

تخمین زاویه دید و تعیین کلاس یک هدف دریایی با استفاده از

تقریب مستطیلی

علی محمد دهقانی*^۱ و سیدمحمد علوی^۲

۱- استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام) - دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خامنه‌ای (مدظله العالی)

۲- گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران

چکیده:

موضوع دسته‌بندی اهداف در رادارهای نظامی یکی از مباحث مهم موجود در این سیستم‌ها می‌باشد. در این مقاله در ابتدا الگویی با عنوان تقریب مستطیلی معرفی شده است. در این الگو شکل فیزیکی هر شناور با یک مستطیل با ابعاد متناسب تقریب زده می‌شود. هر سلول فاصله با توجه به طول موج ارسالی رادار و قدرت تفکیک‌پذیری آن معین می‌شود. سپس یک فرآیند مشخص با استفاده از شمارش تعداد سلول‌های فاصله در جهت تابش شده به سمت یک هدف دریایی معین توسط دو رادار با قدرت تفکیک بالا ارائه می‌شود. طول مؤثر مقابل رادار، تعیین‌کننده تعداد سلول‌های فاصله در این راستا می‌باشد. با این روش امکان تخمین زاویه تابشی رادار به سمت هدف مهیا می‌شود و در نهایت کلاس هدف از نظر اندازه فیزیکی آن معین می‌گردد. نتیجه این مقاله، معین شدن زاویه دید رادار نسبت به شناور هدف را به همراه خواهد داشت. بدین معنا که در هر لحظه رادار از کدام جهت به شناور موردنظر تابش می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

رادار، قدرت تفکیک بالا، تخمین زاویه دید، تقریب مستطیلی

Estimating the angle of view and determining the class of a marine target using the rectangular approximation

Ali mohammad Dehghani*¹, Seyed mohammad Alavi²

^{1,2} Imam Hossein University

Abstract

Target classification in military radars is one of the most important issues in these systems. In this article, a model called rectangular approximation is introduced at the beginning. In this model, the physical shape of each float is approximated by a rectangle with proportional dimensions. Each range cell is determined according to the radar's transmitted wavelength and its resolution. Then, a specific process is provided by counting the number of range cells in the direction radiated to a given sea target by two high-resolution radars. In front of the radar, it determines the number of distance cells in this direction. With this method, it is possible to estimate the radiation angle of the radar towards the target and finally the class of the target is determined in terms of its physical size. The result of this article will determine the angle of view of the radar relative to the target vessel. It means which direction the radar is radiating to the target vessel at any moment.

Keywords:

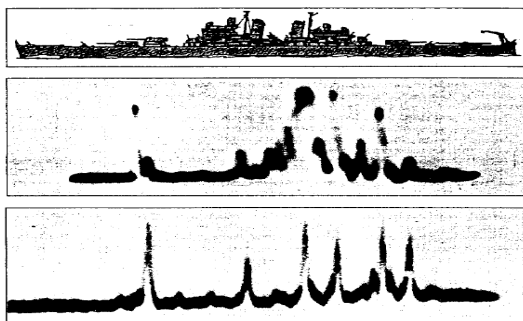
radar, High resolution, Estimating the angle of view, determining the class of a naval target, rectangular approximation

۱- مقدمه

موضوع دسته‌بندی اهداف در رادارهای نظامی یکی از مباحث مهم موجود در این سیستم‌ها می‌باشد. در رادارهای با پهنای پالس معمولی که ابعاد پالس در حدود ابعاد هدف یا حتی بیشتر از آن می‌باشد، تحقق این امر دشوار و حتی در برخی موارد غیرممکن است. برای انجام یک دسته‌بندی خوب در اهداف راداری باید از رادارهای با قدرت تفکیک بالا استفاده کرد. در رادارهای با قدرت تفکیک بالا با استفاده از نمایه‌ی برد به‌دست‌آمده، اقدام به دسته‌بندی اهداف می‌نمایند. یک رادار با داشتن قابلیت تفکیک‌پذیری به‌اندازه کافی بالا می‌تواند، تنها در یک بعد (در راستای برد) از هدف، سیگنال دریافت نماید. در این رادارها بجای تشکیل یک لکه به‌عنوان هدف، مراکز بازتابش مجزا در هدف، هرکدام جداگانه در سیگنال برگشتی اثر گذاشته و نهایتاً یک نمایه‌ی برد را ایجاد خواهند نمود. [۱]

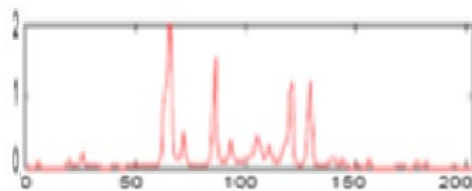
توجه اصلی بر این نکته است که در رادارهای با قدرت تفکیک بالا، تنها تفکیک‌پذیری در برد یا فاصله وجود دارد و تفکیک‌پذیری در سمت ممکن نیست. با استفاده از تفکیک‌پذیری در برد، می‌توان طول مؤثر هدف (طولی که در مقابل رادار قرار گرفته است) را دریافت کرد؛ اما قطعاً برخی از قسمت‌های هدف ممکن است در پشت برخی دیگر قرار گرفته و پوشیده شوند و بدین ترتیب از دید رادار مخفی بمانند. به هر ترتیب در رادار با قدرت تفکیک بالا، آشکارسازی یک نمایه‌ی برد انجام می‌پذیرد. با آنکه با گرفتن یک نمایه‌ی برد از هدف، امکان دسته‌بندی اهداف در رده‌های مختلف سخت هست، اما امکان دسته‌بندی در کلاس‌های ساده‌تر وجود دارد. در برخی مواقع به این نوع از دسته‌بندی‌ها، دسته‌بندی ادراکی نیز گفته می‌شود.

به‌عنوان نمونه در شکل (۱) یک نمایه برد آشکار شده توسط یک رادار HRR از یک کشتی بزرگ دریایی در یک زاویه دید خاص آورده شده است. [۲]



شکل ۱- نمایه برد یک کشتی بزرگ بر اثر تابش HRR [۱]

شکل (۲) نیز نمونه نمایه‌ی برد آشکار شده در یک رادار با قدرت تفکیک بالا از یک هدف هوایی در یک زاویه دید خاص است.



