

کاهش هزینه ساخت رادارهای آرایه فازی با استفاده از تکنیک های رادار شناختگر

محمد قدیان^۱، رضا فاطمی مفرد^{۲*}، بیژن عباسی آرند^۳

۱- دانشجوی مقطع دکترا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، ghadian@mut.ac.ir

*۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، fatemi@mut.ac.ir

۳- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، abbasi@modares.ac.ir

چکیده

رادارهای شناختگر با استفاده از قابلیت تعیین تطبیق شکل موج ارسالی، با توجه به پارامترهای دینامیکی هدف تحت ردگیری، موجب کاهش خطاهای ردگیری نسبت به رادارهای کلاسیک می شوند. ایده اصلی این مقاله استفاده از این بهبود برای پیشنهاد دیدگاهی جدید در طراحی پارامترهای اساسی رادار می باشد. در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن یک رادار ردگیر مرجع به عنوان نمونه، به طراحی پارامترهای اساسی یک رادار کلاسیک پرداخته می شود. در رادارهای ردگیر کلاسیک معیار طراحی پارامترهای اساسی آنتن، نیازمندی های دقت زاویه سنجی می باشد. پیشنهاد ارائه شده در این مقاله برای طراحی پارامترهای اساسی آنتن، معیار قرار دادن حد تفکیک زاویه ای جهت تعیین پهنای پرتو و استفاده از مفاهیم و قابلیت های رادار شناختگر جهت کاهش خطاهای ردگیری می باشد. با مقایسه دو طراحی مشخص می شود که به ازای خطای ردگیری ثابت، با استفاده از تکنیک های نوین در زمینه رادارهای شناختگر، می توان کاهش شدیدی در تعداد المان های آرایه، و متعاقب آن کاهش هزینه ساخت رادارهای آرایه فازی ایجاد نمود. این کاهش تعداد المان ها، با توجه به مقدار دقت زاویه سنجی و حد تفکیک زاویه ای مورد نیاز رادار، می تواند به میزان نصف تعداد المان های رادارهای کلاسیک باشد.

کلمات کلیدی

رادارهای آرایه فازی - رادارهای شناختگر - الگوریتم های ردگیری - طراحی تطبیقی شکل موج

مقدمه

جهت گیری سکوی راداری (...) از این جدول حذف شده اند. در این جدول θ_{3dB} پهنای پرتو رادار، SNR نسبت سیگنال به نویز، S توان سیگنال هدف در کانال مجموع، C توان کلاتر در کانال مجموع، C_{Δ} توان کلاتر در کانال تفاضل، I_{Δ} توان چندمسیرگی در کانال تفاضل، m تعداد بیت های شیفت دهنده فاز (در صورت آرایه فازی بودن رادار)، k_m شیب مونوپالس پترن آنتن، G_0 بهره در حالت اسکن صفر درجه و $G_d(\theta)$ بهره در حالت اسکن پرتو رادار است.

جدول ۱. عوامل خطای زاویه سنجی در رادارهای ردگیر [۵]

$\frac{\theta_{3dB}}{k_m \sqrt{2SNR}}$	خطای ناشی از نویز
$\frac{\theta_{3dB}}{k_m} \sqrt{\frac{C_{\Delta}}{2} \cdot \left(1 + \frac{C}{S}\right)}$	خطای ناشی از کلاتر
$\frac{\theta_{3dB}}{k_m \sqrt{2 \frac{S}{I_{\Delta}}}}$	خطای ناشی از چندمسیرگی
$\frac{\theta_{3dB}}{2^m} \sqrt{\frac{G_d(\theta)}{G_0}}$	خطای جهت دهی پرتو

سیستم های راداری اصولاً از حلقه پردازشی رو به جلو استفاده می کنند که در آن رادار با استفاده از شکل موج مشخصی ابتدا به آشکارسازی هدف توسط پردازش اولیه می پردازد و سپس سیگنال پردازش شده، از طریق پردازش ثانویه (ردگیری - دسته بندی اهداف - ...) به اطلاعات هدف ختم می شود. این موضوع در رادارهای کشف و ردگیر [۱] و SAR [۲ و ۳] رایج می باشد. در این رادارها، طراحی شکل موج با توجه به الزامات توانی (معادله رادار) انجام می شود و مشخصات دینامیکی هدف تحت ردگیری تاثیری در این طراحی ندارد [۴].

در طراحی رادارهای ردگیر، عموماً با توجه به پارامترهای برد کشف و ردگیری و همچنین با توجه به نوع هدف، دقت های بردسنجی و زاویه سنجی، پارامترهای اساسی رادار انتخاب می شوند. عوامل موثر در دقت زاویه سنجی رادار در جدول ۱ ارائه شده اند. همانطور که در این جدول مشخص است یکی از عوامل اساسی در تعیین دقت زاویه سنجی رادار، پهنای پرتو رادار است [۵]. لازم به ذکر است که عوامل خطای قابل صرف نظر (خطای پلاریزاسیون - خطای عدم تراز سکوی راداری - خطای

¹ Signal to Noise Ratio

- در واحد فرستنده، با توجه به مشخصات هدف و محیط، سیگنال ارسالی به صورت تطبیقی انتخاب میشود.
 - سیستم راداری به صورت یک حلقه بسته دارای بازخورد شامل فرستنده، محیط و گیرنده می باشد [۱۲].

