Rao, "Automatic intrapulse modulation classification of advanced LPI radar waveforms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 2, pp. 901-914, 2017.
- [14] S. Dai, W. Lei, Y. Cheng, & D. Wang, "Clustering of DOA data in radar pulse based on SOFM and CDW," *Journal of Electronics (China)*, vol. 31, no. 2, pp. 107-114, 2014.
- [15] Y. Sun, J. Li, F. Lin, & G. Pan, "Automatic Signal Modulation Recognition based on Deep Convolutional Neural Network." pp. 550-554, 2021.
- [16] R. A. S. P. Bayat, M. M. Nayebi, "The Deinterleaving of Radar Pulses in Interception systems," *Toosi University of Technology*, 2010. (in Persian)