شکل ۲- نمونه نمایه برد از یک هدف هوایی

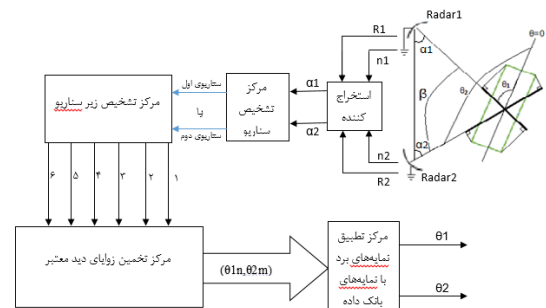
روش کار بدین‌صورت می‌باشد که در ابتدا یک بانک داده از نمایه‌ی برد مربوط به اهداف موردنظر ایجاد کرده و سپس با در نظر گرفتن نمایه‌ی برد دریافتی از هدف روبرو و مقایسه آن با بانک داده‌ی ایجادشده اقدام به تعیین کلاس هدف می‌شود. نکته مهم در خصوص تشکیل بانک داده این است که هرچه تعداد عناصر این بانک زیادتر باشد، کارایی و کیفیت دسته‌بندی بیشتر خواهد شد، اما سرعت انجام کار نزول خواهد کرد و در مقابل هرچه تعداد عناصر این بانک داده کمتر باشد، رسیدن به نتیجه سریع‌تر ولی با کیفیت پایین‌تر انجام می‌پذیرد. [3]

روند کار تشکیل بانک داده و تعیین کلاس هدف، بدین‌صورت می‌باشد که نقطه تمایز اهداف با یکدیگر در ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها در نمایه‌ی برد مربوط به هرکدام از اهداف می‌باشد. بدین معنا که هر هدفی دارای یک سری ویژگی‌های منحصربه‌فرد می‌باشد که با مقایسه نمایه‌ی حاصل از برگشتی هدف با بانک داده‌ی تشکیل‌شده، این ویژگی‌ها تشخیص داده‌شده و بدین ترتیب کلاس هدف معین می‌شود. به فضای به وجود آمده‌ی حاصل از این ویژگی‌ها، فضای ویژگی می‌گویند، به‌صورتی که هر ویژگی به یک هدف خاص مرتبط می‌شود. [۳]

۲- معرفی الگوریتم تقریب مستطیلی

دسته‌بندی اهداف یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که در سیستم‌های راداری مطرح می‌باشد. رادارهای با قدرت تفکیک بالا از جمله رادارهایی هستند که این امکان را مهیا می‌سازند. در این تحقیق یک روش جدید مبتنی بر اندازه‌گیری تعداد سلول‌های فاصله موجود در نمایه‌های برد آشکار شده از دو جهت متفاوت، توسط دو رادار با قدرت تفکیک بالایی مشابه معرفی می‌شود. در ضمن امکان تخمین زاویه‌ی دید هدف از منظرهای متفاوت را نیز مهیا می‌سازد. [۳]

فلوچارت مربوط به الگوریتم، در شکل (۳) نمایش داده شده که در بخش‌های بعدی مقاله نحوه عملکرد آن به صورت مشروح آورده شده است.

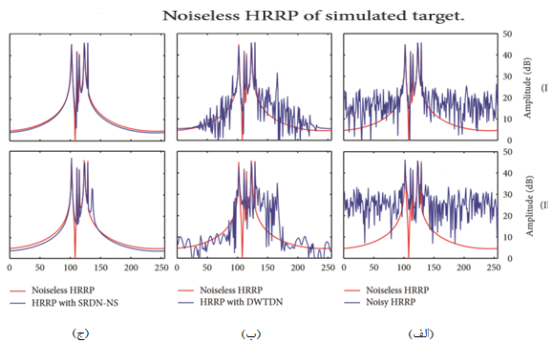
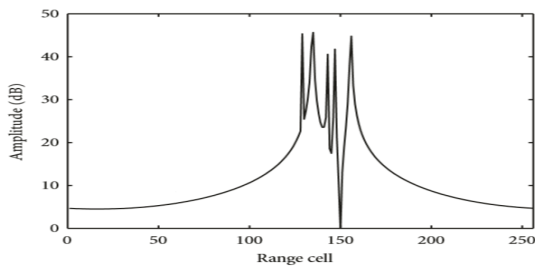


شکل ۳- بلوک دیاگرام نحوه عملکرد الگوریتم و تخمین زاویه دید هدف

۳- آشکارسازی نمایه‌ی برد

در ابتدا ذکر این نکته مهم است که قبل از پرداختن به مبحث دسته‌بندی اهداف، چگونگی آشکارسازی نمایه‌های برد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حذف نویز از نمایه‌ی برد دریافتی وجود دارد که از جمله می‌توان به تحقیق [۴] اشاره کرد. این تحقیق، یک روش حذف نویز جدید بر اساس نمایش قله‌های مهم و با توجه به این نکته که منظور از نویز، نویز سفید گوسی جمع شونده می‌باشد، ارائه می‌دهد. سیگنال برگشتی از هدف به صورت تنک (فقط قله‌های مهم) در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین مسئله حذف نویز به عنوان یک مدل نمایش تنک توصیف می‌شود. سطح نویز برگشتی (که کارایی حذف نویز را سخت می‌کند و اغلب ناشناخته است) با روش زیر فضا، بر روی ماتریس همبستگی عناصر زیرفضا تخمین زده می‌شود. منظور از عناصر زیرفضا، همان شکستن فضای ویژگی بر اساس پایه‌های متعامد می‌باشد. پنجره عناصر زیر فضا، تخمین

سطح نویز را با استفاده از تنها یک جمله مشاهده شده پردازش می‌کند. این امر نه تنها بازده تخمین را گارانتی می‌کند، بلکه از حساسیت شیفت زمانی نمایه‌ها نیز اجتناب می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را در برگشتی افزایش داده و یک نمایه با کیفیت بالاتر را به دست آورد. شکل (۴) بیانگر مطالب بیان شده در بالا می‌باشد.



شکل ۴- نمایه‌ی برد اصلی و چگونگی حذف نویز از آن [۵]

در شکل (۴-الف) شکل موج بدون نویز و نویزی شده در دو حالت با نویزهای با قدرت تفکیک متفاوت به نمایش گذاشته شده است. در شکل (۴-ب) دو شکل موجود نتیجه حذف نویز توسط روش DWTDN را نشان می‌دهد و در نهایت شکل (۴-ج)، دو شکل موجود نتیجه حذف نویز توسط روش SRDN را نشان می‌دهد.