در این مقاله هدف آنست که با استفاده از بهبود ناشی از طراحی رادار شناختگر، با آسان سازی الزامات طراحی رادارهای مرسوم، راداری طراحی شود که ضمن دستیابی به پارامترهای مورد نیاز راداری، از نظر هزینه ساخت نسبت به رادارهای مرسوم دارای کاهش هزینه اساسی باشد. ایده اصلی برای این منظور طراحی آرایه آنتنی بر اساس نیازمندی حدتفکیک زاویه ای مورد نیاز رادار است. همانطور که اشاره شد، طراحی آرایه برای دستیابی به دقت های زاویه سنجی، منجر به پهنای پرتو کم می شود که نیاز به آرایه آنتنی با تعداد المان های بسیار زیاد دارد. اما در صورتیکه طراحی آرایه آنتنی برای دستیابی به حدتفکیک زاویه ای انجام شود، تعداد المان های رادار کاهش قابل توجهی خواهد داشت، ضمن اینکه استفاده از تکنیک های رادارهای شناختگر در ارسال تطبیقی شکل موج منجر به جبران افزایش خطای ردگیری (ناشی از افزایش پهنای پرتو) و دستیابی به دقت های ردگیری مورد نیاز می شود.
 برای بررسی این موضوع راداری با مشخصات آرایه شده در جدول ۲ را در نظر می گیریم.

جدول ۲. مشخصات رادار مورد نظر

Ku-Band	فرکانس کاری رادار
32km for 0.1m ²	حداکثر برد کشف
1km	حداقل برد کشف
3km	حداکثر ارتفاع هدف در مد کشف
0.7	احتمال آشکارسازی
10 ⁻³	احتمال هشدار خطا
75m	حدتفکیک در برد
2 Degree	حد تفکیک زاویه ای
30rpm	سرعت چرخش آنتن در مد کشف
20m	دقت برد سنجی در کشف
±20 Degree	محدوده پوشش سمت در مد کشف
±35 Degree	محدوده پوشش ارتفاع در مد کشف
20km for 0.1m ²	حداکثر برد ردگیری
5m	دقت برد سنجی در ردگیری
0.5 mrad = 0.028degree	دقت زاویه سنجی در ردگیری
40Hz	نرخ ارسال اطلاعات ردگیری
۴ هدف	تعداد اهداف قابل ردگیری همزمان

در این مقاله، ابتدا به طراحی پارامترهای اساسی یک رادار کلاسیک جهت دستیابی به مشخصات رادار مورد نیاز پرداخته می شود. سپس مفاهیم اساسی رادارهای شناختگر با جزییات بیشتری معرفی می شوند. در بخش چهارم یک رادار شناختگر جهت دستیابی به مشخصات رادار مورد نیاز طرح ریزی می شود و مشخصات سیستم های طراحی شده از طریق مشخصات آنها و شبیه سازی نتایج قابل وصول توسط هر یک از رادارها، با هم مقایسه می شوند و در فصل پنجم نتیجه گیری آرایه می گردد.

همانطور که مشخص است افزایش توان ارسالی رادار تنها باعث بهبود محدودی بر عملکرد رادار می شود. برای کاهش خطای ردگیری یک روش مرسوم کاهش پهنای پرتو رادار است که این موضوع موجب افزایش ابعاد آنتن، وزن و هزینه می شود. کاهش پهنای پرتو آنتن رادار در مواردی که رادار مورد نظر از نوع رادار آرایه فازی است، به شدت باعث افزایش هزینه های ساخت می شود، به نحویکه در بسیاری از موارد ساخت چنین راداری می تواند بدون توجیه باشد. این موضوع از چالش های اساسی در طراحی رادارهای آرایه فازی می باشد.

در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار ایده اولیه رادار شناختگر آرایه گردید [۶]. عملکرد رادار شناختگر بر اساس حلقه ادراک - عمل می باشد. از لحظه روشن کردن سیستم، رادار از نظر الکترومغناطیسی با محیط اطراف در ارتباط قرار میگیرد و از طریق سیگنال برگشتی اطلاعاتی از محیط (اعم از هدف، کلاتر، نویز و ...) بدست می آورد. با توجه به مفاهیم پردازش سیگنال و کنترل، می توان برای حفظ اطلاعات هدف، به جای ذخیره نمودن کل اطلاعات اهداف، با استفاده از دستگاه معادلات حالت و تعیین یک مدل و بروزرسانی آن در هر مرحله، علاوه بر حفظ اطلاعات پیشین اهداف، تخمینی از موقعیت بعدی هدف نیز بدست آورد. دستگاه معادلات حالت به صورت زیر است [۷].

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_k \quad (1)$$

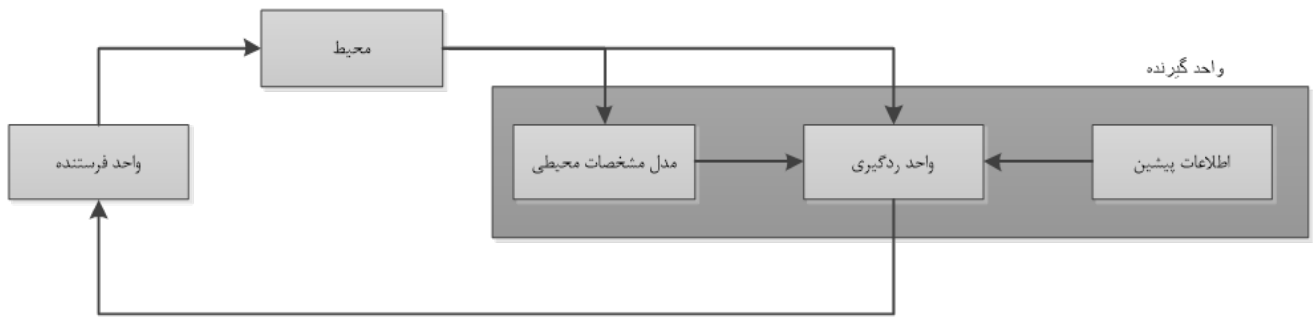
$$z_k = h(x_k) + n_k \quad (2)$$

در این معادلات x_k بردار متغیرهای حالت در لحظه k ، z_k بردار مشاهدات راداری در لحظه k است. w_k مدل کننده عدم انطباق حرکت هدف با مدل در نظر گرفته شده برای این حرکت (f) است. ماتریس کوواریانس این نویز را با Q نشان می دهیم. n_k نویز مشاهدات است که مدل کننده خطای اندازه گیری راداری است و دارای ماتریس کوواریانس N است.

با توجه به غیرایستا بودن محیط، نیاز به بروزرسانی مدل اجتناب ناپذیر است. در رادارهای مرسوم این بروزرسانی تنها در گیرنده اعمال می شود [۸]. اما در رادارهای شناختگر با اعمال فیدبک از گیرنده به فرستنده، امکان استفاده از این اطلاعات در فرستندگی رادار نیز فراهم می شود [۹]. به عبارت دیگر ایده ی اصلی در رادارهای شناختگر استفاده از اطلاعات دینامیکی هدف تحت ردگیری برای تعیین پارامترهای آینده رادار می باشد تا عملکرد سیستم راداری بهبود یابد. این پارامترها می تواند شامل انتخاب بهینه و تطبیقی شکل موج باشد، به نحویکه شکل موج طراحی شده در هر مرحله از ارسال، خطاهای بحرانی سیستم (خطای بردسنجی - خطای زاویه سنجی - خطای سرعت سنجی) را کاهش دهد تا خطای کلی ردگیری کاهش پیدا کند [۱۰].

دیگرام رادار شناختگر در شکل ۱ نمایش داده شده است [۱۱]. با توجه به این دیگرام، موارد زیر قابل توجه است:

- در واحد گیرنده، رادار به طور مداوم با دریافت اطلاعات از محیط، اطلاعات خود را بروز می کند و از این اطلاعات برای آشکارسازی و ردگیری اهداف جدید استفاده می کند.



شکل ۱. دیاگرام رادار شناختگر [۱۰]

جدول ۳. عوامل خطای زاویه سنجی در رادار ردگیر با پهنای پرتو ۱/۲ درجه

خطای ناشی از نویز	۰/۰۹۴ درجه
خطای ناشی از کلاتر	۰/۱۲۸ درجه
خطای ناشی از چندمسیرگی	۰/۰۲۱ درجه
خطای جهت دهی پرتو	۰/۰۱۱ درجه
مجذور مجموع مربعات خطا	۰/۱۶ درجه

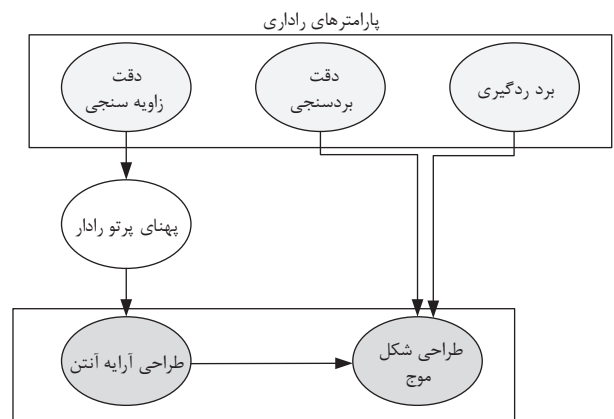
این عدد در اصل خطای زاویه سنجی قابل دستیابی در خروجی واحد پردازش سیگنال و بلوک زاویه سنجی مونوپالس و ورودی فیلتر ردگیری است. میزان خطای نهایی رادار در خروجی فیلتر ردگیری حاصل می شود. این خطا با خطاهای سکوی راداری و خطای همراستاسازی جمع خواهد شد و خطای نهایی ردگیری حاصل می شود. بلوک دیاگرام واحد پردازشگر در شکل ۳ نمایش داده شده است. این واحد شامل بلوک های مورد نیاز برای آشکارسازی اهداف می باشد. طبق تئوری پردازش سیگنال های دیجیتال، پس از نمونه برداری از سیگنال در باند میانی^۲، با استفاده از مدولاتور I/Q^۳ و فیلتر پایین گذر سیگنال به باند پایه منتقل می شود. سپس با استفاده از فیلتر منطبق^۴ (جهت بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز) پردازش زمان سریع^۵ پایان می یابد. در پردازش زمان کند، جهت حذف اهداف غیر متحرک از فیلتر MTI استفاده می شود. سپس براساس تئوری تخمین جهت کاهش نویز و بهبود احتمال آشکارسازی از تجمیع پالس ها استفاده می شود. حال با استفاده از حدآستانه مناسب آشکارسازی پالس بازگشتی از هدف انجام می شود.

برای انتخاب فیلتر ردگیری در فیلتر ردگیری هدف^۱ لازم است به نکاتی توجه شود. فیلتر کالمن در شرایط نویزهای مدل و مشاهده گوسی و دستگاه معادلات حالت خطی فیلتر بهینه است [۱۳]. اما با توجه به اینکه ردگیری راداری در دستگاه کروی انجام می شود، اما گزارش اطلاعات رادار به سایر قسمت ها (مانند مرکز کنترل) در دستگاه کارتزین و اینرسی انجام می شود، دستگاه معادلات حالت غیرخطی خواهند بود و لازم است از فیلترهای ردگیری مناسب دستگاه معادلات حالت غیرخطی استفاده شود [۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷].

طراحی کلاسیک پارامترهای اساسی رادار

در این بخش به بررسی و طراحی برخی از پارامترهای اصلی رادار ارائه شده در جدول ۲ با طراحی کلاسیک و غیرشناختگر پرداخته می شود. لازم به ذکر است که هدف از این ارائه تنها بررسی اجمالی سیستم و پارامترهای اساسی جهت دستیابی به مشخصات مورد نظر است.