۴- تشکیل فضای ویژگی

یکی از موارد بسیار مهم در خصوص دسته‌بندی اهداف در رادارهای با قدرت تفکیک بالا که می‌تواند به شدت به مسئله دسته‌بندی اهداف کمک نماید، بحث تخمین زاویه‌ی دید هدف می‌باشد. در روش پیشنهادی در این تحقیق، استفاده از دو رادار مشابه با قدرت تفکیک بالا مدنظر می‌باشد. قبل از بحث در این مورد، موارد مربوط به هدف، تقریب شکلی و روابط حاکم بر آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

در این تحقیق به صورت ویژه به بحث بر روی اهداف دریایی و شناورها پرداخته شده است. اساس تحقیق بر روی جداسازی و دسته‌بندی پنج نوع از اهداف دریایی با استفاده از نمایه‌های برد دریافتی از دو رادار با قدرت

$$n = \frac{d}{l} \quad (4)$$

که در اینجا d اندازه قطر هدف می باشد. حال می توان در تمام حالت های موجود بین رادار و هدف، تعداد سلول های فاصله موجود در نمایه برد آشکار شده را محاسبه کرد و در قالب جدول (۱) بیان نمود:

جدول ۱- ارتباط بین محدوده زاویه دید با تعداد سلول های فاصله

محدوده θ	تعداد سلول های فاصله
$0 \leq \theta \leq \pi/2$	$n(\theta) = \frac{2d \cos(\varphi - \theta)}{c\tau}$
$=\pi/2 + \alpha$ & θ $0 \leq \alpha \leq \pi/2$	$n(\theta) = n(\frac{\pi}{2} - \alpha)$
$=\pi + \alpha$ & θ $0 \leq \alpha \leq \pi/2$	$n(\theta) = n(\alpha)$
$=3\pi/2 + \alpha$ & θ $0 \leq \alpha \leq \pi/2$	$n(\theta) = n(\frac{\pi}{2} - \alpha)$

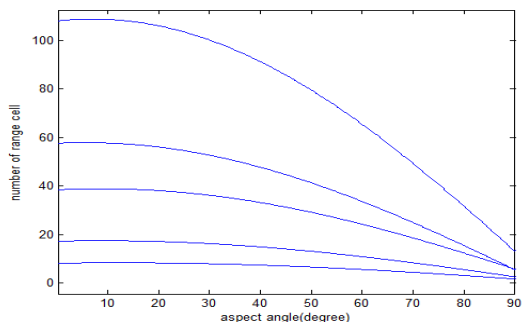
در حالت کلی می توان تعداد سلول های فاصله را به صورت تابعی از زاویه دید، پهنای پالس ارسالی، طول و

$$l = c \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

عرض هدف بیان نمود.

$$n(\theta, \tau, p, q) = \frac{2\sqrt{p^2 + q^2}}{c\tau} \cos(\theta - \tan^{-1} \frac{q}{p}) \quad (5)$$

در این قسمت با توجه به رابطه محاسبه شده می توان فضای ویژگی مربوط به این تقریب را شبیه سازی نمود. نتیجه این شبیه سازی در محدوده زاویه دید بین 0 تا $\pi/2$ به صورت شکل (۷) می باشد.



شکل ۷- فضای ویژگی بر اساس زاویه دید هدف و تعداد سلول های فاصله موجود در نمایه برد

تفکیک بالا مشابه بنا شده است. از این رو با توجه به ابعاد هدف که همان، طول و عرض هدف می باشد، اقدام به این امر صورت گرفته است. در این تحقیق از تقریبی به نام تقریب مستطیلی استفاده می شود، بدین ترتیب که شناور را به شکل تقریبی یک مستطیل در نظر گرفته و با امواج الکترومغناطیسی از این دو رادار با قدرت تفکیک بالا مشابه به آن تابانده می شود و سپس با استفاده از طول نمایه حاصل از این دو بازتابش، به تعیین کلاس هدف پرداخته می شود. می توان با تقریب خوبی هر هدف شناوری را از نظر ابعاد به صورت متقارن در نظر گرفت. حال اگر یک رادار با قدرت تفکیک بالا با یک زاویه دید معین به این هدف بتاباند، یک نمایه برد مجزا با طول معین را ایجاد می نماید. در کل این مقاله، زاویه دید با حرف θ در نظر گرفته شده و در ضمن $\theta=0$ ، به معنای تابش امواج راداری از سمت طول هدف می باشد. همچنین $\theta=\varphi$ به معنای زاویه دید در راستای قطر هدف می باشد. میزان قدرت تفکیک با توجه به پهنای پالس رادار عبارتست از

در این رابطه τ پهنای پالس تابشی به سمت هدف و c سرعت نور می باشد. در این مقاله بنا بر شمارش تعداد سلول ها یا سلول های فاصله موجود در یک نمایه برد می باشد؛ بنابراین اگر زاویه تابش رادار در راستای طول هدف باشد ($\theta=0$)، تعداد سلول های فاصله از رابطه (۲) و (۳) محاسبه می شود:

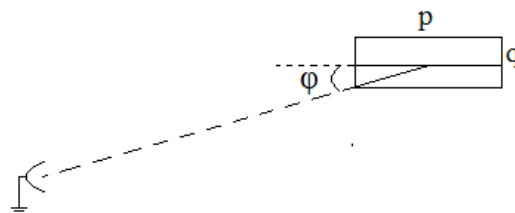


شکل ۵- تابش سیگنال رادار به سمت هدف در راستای طول هدف

$$P = n.l \quad (2)$$

$$n = \frac{2p}{c\tau} \quad (3)$$

که در اینجا p همان طول هدف می باشد.

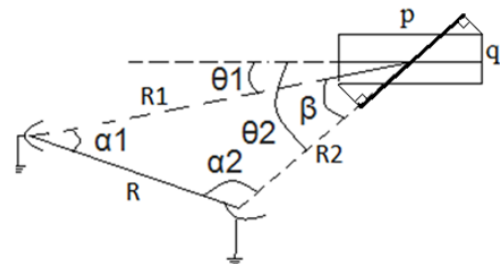


شکل ۶- تابش سیگنال راداری به سمت هدف در راستای قطر هدف

۵- استخراج ویژگی و تعیین زاویه دید احتمالی هدف

پس از تشکیل فضای ویژگی باید از نمایه‌ی برد حاصل از بازتابش هدف، تعداد سلول‌های فاصله موجود را محاسبه کرده و از روی آن زاویه دید مربوط به یک هدف خاص را معین کرد. همان‌گونه که بیان شد تعیین زاویه دید هدف، کاری بسیار مشکل و در حد غیرممکن می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق برای رسیدن به این منظور، از دو رادار مشابه با قدرت تفکیک بالا استفاده شده است. سناریوی موردنظر بدین صورت می‌باشد که این دو رادار در یک فاصله معین از یکدیگر قرار گرفته و با یکدیگر اقدام به تابش به سمت هدف می‌نمایند. هرکدام از این رادارها به صورت جداگانه اقدام به اندازه‌گیری فاصله هدف تا خودشان می‌نمایند. برای این منظور می‌توان دو سناریو در نظر گرفت که هرکدام از این سناریوها به طور جداگانه از قسمت‌های مختلفی تشکیل می‌شوند.

در اینجا و قبل از ورود به حل سناریوهای مختلف، محاسبات اولیه‌ی مربوط به عملکرد همزمان دو رادار انجام می‌گیرد.



شکل ۸- سناریوی اول: هدف در سمت راست یا چپ هر دو رادار قرار دارد

با توجه به شکل (۸) و معادلات مثلثاتی موجود و معلوم بودن مقادیر R ، R_1 و R_2 می‌توان مقادیر α_1 ، α_2 و β را از روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه نمود.

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{R_1^2 + R^2 - R_2^2}{2RR_1} \right) \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{R_2^2 + R^2 - R_1^2}{2RR_2} \right) \quad (7)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{R_1^2 + R_2^2 - R^2}{2R_1R_2} \right) \quad (8)$$

تذکر: قسمت پرننگ در شکل (۶) طول مؤثر نمایه‌ی

برد مربوط به زاویه‌ی دید $\theta = \theta_2$ را نشان می‌دهد.

۵-۱- سناریوی اول

در این سناریو فرض می‌شود که هدف در سمت راست یا سمت چپ هر دو رادار قرار گرفته است. تشخیص این حالت با در نظر گرفتن مقادیر زوایای α_1 و α_2 امکان‌پذیر می‌باشد. شرط وجود سناریوی اول در رابطه (۹) آورده شده است:

$$\alpha_2 > \frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad \alpha_1 \leq \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

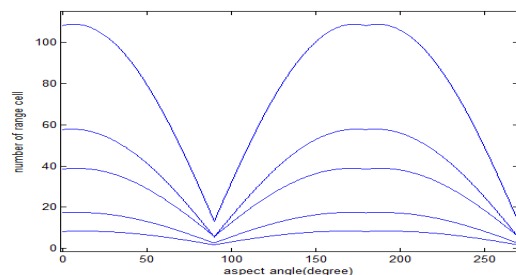
$$\alpha_1 \geq \frac{\pi}{2} \quad \text{و} \quad \alpha_2 < \frac{\pi}{2}$$

برای این‌که تمام حالات مربوط به قرار گرفتن شناور در مقابل رادار شماره‌ی یک، با توجه به فرض متقارن بودن شناور در نظر گرفته شود، محدوده تغییرات احتمالی θ_1 (زاویه‌ی دید هدف از نظر رادار شماره یک) از صفر تا π در نظر گرفته می‌شود. با توجه به محدوده θ_1 می‌توان متوجه شد که محدوده تغییرات θ_2 (زاویه‌ی دید هدف از نظر رادار شماره دو) از صفر تا $3\pi/2$ می‌باشد. همچنین با توجه به محدوده در نظر گرفته شده برای زوایای α_1 و α_2 ، می‌توان اثبات کرد که در این سناریو محدوده تغییرات β از صفر تا $\pi/2$ می‌باشد. یک فرض دیگر نیز در هر دو سناریو وجود دارد که در رابطه (۱۰) آورده شده است:

$$\theta_2 > \theta_1 \quad (10)$$

فرض فوق بدین دلیل می‌باشد که رادار سمت چپ همواره به عنوان رادار شماره یک و رادار سمت راست به عنوان رادار شماره دو در نظر گرفته می‌شود.

اگر فرض شود که شرط سناریوی اول یکی از موارد مربوط به رابطه (۹) محقق شده باشد، فضای ویژگی به صورت شکل (۹) می‌باشد:



شکل ۹- فضای ویژگی مربوط به سناریوی اول تا زاویه ۲۷۰ درجه

$n_2 > n_1$ & $\theta_2 > \theta_1$ تعداد حالات ممکن از ۲۴ به ۱۶ تقلیل می‌یابند. همچنین با اعمال شرط $\beta < 90$ حالات ممکن از ۱۶ به ۸ حالت تقلیل می‌یابند.

با توجه به مطالب بیان‌شده و شرایط موجود در این سناریو، حالات ممکن در این سناریو به صورت رابطه (۱۴) می‌باشند:

$$(14) \quad (\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{13}, \theta_{24}),$$

$(\theta_{13}, \theta_{25}), (\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26})$
در رابطه (۱۴) هر جفت زاویه معرفی شده بدین معنا می‌باشد که زوایای دید هدف از منظر هر دو رادار، می‌تواند یکی از حالات هشت‌گانه فوق باشد؛ بنابراین با انجام عملیات‌های فوق، موفق به استخراج ویژگی‌های ممکن در شناخت هدف شده‌ایم که در گام بعد باید به انتخاب ویژگی بهینه اقدام نمود.

۲-۱-۵- سناریوی اول قسمت دوم

شرایط به وجود آورنده این سناریو به قرار ذیل می‌باشد:

$$(15) \quad n_1 > n_2 > n_0$$

همانند قسمت اول و اعمال شرایط مربوط به سناریوی اول، هشت حالت نهایی ایجاد می‌شوند که در رابطه (۱۶) آورده شده است:

$$(16) \quad (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{13}, \theta_{25}),$$

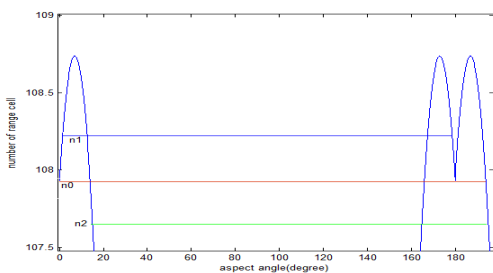
$$(\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{24}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26})$$

به همین ترتیب می‌توان قسمت‌های دیگری در سناریوی اول تعریف کرد که به قرار ذیل می‌باشند.