با توجه به اینکه این رادار باید قابلیت ردگیری همزمان چند هدف را دارا باشد، این رادار باید به صورت آرایه فازی طراحی گردد. همانطور که در جدول ۱ آرایه گردید یک عامل اساسی در دقت های ردگیری، پهنای پرتو است. بنابراین رویکرد کلاسیک برای طراحی پارامترهای اساسی رادار به صورت شکل ۲ است.

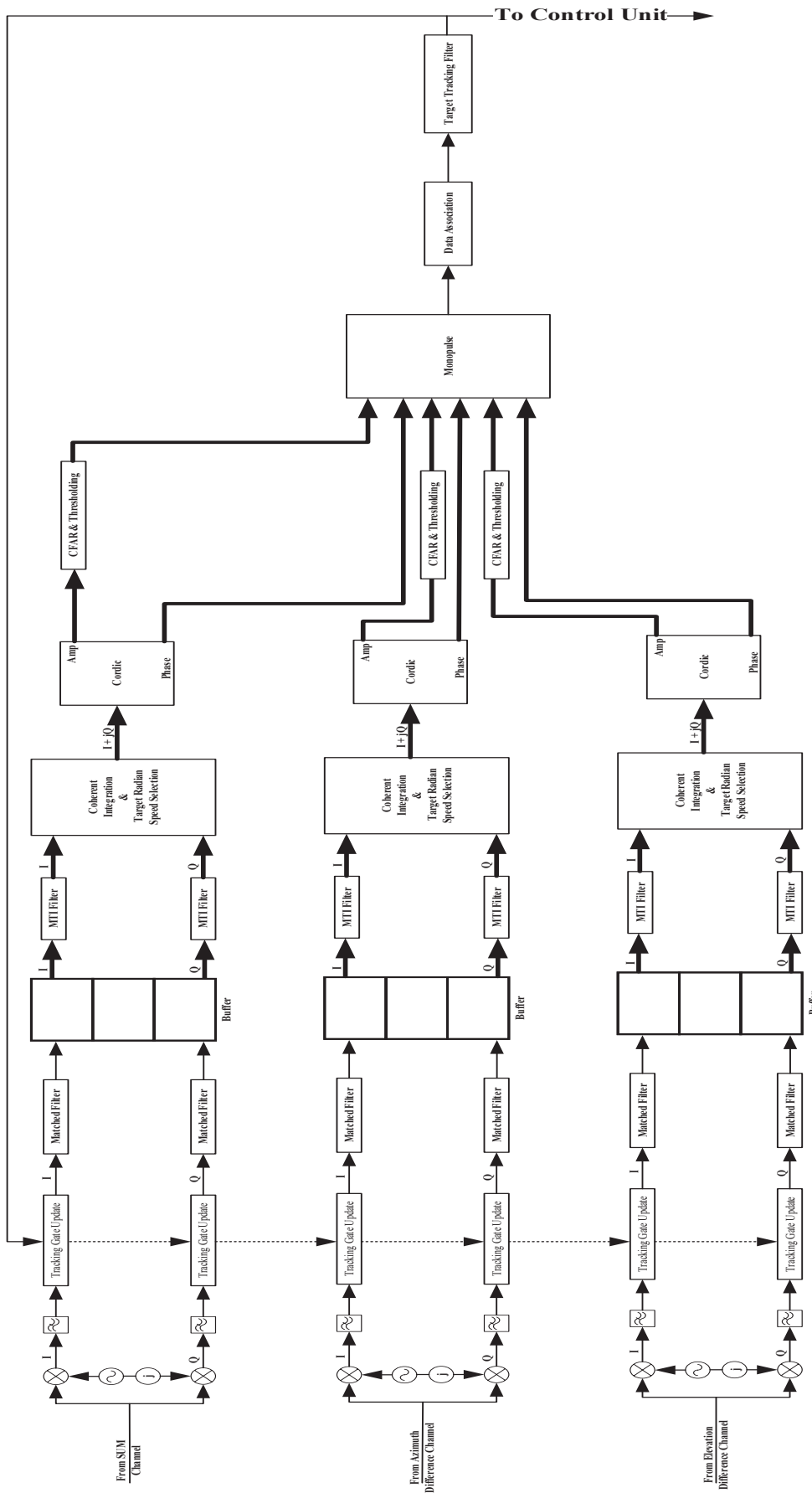


شکل ۲. فرآیند کلی طراحی رادارهای کلاسیک

با توجه به جدول ۱، با انتخاب پهنای پرتو برابر ۱/۲ درجه، نسبت سیگنال به نویز برابر 20dB، ضریب بهبود کلاتر 40dB و عمق نال^۱ بهتر از 25dB، شیب پترن مونوپالس برابر ۱/۵۷، تعداد بیت های شیفت دهنده فاز را برابر ۶ و بهره آنتن در حالت چرخش پرتو در بیشترین زاویه را به میزان ۲dB کمتر از بهره آنتن در چرخش صفر درجه در نظر می گیریم. به این ترتیب عوامل خطای زاویه سنجی به صورت جدول ۳ خواهد بود:

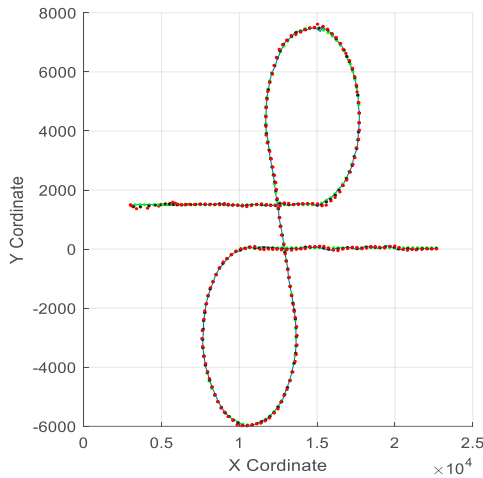
⁵ Fast Time Processing
⁶ Target Tracking Filter

¹ Null Depth
² Intermediate Frequency
³ Inphase / Quadrature Modulator
⁴ Match Filter



شکل ۳. دیگرام پردازش سیگنال رادارهای کلاسیک

که در این رابطه $\sigma_r = 20m/s$ و $\sigma_\theta = 0.16 \frac{\pi}{180}$ می باشد. نتیجه شبیه سازی با سناریویی که هدف با ۵ مدل حرکتی مختلف در ۲۰۰ لحظه حرکت می کند به صورت شکل ۴ است.



شکل ۴. سناریوی حرکت هدف و نتیجه ردگیری با استفاده از طرح کلاسیک رادار

در این شکل خط آبی رنگ مشاهدات هدف (خروجی زاویه سنجی مونوپالس)، نقاط سبز رنگ موقعیت اصلی هدف، نقاط قرمز پیش بینی موقعیت هدف توسط فیلتر ردگیری و نقاط مشکی رنگ تخمین موقعیت هدف توسط فیلتر ردگیری می باشد. میانگین مربعات خطا در این حالت در دستگاه کاترین برابر ۱۱ متر، خطای برد سنجی برابر ۱/۳ متر و خطای زاویه سنجی برابر ۰/۰۱۸ درجه می باشد. کاهش واریانس زاویه سنجی در این مثال حدود ۸ است. (این میزان بهبود در کاربردهای راداری قابل قبول است. به عنوان مثال، با توجه به نتایج عملی، در اهداف کم مانور میزان کاهش واریانس تغییرات حدود ۱۰ و در اهداف با مانور بالا بین ۲ تا ۵ است). مشاهده می شود که با این شرایط و در سناریوی دشوار حرکتی هدف مشخصات مورد نیاز رادار قابل وصول است.

بنابراین در صورتیکه خطای خروجی بلوک زاویه سنجی مونوپالس ۰/۱۶ درجه باشد، می توان در خروجی فیلتر ردگیری به خطای ۰/۰۱۸ درجه رسید. حال برای دستیابی به خطای ۰/۱۶ درجه در خروجی مونوپالس لازم است که الزامات مورد نیاز ارائه شده در جدول ۳ برآورده شود. این الزامات عبارتند از پهنای پرتو ۱/۲ درجه و نسبت به سیگنال به نویز 20dB.

با توجه به باند فرکانسی و محدوده پوشش زاویه ای (و در نظر گرفتن حاشیه زاویه ۵ درجه)، فاصله بین المان ها در راستای سمت و ارتفاع به صورت زیر است.

$$\lambda = 2cm \rightarrow d_{az} \leq \frac{\lambda}{1+\sin 25} = 1.4cm \quad (14)$$

$$\rightarrow d_{el} \leq \frac{\lambda}{1+\sin 40} = 1.2cm \quad (15)$$

یکی از فیلترهای مناسب برای این موضوع فیلتر EKF^۱ است. برای حل این دستگاه معادلات با استفاده از الگوریتم EKF ابتدا با استفاده از بسط مرتبه اول معادلات حالت، آنها به صورت معادلات خطی درآورده می شوند و سپس روابط فیلتر کالمن به معادلات اصلاح شده اعمال می شوند. الگوریتم EKF به صورت زیر می باشد [۱۴].

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k/k}) \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{k+1/k} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k/k}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_k \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}\mathbf{P}_{k/k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{N} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1}\mathbf{H}^T\mathbf{S}_k^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})) \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{S}_k\mathbf{K}_k^T \quad (8)$$

که در این روابط \mathbf{F} و \mathbf{H} ژاکوبین تابع انتقال (f) و (h) و ماتریس \mathbf{P} کوواریانس خطای ردگیری می باشند.

بردار مشاهدات را بدون از بین رفتن کلیت موضوع به صورت دو بعدی و به صورت $[r \ \theta]^T$ و بردار حالت را به صورت $[x_x \ \dot{x}_x \ \ddot{x}_x \ x_y \ \dot{x}_y \ \ddot{x}_y]^T$ در نظر می گیریم. مدل حرکتی هدف را به صورت شتاب ثابت و توابع انتقال با توجه به نرخ ردگیری هدف (T) به صورت زیر تعریف می شود.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0.5T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0.5T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{h} = \left[\sqrt{x_x^2 + x_y^2} \quad \text{atan}\left(\frac{x_y}{x_x}\right) \right] \quad (10)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_x}{\sqrt{x_x^2 + x_y^2}} & \frac{x_y}{\sqrt{x_x^2 + x_y^2}} \\ -\frac{x_y}{x_x^2 + x_y^2} & \frac{x_x}{x_x^2 + x_y^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

همچنین ماتریس های کوواریانس نویز مدل و مشاهدات به صورت زیر است

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} T^5 & T^4 & T^3 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & 8 & T^2 & 0 & 0 & 0 \\ T^4 & T^3 & T^2 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 6 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ T^3 & T^2 & T & T^5 & T^4 & T^3 \\ 6 & 2 & 0 & 20 & 8 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & T^4 & T^3 & T^2 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 6 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & T^3 & T^2 & T \end{bmatrix} \quad (12)$$