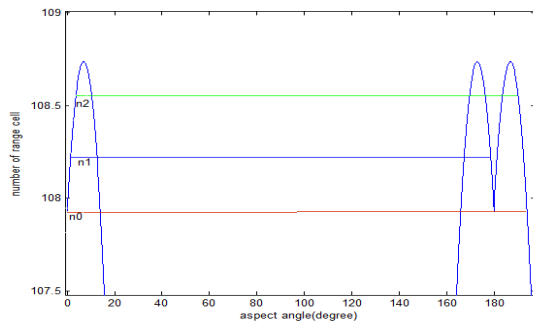
۳-۱-۵- سناریوی اول قسمت سوم

شرایط به وجود آورنده این قسمت به صورت رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$(17) \quad n_1 > n_0 \text{ \& } n_2 < n_0$$



شکل ۱۱- سناریوی اول قسمت سوم: تعداد سلول‌های فاصله مشاهده‌شده از رادار اول بیشتر از n_0 ، اما مشاهده‌شده از رادار دوم کمتر از n_0 می‌باشد.



شکل ۱۰- بزرگ‌شده قله‌های مربوط به قسمت بالای نمودار شکل (۹) در شکل (۱۰) مقدار n_0 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به زاویه دید صفر درجه، یا دید در راستای طول هدف می‌باشد. مقدار n_1 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به نمایه برد آشکارشده در رادار شماره یک و مقدار n_2 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به نمایه برد آشکارشده در رادار شماره دو می‌باشد. سناریوی اول خود به شش قسمت اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از:

۱-۱-۵- سناریوی اول قسمت اول

شرایط به وجود آورنده این قسمت از سناریو به صورت ذیل می‌باشد:

$$(11) \quad n_2 > n_1 > n_0$$

همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود برای هر هدف، ۶ زاویه احتمالی وجود دارد که می‌تواند این تعداد سلول‌های فاصله را در نمایه برد در رادار شماره دو ایجاد نماید. همچنین به دلیل آنکه زاویه دید هدف در رادار شماره یک، از صفر تا ۱۸۰ درجه تعیین شده است، بنابراین چهار زاویه احتمالی وجود دارد که می‌تواند این تعداد سلول‌های فاصله (n_1) را در نمایه برد ایجاد نماید. زوایای دید احتمالی مربوط به رادارهای شماره یک و دو را به ترتیب در روابط (۱۲) و (۱۳) می‌توان در نظر گرفت.

$$(12) \quad \theta_1 \Rightarrow \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}$$

$$(13) \quad \theta_2 \Rightarrow \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{25}, \theta_{26}$$

در روابط فوق پارامترهای θ_{1n} و θ_{2n} ، به ترتیب به معنای n امین برخورد خط n_1 با نمودار ایجاد شده و n امین برخورد خط n_2 با نمودار حاصل می‌باشد.

در کل در این سناریو ۲۴ حالت متفاوت احتمالی وجود دارد که می‌تواند شرایط مربوط به این سناریو را برآورده سازد. با در نظر گرفتن شرط‌های

حالت‌های ممکن برای این سناریو به شش حالت تقلیل می‌یابند که به قرار رابطه (۱۸) می‌باشند.

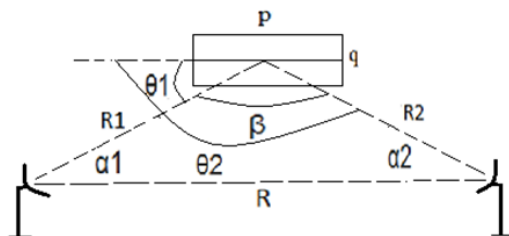
$$(18) \quad (\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{21}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{14}, \theta_{23})$$

همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، در این سناریو چهار زاویه احتمالی برای رادار شماره یک و سه زاویه احتمالی برای رادار شماره دو وجود دارد که در مجموع دوازده حالت ممکن را ایجاد می‌نمایند. با اعمال شرط $\theta_{22} > \theta_{11}$ تعداد حالات ممکن به هشت حالت تقلیل می‌یابد و در نهایت با اعمال شرط $\beta < 90$ ، تعداد

جدول ۲- شرایط و حالات مربوط به سناریوی اول

حالات معتبر	تعداد حالات معتبر	تعداد حالات ممکن	شرایط خاص بر استخراج ویژگی	عنوان سناریو	شرایط اختصاصی	شرایط به وجود آورنده سناریو	تعریف سناریو	شماره سناریو
$(\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{13}, \theta_{25}), (\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26})$	۸	۲۴	$n_1 > n_0$ $n_2 > n_0$ $n_2 > n_1$	قسمت اول	$\theta_{22} > \theta_{11} \text{ \& } 0 < \theta_1 < 180 \text{ \& } 0 < \theta_2 < 270$	$\alpha_1 > 90 \text{ \& } \alpha_2 < 90$ OR $\alpha_1 < 90 \text{ \& } \alpha_2 > 90$	هدف در سمت راست یا چپ هر دو رادار قرار دارد	سناریوی اول
$(\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{13}, \theta_{25}), (\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{24}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26})$	۸	۲۴	$n_1 > n_0$ $n_2 > n_0$ $n_2 < n_1$	قسمت دوم				
$(\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{21}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{14}, \theta_{23})$	۶	۱۲	$n_1 > n_0$ $n_2 < n_0$	قسمت سوم				
$(\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{11}, \theta_{25}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{25}), (\theta_{12}, \theta_{26})$	۷	۱۶	$n_1 < n_0$ $n_2 > n_0$	قسمت چهارم				
$(\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{23})$	۳	۶	$n_1 < n_0$ $n_2 < n_0$ $n_2 < n_1$	قسمت پنجم				
$(\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{23})$	۳	۶	$n_1 < n_0$ $n_2 < n_0$ $n_2 > n_1$	قسمت ششم				

دید از صفر تا ۳۶۰ درجه قابل تغییر خواهد بود. شکل (۱۲) چگونگی این سناریو را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲- سناریوی دوم: هدف در بین دو رادار قرار گرفته است.