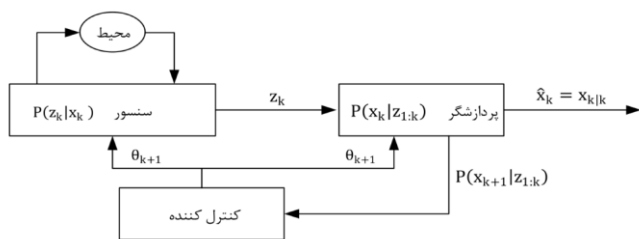
$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

¹ Extended Kalman Filter

رادار شناختگر

مفهوم اساسی در سیستم های شناختگر، حلقه ی ادراک-عمل است [۱۸]. در انسان مشاهدات توسط احساسات انسان (مانند شنوایی - بینایی - چشایی - ...) انجام می شود و سیستم عصبی این مشاهدات را به ادراک تبدیل می کند و بر اساس تصمیمات اتخاذ شده توسط مغز این ادراک به عمل قابل تبدیل است [۱۹]. در سیستم های راداری مشاهده محیط توسط سنسورهای سیستم (مانند آنتن و گیرنده - سنسورهای کمکی) انجام می شود و واحد پردازشگر این مشاهدات را به ادراک از محیط و تعیین وضعیت آن (اعم از کلاتر و هدف) تبدیل می کند. این ادراک توسط تطبیق شکل موج ارسالی با شرایط محیط و هدف به عمل تبدیل می شود تا عملکرد رادار بهبود یابد [۲۰].

مدل کلی رادار شناختگر در شکل ۵ نمایش داده شده است [۲۱]. محیط شامل اهداف، کلاتر و نویز است. سنسور وظیفه مشاهده محیط و دریافت مشاهدات را دارد. پردازشگر که تخمین وضعیت هدف را با استفاده از مشاهدات تهیه می کند و واحد کنترل کننده که اقدامات آتی رادار را تعیین می کند. واحد کنترل کننده در اصل وجه تمایز رادارهای شناختگر و رادارهای کلاسیک است [۲۲].



شکل ۵. مدل رادار شناختگر [۲۰]

در این دیاگرام سنسور با مشاهده محیط، بردار مشاهدات z_k را تولید می کند که تابعی از وضعیت هدف x_k و شکل موج ارسالی θ_k است. مدل تغییرات وضعیت هدف به صورت مدل مارکوف با تابع توزیع چگالی احتمال $P(x_{k+n}|x_k)$ در نظر گرفته می شود. مدل این مشاهدات به صورت $P(z_k|x_k)$ (تابع شباهت - likelihood) نشان داده می شود. با پردازش این مشاهدات در واحد پردازشگر تخمینی از وضعیت هدف $(\hat{x}_k = x_k|k)$ و پیش بینی وضعیت آتی هدف $(x_{k+n}|k)$ بدست می آید. واحد کنترل کننده با توجه به وضعیت هدف و حداقل کردن تابع هزینه ای مشخص، شکل موج ارسالی در لحظات آتی (θ_{k+1}) را انتخاب می کند.

تخمین وضعیت هدف با استفاده از قاعده بیز انجام می شود [۲۳].

$$P(x_k|z_{1:k}) = \frac{P(z_k|x_k, z_{1:k-1})P(x_k|z_{1:k-1})}{\int P(z_k|x_k, z_{1:k-1})P(x_k|z_{1:k-1})dx_k} \quad (17)$$

با توجه به پهنای پرتو مورد نیاز (۱/۲ درجه) داریم:

$$\theta_{3dB} = \frac{\kappa \lambda}{D} \rightarrow D = 100cm \quad (16)$$

که ضریب κ با توجه به سطح گلبرگ فرعی 25dB برابر ۶۰ انتخاب شده است. بنابراین آرایه به صورت ۸۵×۷۲ المان با ۶۱۲۰ المان خواهد بود. با توجه به رابطه بین تعداد المان های آرایه و بهره آنتن $G = NG_{elemnt} \cong N\pi$ [۳]، چنین آرایه ای دارای بهره آنتن حدود 43dB خواهد بود. در صورتیکه آرایه را به صورت آرایه فازی فعال در نظر بگیریم و توان هر المان را 5w فرض کنیم، مجموع توان ارسالی رادار برابر 30kw خواهد بود. سیگنالینگ در مد ردگیری به صورت زیر است.

$$R_{max} = 20km \rightarrow T_{1min} = 133\mu s \\ \rightarrow \tau_1 = 19\mu s \\ \rightarrow PRI_{min} = 152\mu s$$

در این روابط τ_1 عرض پالس و T زمان گیرندگی رادار است.

با توجه به اینکه برای دستیابی به ضریب بهبود کلاتر 40dB نیاز به فیلتر MTI داریم و با در نظر گرفتن Staggering جهت حذف سرعت کور ناشی از این فیلتر، دنباله PRI با نسبت ۱۰٪ انتخاب می شود. به این ترتیب PRI_{mean} را برابر 167μs در نظر می گیریم. به این ترتیب جهت دستیابی به نسبت سیگنال به نویز 20dB در برد 20km برای هدف ۰/۱m2 با استفاده از معادله رادار به تنها یک پالس نیاز داریم که با توجه به فیلتر MTI، تعداد پالس ها را برابر ۳ در نظر می گیریم. یعنی در زمان کمتر از 0.5ms ($3 \times 167\mu s = 500\mu s$) نسبت سیگنال به نویز مورد نیاز فراهم می شود که این عدد با توجه به ردگیری ۴ هدف با نرخ ردگیری 40Hz (که منجر به زمان 6.2ms می شود)، دارای حاشیه زمانی بسیار زیادی است.

با توجه به موارد فوق الذکر، مشخص است که با روش های طراحی آرایه آنتن رایج برای دستیابی به خطای ردگیری مورد نظر به بیش از ۶۱۰۰ المان نیاز داریم، در حالیکه این تعداد المان منجر به شرایط توانی بسیار بیش از حد نیاز می شود. با توجه به اینکه زمان 0.5ms برای ردگیری هر هدف کافی است و با احتساب نرخ ردگیری 40Hz برای چهار هدف، زمان 6.2ms برای هر هدف موجود می باشد، بنابراین کاهش تعداد المان ها می تواند تا حدی باشد که کاهش بهره آنتن باعث افت SNR به میزان 11dB گردد تا این افت توسط حاشیه زمانی موجود جبران گردد. به عبارت دیگر، در صورتیکه بتوان با استفاده از ترفندی، ضمن کاهش تعداد المان های رادار، به همان دقت زاویه سنجی مورد نیاز در خروجی فیلتر ردگیری دست یابیم، می توان علاوه بر دستیابی به نسبت سیگنال به نویز مورد نظر، کاهش فراوانی در هزینه ساخت رادار نیز ایجاد کرد. در ادامه به ارائه روشی جدید برای دستیابی به این موضوع از طریق روش های پردازشی رادارهای شناختگر پرداخته می شود.

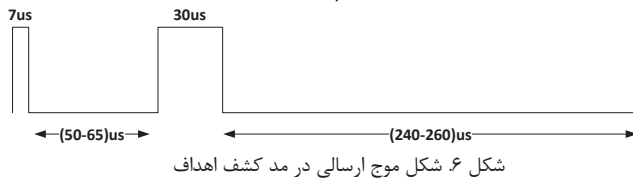
تکرار پالس (153μs) در نظر گرفته می شود. عرض پالس ها بین ۳ تا ۱۰۰ میکرو به صورت تطبیقی قابل انتخاب خواهد بود. در این صورت برای دستیابی به نسبت سیگنال به نویز 20dB در حداقل عرض پالس، تعداد پالس های مورد نیاز برابر ۴۷ می باشد که با توجه به اینکه ۲ پالس در فیلتر حذف کلاتر از بین می رود، این تعداد را برابر ۵۰ در نظر می گیریم و زمان کل CPI^۲ برابر 6ms خواهد بود که با توجه به نرخ ردگیری و تعداد اهداف قابل قبول است (با توجه به نرخ ردگیری 40Hz زمان در اختیار برای ردگیری ۴ هدف برابر 25ms خواهد بود که زمان در اختیار برای هر هدف برابر 6.25ms است).

سیگنالینگ رادار در مد کشف با توجه به نرخ چرخش آنتن، برد کشف اهداف و دوره کارکرد فرستنده به صورت زیر خواهد بود.

$$R_{max} = 32km \rightarrow T_{1min} = 210\mu s \rightarrow \tau_1 = 30\mu s \rightarrow PRI_1 = 240\mu s$$

$$T_{2min} = 50\mu s \rightarrow \tau_2 = 7\mu s \rightarrow PRI_2 = 65\mu s$$

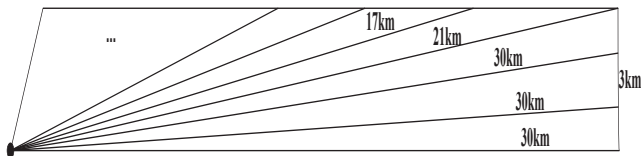
$$\rightarrow PRI = 325\mu s$$



لازم به ذکر است که در محاسبه دوره تکرار پالس، ضریب متوسط 1.15 جهت اعمال Staggering لحاظ شده است. زمان در اختیار در هر زاویه سمت برابر است با

$$TOT_{az} = \frac{\theta_{3dB}}{6RPM} = \frac{2}{6 \times 30} = 11.1ms \quad (22)$$

در شکل ۷، با توجه به محدودیت ارتفاع ارتفاع ۳km، ماکزیمم برد کشف اهداف، در زوایای ارتفاع مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود که در زوایای بالا، برد کشف اهداف کاهش پیدا می کند که از این موضوع برای کاهش تعداد پالس های مورد نیاز برای کشف هدف و صرفه جویی زمانی می توان استفاده نمود. مطابق این شکل، برد کشف اهداف به ازای زاویه های از صفر تا ۶۰ درجه، بین ۳۰ تا ۴ کیلومتر تغییر می کند. تعداد و نوع پالس ها در موقعیت های فضایی مختلف به صورت جدول ۴ در نظر گرفته می شود. در این جدول پالس ترکیبی به صورت یک پالس کوتاه و یک پالس بلند (مشابه شکل ۶ به صورت یک در میان برای حل مشکل MTAE^۳) و پالس کوتاه به صورت یک پالس با دوره تکرار 72μs (با توجه به کاهش برد کشف اهداف) در نظر گرفته می شود.



شکل ۷. نواحی مختلف کشف اهداف

³ Multiple Time Around Echo

بر اساس تئوری تخمین، تخمین وضعیت هدف با استفاده از تخمینگر MMSE^۱ بدست می آید.

$$\hat{x}_k = x_{k|k} = \int x_k P(x_k|z_{1:k}) dx_k \quad (18)$$

همچنین پیش بینی وضعیت آتی هدف بر اساس قاعده Chapman-Kolmogorov انجام می شود.

$$P(x_{k+1}|z_{1:k}) = \int P(x_{k+1}|x_k) P(x_k|z_{1:k}) dx_k \quad (19)$$

$$x_{k+1|k} = \int x_{k+1} P(x_{k+1}|z_{1:k}) dx_{k+1} \quad (20)$$

انتخاب شکل موج بر اساس حداقل کردن تابع هزینه انجام می شود که این تابع هزینه به صورت های مختلفی قابل انتخاب است. این انتخاب معمولاً بر اساس حداقل کردن خطای ردگیری (تخمین خطا (P_{k/k}) - پیش بینی خطا (P_{k+1/k}) - پیش بینی مشروط خطا (P_{k+1/k+1}) - انجام می شود [۲۴ - ۲۵].