شرایط به وجود آورنده سناریوی دوم به قرار رابطه (۱۹) می‌باشد.

$$(19) \quad \alpha_1 < 90 \text{ \& } \alpha_2 < 90$$

با توجه به مطالب بیان‌شده، فضای ویژگی به صورت

شکل (۱۳) می‌باشد:

تمامی حالات موجود برای سناریوی اول را می‌توان به همین ترتیب در نظر گرفت و در قالب جدول (۲) به نمایش درآورد. منظور از θ_{1n} مقدار زاویه‌ای است که از n امین محل برخورد خط $n=n_1$ با فضای ویژگی حاصل می‌شود. به‌عنوان مثال θ_{11} ، اولین محل برخورد خط $n=n_1$ با فضای ویژگی می‌باشد. به همین ترتیب منظور از θ_{2n} مقدار زاویه‌ای است که از n امین محل برخورد خط $n=n_2$ با فضای ویژگی حاصل می‌شود. به‌عنوان مثال θ_{21} ، اولین محل برخورد خط $n=n_2$ با فضای ویژگی می‌باشد.

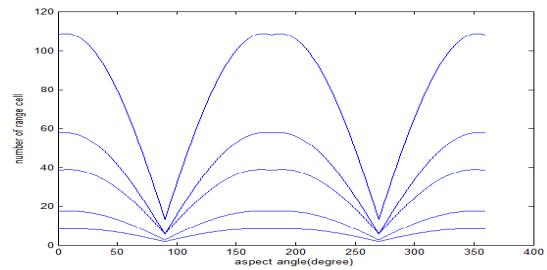
۲-۵- سناریوی دوم

در این سناریو فرض می‌شود که هدف در بین دو رادار قرار گرفته است. از دید رادار یک، زاویه دید هدف از صفر تا ۱۸۰ درجه تغییر می‌کند، اما از دید رادار دوم، زاویه

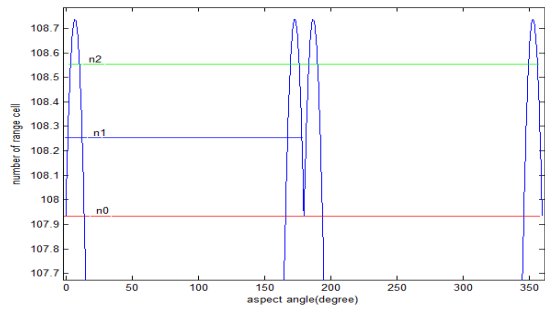
همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در شکل (۱۴) مقدار n_0 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به زاویه دید صفر درجه یا دید در راستای طول هدف می‌باشد. مقدار n_1 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به نمایه برد آشکار شده در رادار شماره یک و مقدار n_2 برابر با تعداد سلول‌های فاصله مربوط به نمایه برد آشکار شده در رادار شماره دو می‌باشد.

سناریوی دوم نیز همانند سناریوی اول به شش قسمت اصلی تقسیم می‌شود. توضیحات سناریوی دوم نیز شبیه به سناریوی اول می‌باشد که تمامی این شش قسمت در قالب جدول (۳) بیان می‌شود.

جدول (۲) و جدول (۳) زوایای دید احتمالی که هدف در دو رادار دیده می‌شود را از فضای ویژگی استخراج کرده تا در مرحله بعد، امکان پردازش و تشخیص کلاس هدف مهیا شود.



شکل ۱۳- فضای ویژگی مربوط به سناریوی دوم تا زاویه ۳۶۰ درجه



شکل ۱۴- بزرگ‌شده قله‌های موجود در قسمت بالای شکل (۱۳)

جدول ۳- شرایط و حالات مربوط به سناریوی دوم

حالات معتبر	تعداد حالات معتبر	تعداد حالات ممکن	شرایط حاکم بر استخراج ویژگی	عنوان زیر سناریو	شرایط اختصاصی ایجاد شده	شرایط به وجود آورنده سناریو	تعریف سناریو	شماره سناریو
$(\theta_{11}, \theta_{21}) \cdot (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{11}, \theta_{25}), (\theta_{11}, \theta_{26}), (\theta_{11}, \theta_{26}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{25}), (\theta_{12}, \theta_{26}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{13}, \theta_{25}), (\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{13}, \theta_{27}), (\theta_{13}, \theta_{27}), (\theta_{13}, \theta_{28}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{27}), (\theta_{14}, \theta_{28})$	۲۰	۳۲	$n_1 > n_0$ $n_2 > n_0$ $n_2 > n_1$	۲-۱	$02 > \theta_1 & \beta < 180 \Rightarrow 0 < \theta_1 < 180 & 0 < \theta_2 < 360$	$\alpha_1 < 90 \quad \& \quad \alpha_2 < 90$	هدف در بین دو رادار قرار دارد	سناریوی دوم
$(\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{11}, \theta_{25}), (\theta_{11}, \theta_{26}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{25}), (\theta_{12}, \theta_{26}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{13}, \theta_{25}), (\theta_{13}, \theta_{26}), (\theta_{13}, \theta_{27}), (\theta_{13}, \theta_{28}), (\theta_{14}, \theta_{24}), (\theta_{14}, \theta_{25}), (\theta_{14}, \theta_{26}), (\theta_{14}, \theta_{27}), (\theta_{14}, \theta_{28})$	۲۰	۳۲	$n_1 > n_0$ $n_2 > n_0$ $n_2 < n_1$	۲-۲				
$(\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{21}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{13}, \theta_{23}), (\theta_{13}, \theta_{24}), (\theta_{14}, \theta_{23}), (\theta_{14}, \theta_{24})$	۱۰	۱۶	$n_1 > n_0$ $n_2 < n_0$	۲-۳				
$(\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{11}, \theta_{25}), (\theta_{11}, \theta_{26}), (\theta_{11}, \theta_{27}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{25}), (\theta_{12}, \theta_{26}), (\theta_{12}, \theta_{27})$	۱۰	۱۶	$n_1 < n_0$ $n_2 > n_0$	۲-۴				
$(\theta_{11}, \theta_{21}), (\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24})$	۶	۸	$n_1 < n_0$ $n_2 < n_0$ $n_2 < n_1$	۲-۵				
$(\theta_{11}, \theta_{22}), (\theta_{11}, \theta_{23}), (\theta_{11}, \theta_{24}), (\theta_{12}, \theta_{22}), (\theta_{12}, \theta_{23}), (\theta_{12}, \theta_{24})$	۶	۸	$n_1 < n_0$ $n_2 < n_0$ $n_2 > n_1$	۲-۶				

در این مرحله با استفاده از این واقعیت که $\beta = \theta_2 - \theta_1$ می‌باشد، می‌توان اقدام به شناسایی

۳-۵- پردازش ویژگی‌های استخراج شده و تعیین کلاس هدف

هدف کرد. بدین ترتیب که در ابتدا به تشخیص نوع سناریو پرداخته و با توجه به شرایط (۹) و (۱۹) می‌توان معین نمود که کدام سناریو اتفاق افتاده است. سپس از قسمت آشکارساز رادارها، به تعیین مقادیر n_1 و n_2 پرداخته و در مرحله بعد با توجه به جداول (۲) و (۳)، شرایط حاکم بر استخراج ویژگی را معین کرده و عنوان زیر سناریو تعیین می‌شود. پس از تعیین عنوان زیر سناریو، حالات معتبر برای این زیر سناریو، برای تک‌تک کلاس‌های هدف که در فضای ویژگی شکل (۹) و شکل (۱۳) به آن‌ها پرداخته شده است به دست آورده می‌شود. در نهایت هر کدام از اهداف در نظر گرفته شده که بتواند رابطه (۲۱) را کمینه کند به عنوان هدف اصلی شناسایی و معرفی می‌شود.

$$\beta' = \theta_2' - \theta_1' \quad (20)$$

$$e = |\beta - \beta'| \quad (21)$$

θ_1' : زاویه دید هدف، تخمین زده شده مربوط به رادار شماره یک

$$\theta_1' \in \{\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}\}$$

θ_2' : زاویه دید هدف، تخمین زده شده مربوط به رادار شماره دو

$$\theta_2' \in \{\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{25}, \theta_{26}, \theta_{27}, \theta_{28}\}$$

β' : زاویه تخمین زده شده بین دو رادار نسبت به هدف
 e : خطای بین زاویه تخمینی رادار نسبت به دو هدف با زاویه واقعی بین دو رادار نسبت به هدف

همان‌گونه که بیان شد، پس از تعیین مقدار زاویه دید هدف و با توجه به تعداد سلول‌های فاصله آشکار شده در نمایه برد هدف، کلاس هدف شناخته شده و بدین ترتیب کار دسته‌بندی اهداف با استفاده از دو رادار مشابه با قدرت تفکیک بالا به پایان می‌رسد.

نکات مهم

۱- در برخی حالات، ممکن است که دو مجموعه زاویه (θ_1, θ_2) مقادیر مینیمم مساوی ایجاد نمایند که در این صورت دو دسته از اهداف به عنوان کلاس هدف شناخته می‌شوند. چون مخصوصاً زمانی که n_1 یا n_2 بزرگ‌تر از n_0 باشند، دو β' وجود دارد که به β نزدیک‌ترند. در این حالت به دلیل آنکه زوایای دید احتمالی معلوم شده‌اند،

برای سنجش دقیق زاویه هدف، می‌توان از شکل نمایه ذخیره شده در این زوایا استفاده کرد و با استفاده از فیلتر منطبق اقدام به شناسایی هدف نمود.

۲- در روش‌هایی که با استفاده از فیلتر منطبق اقدام به دسته‌بندی اهداف می‌نمایند، نمایه برد به دست آمده از هدف را با کل بانک داده مربوط به نمایه‌های برد، مقایسه کرده و بدین ترتیب شبیه‌ترین نمایه موجود در بانک داده را انتخاب کرده و در نهایت کلاس هدف را معین می‌نمایند. این کار مستلزم بار محاسباتی بسیار بالایی برای رادار و گرفتن زمان نسبتاً طولانی از رادار می‌باشد. در این‌گونه موارد برای کاهش بار محاسباتی، اقدام به کاهش المان‌های موجود در بانک داده می‌نمایند تا بتوان سرعت انتخاب نمونه مشابه را بالا ببرند. در این حالت به‌طور قطع از کیفیت دسته‌بندی کاسته خواهد شد.

در الگوریتم پیشنهادی، در صورتی که ابهام در انتخاب کلاس هدف بین دو یا چند کلاس به وجود آید، به دلیل آنکه زاویه دید هدف مشخص شده است، بجای تطبیق نمایه برد به دست آمده از هدف با کل بانک داده، تنها باید نمایه برد مربوط به همان زاویه دید هدف را با نمایه به دست آمده مقایسه کرد و بنابراین نیازی به مقایسه تمام بانک داده با نمونه به دست آمده نیست. بدین ترتیب بدون آنکه از کیفیت تشکیل بانک داده کاسته شده باشد، بار محاسباتی الگوریتم به شدت کاهش یافته است.

۳- با دقت در نوع عملکرد الگوریتم پیشنهادی معلوم می‌شود که هر هدفی دارای یک فضای ویژگی خاص می‌باشد که می‌توان با استفاده از مقدار طول و عرض آن هدف و اعمال این الگوریتم به آن، اقدام به تشخیص کلاس هدف نمود.

۶- کاهش بار محاسباتی الگوریتم

با توجه به روش شناسایی هدف توسط الگوریتم تقریب مستطیلی و مبنا قرار دادن تعداد سلول‌های فاصله موجود در نمایه برد آشکار شده توسط دو رادار، نیازی به بانک داده‌ی وسیع نیست. می‌توان محاسبه کرد که با چه تغییر زاویه‌ای، تعداد سلول‌های فاصله حداقل به اندازه یک واحد تغییر خواهند کرد و بدین ترتیب مقدار گام تغییرات θ برای تشکیل بانک نمایه برد و تعداد سلول‌های فاصله مشخص می‌گردد. در این صورت برای زوایای θ که در محدوده صفر تا ۹۰ درجه قرار دارند، مقدار گام را

محاسبه کرده و به دلیل تقارن موجود می‌توان برای بقیه زوایا نیز به همین‌گونه عمل کرد.

۶-۱- محدوده زاویه دید $0 < \theta < \varphi$

در این محدوده، با افزایش θ از صفر تا φ ، مقدار طول مؤثر هدف که در مقابل پرتوی تابشی رادار قرار می‌گیرد افزایش می‌یابد؛ بنابراین گام موردنیاز برای تشکیل بانک داده به میزانی خواهد بود که مقدار n حداقل یک واحد افزایش یابد. بدین معنا که به اندازه چه $\Delta\theta$ ی، مقدار n یک واحد اضافه می‌شود.

$$\begin{aligned} \theta_a \rightarrow \theta_{a+1} &\Rightarrow n_{a+1} = n_a + 1 \\ \Rightarrow n_a &= \left\lceil \frac{2d \cos(\theta_a - \varphi)}{c\tau} \right\rceil + 1 \end{aligned} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) علامت [] به معنای گرفتن جزء صحیح می‌باشد.

$$\text{If } n_{a+1} = n_a + 1 \Rightarrow \theta_{a+1} = ?$$

اگر از گرفتن جزء صحیح صرف‌نظر کنیم، می‌توان معادلات را به صورت زیر ادامه داد.

$$\begin{aligned} n_a &= \frac{2d \cos(\theta_a - \varphi)}{c\tau} \Rightarrow \theta_a = \cos^{-1}\left(\frac{c\tau n_a}{2d}\right) + \varphi \\ n_{a+1} &= \frac{2d \cos(\theta_{a+1})}{c\tau} \quad \& \quad n_{a+1} = n_a + 1 \Rightarrow \theta_{a+1} = \cos^{-1}\left(\frac{c\tau n_{a+1}}{2d}\right) + \varphi \\ &\Rightarrow \theta_{a+1} = \cos^{-1}\left(\frac{c\tau(n_a + 1)}{2d}\right) + \varphi \\ \Delta\theta &= \theta_{a+1} - \theta_a = \cos^{-1}\left(\frac{c\tau(n_a + 1)}{2d}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{c\tau n_a}{2d}\right) \end{aligned}$$

بنابراین در حالت خاص در این محدوده می‌توان $\theta_a = 0$ را در نظر گرفت و معادله را حل کرد. با توجه به رابطه (۲)، رابطه (۲۳) به دست می‌آید:

$$\Delta\theta = \cos^{-1}\left(\frac{2p + c\tau}{2d}\right) \quad (23)$$

نکته: گاهی اوقات بسته به ابعاد هدف و پهنای پالس رادار، ممکن است مقدار داخل پرانتز از ۱ بیشتر شود و معادله جواب نداشته باشد. در این صورت می‌توان با توجه به منبع [۶] مقدار گام‌ها را 0.2 درجه در نظر گرفت.

۶-۲- محدوده زاویه دید $\varphi < \theta < 90$

در این شرایط تعداد سلول‌های فاصله از n_{\max} به n_{\min} تغییر می‌کند؛ بنابراین $\Delta\theta$ ، مقداری است که از

تعداد سلول‌های فاصله، یک واحد کم شود. به همان ترتیب بیان‌شده در قسمت ۴-۲-۵-۱ می‌توان اثبات کرد که:

$$\Delta\theta = \cos^{-1}\left(1 - \frac{1}{n_a}\right) \quad (24)$$

بدین ترتیب و با استفاده از این روابط می‌توان بار محاسباتی برای تشکیل بانک داده را کم کرد. همان‌گونه که در روابط (۲۳) و (۲۴) معلوم است، میزان گام موردنیاز برای تشکیل بانک داده به طول هدف و پهنای پالس رادار وابسته است. این امر نشان می‌دهد که میزان کاهش بار محاسباتی نیز به این دو پارامتر اصلی وابسته است.

یکی از موارد مهم در سیستم‌های راداری، دسته‌بندی اهداف می‌باشد که رادار با قدرت تفکیک بالا قادر به انجام این کار می‌باشد. از مزایای مهم هر طرح برای شناسایی و دسته‌بندی اهداف، سادگی و کم بودن بار محاسباتی آن می‌باشد. این مزیت‌ها در طرح پیشنهادی استفاده از تقریب مستطیلی که می‌توان آن را در اهداف دریایی بکار برد، وجود دارد. یکی از موارد موجود در این طرح وابستگی شدید آن به قسمت آشکارسازی نمایه‌ی برد می‌باشد که هرچه کار آشکارسازی با دقت بالاتری انجام گیرد نتیجه دسته‌بندی با کیفیت بهتری به دست خواهد آمد. در نهایت برای هرچه بهتر انجام شدن این روش، پیشنهاد می‌گردد که از تلفیق این روش با فیلتر منطبق استفاده گردد تا کیفیت کار بالاتر رود. قابل ذکر است که در مقاله [۲] روش دیگری که تلفیقی از روش تقریب مستطیلی و شبکه عصبی می‌باشد، ارائه شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به دست آمد که در صورت استفاده از طول نمایه برد به‌عنوان ویژگی هدف جهت دسته‌بندی اهداف دریایی، نمی‌توان تنها به‌وسیله یک رادار، موفق به دسته‌بندی اهداف شد و حداقل باید از دو رادار استفاده کرده و با تحلیل همزمان اطلاعات مربوط به سیگنال‌های برگشتی از یک هدف اما در دو زاویه دید متفاوت، اقدام به دسته‌بندی اهداف نمود.

الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله که عنوان تقریب مستطیلی برای آن انتخاب شد، نشان می‌دهد که می‌توان با تقریب شکل فیزیکی یک هدف دریایی به‌صورت یک مستطیل محیطی (مستطیلی که کل هدف را می‌توان در

آن قرار داد، داده‌های بسیار ارزشمندی را در خصوص طول نمایه‌ی برد اهداف دریایی در زوایای دید متفاوت به‌دست آورد. نتیجه بسیار مهم از ارائه الگوریتم تقریب مستطیلی و استفاده از حداقل دو رادار با قدرت تفکیک بالا این است که می‌توان با در نظر گرفتن خروجی حاصل از این الگوریتم و تطبیق آن با جداول به‌دست‌آمده، فرصتی بسیار مناسب برای دسته‌بندی اهداف دریایی و همچنین تخمین زاویه دید هدف به‌دست آورد. خصوصیت مهم این الگوریتم، پرهیز از روابط پیچیده و سنگین در محاسبات مربوط به دسته‌بندی می‌باشد.

مراجع

1. Tait, P., Introduction to radar target recognition, 2nd edition, IET radar, sonar and navigation series,
2. Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, 2nd ed., McGraw-Hill, Singapore, 1980
۳. دهقانی، ع. (۱۳۹۷)، «ارائه الگوریتم جدید دسته‌بندی اهداف دریایی در رادارهای با قدرت تفکیک بالا با استفاده از شبیه‌سازی»، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران
4. L. Min, et al. "Sparse representation denoising for radar high resolution range profiling." International Journal of Antennas and Propagation, 2014.
5. R. Burkholder, M. Pino and F. obelleiro, "Low Angle Scattering From 2-D Targets on a Time-Evolving Sea Surface" IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2002
6. R. zhang, X. wei, et al. "Analysis about the speckle of radar high resolution range profile", Sci China Tech Sci, Vol.54, pp. 226-236, 2011