لازم به ذکر است که روابط (۱۷) الی (۲۰) در شرایط نویز گوسی قابل تبدیل به روابط کالمن هستند که در این مقاله همچنان از الگوریتم EKF استفاده می شود.

در ادامه طرح کلی یک رادار شناختگر برای دستیابی به مشخصات مورد نیاز آرایه شده در قسمت های قبل پرداخته می شود و تفاوت ها و مزیت های قابل دستیابی با استفاده از این طرح نسبت به طرح رادار کلاسیک آرایه می گردد.

طراحی پارامترهای اساسی رادار شناختگر

برای طراحی کلان رادار شناختگر با مشخصات مورد نیاز، لازم است طراحی آرایه به نحوی انجام شود که نیازمندی های حدتفکیک زاویه ای اهداف توسط پهنای پرتو رادار برآورده شود. برای این منظور با توجه به فاصله بین المان ها که در بخش قبل توسط فرکانس کاری رادار و محدوده پوشش فضایی به دست آمد، تعداد المان ها، با توجه به حدتفکیک زاویه ای برابر ۲ درجه، به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\theta_{3dB} = \frac{\kappa\lambda}{D} \rightarrow D = 60cm \quad (21)$$

$$\rightarrow N_{az} = 43$$

$$\rightarrow N_{el} = 50$$

بنابراین تعداد کل المان های آرایه برابر ۲۱۵۰ المان خواهد بود که این تعداد نسبت به تعداد المان های رادار طرح کلاسیک ۲/۸ برابر کمتر است. این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه هزینه ساخت رادار می شود. حال بررسی می کنیم که آیا چنین آرایه ای با توجه به قابلیت های رادار شناختگر قابلیت دستیابی به مشخصات مورد نیاز (از نظر برد کشف و ردگیری و دقت های مورد نیاز) را خواهد داشت.

آرایه با ۲۱۵۰ المان دارای بهره آنتن 37dB و توان تشعشعی 10.5KW خواهد بود. سیگنالینگ رادار در مد ردگیری مشابه حالت کلاسیک (دوره

¹ Minimum Mean Square Error

² Coherent Processing Interval

جدول ۴. زمان و نحوه توقف پرتو در هر زاویه ارتفاع در مد کشف

Elevation Start	Elevation End	Range (km)	Number of Pulse	Total Time (ms)
0	2	30	8 Compound	2.6
2	4	30	8 Compound	2.6
4	6	30	8 Compound	2.6
6	8	21	1 Compound	0.325
8	10	17	1 Compound	0.325
10	12	14	1 Compound	0.325
12	14	12	1 Compound	0.325
14	16	10	1 Compound	0.325
16	18	9	1 Short	0.065
18	20	8	1 Short	0.065
20	22	8	1 Short	0.065
22	24	7	1 Short	0.065
24	26	6	1 Short	0.065
26	28	6	1 Short	0.065
28	30	6	1 Short	0.065
30	32	5	1 Short	0.065
32	34	5	1 Short	0.065
34	36	5	1 Short	0.065
36	38	4	1 Short	0.065
38	40	4	1 Short	0.065
40	42	4	1 Short	0.065
42	44	4	1 Short	0.065
44	46	4	1 Short	0.065
46	48	4	1 Short	0.065
48	50	4	1 Short	0.065
50	52	4	1 Short	0.065
52	54	4	1 Short	0.065
54	56	4	1 Short	0.065
56	58	4	1 Short	0.065
58	60	4	1 Short	0.065
60	62	4	1 Short	0.065
62	64	4	1 Short	0.065
64	66	4	1 Short	0.065
66	68	4	1 Short	0.065
68	70	4	1 Short	0.065
Total Azimuth Time				11.18

مشاهده می شود که زمان کل کشف اهداف در زاویه سمت مشخص برابر 11.1ms است که برابر زمان مجاز توقف در هر زاویه سمت می باشد. برای بررسی دقت ردگیری قابل وصول با استفاده از پهنای پرتو ۲ درجه و سیگنالینگ ارایه شده، ابتدا به آنالیز خطای زاویه سنجی در خروجی بلوک زاویه سنجی مونوپالس پرداخته می شود.

جدول ۵. عوامل خطای زاویه سنجی در رادار ردگیر با پهنای پرتو ۲ درجه

خطای ناشی از نویز	درجه
خطای ناشی از کلاتر	۰/۲۷۶ درجه
خطای ناشی از چندمسیرگی	۰/۰۲۱ درجه
خطای جهت دهی پرتو	۰/۰۲۱ درجه
مجذور مجموع مربعات خطا	۰/۳۴ درجه

حال با استفاده از روش های پردازشی رادارهای شناختگر و تطبیق شکل موج ارسالی جهت کاهش خطای ردگیری با توجه به خروجی فیلتر ردگیری، به بررسی خطای قابل وصول در خروجی فیلتر ردگیری می پردازیم. با استفاده از پیش بینی خطای ردگیری و جایگذاری آن در رابطه ی تخمین خطای ردگیری به رابطه زیر می رسیم

$$S_k = HP_{k/k-1}H^T + N$$

$$K_k = P_{k/k-1}H^T S_k^{-1}$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_k S_k K_k^T$$

$$\rightarrow P_{k+1/k+1}(\tau) =$$

$$P_{k+1/k} - P_{k+1/k}H^T (HP_{k+1/k}H^T + N(\tau))^{-1} HP_{k+1/k}^T \quad (23)$$

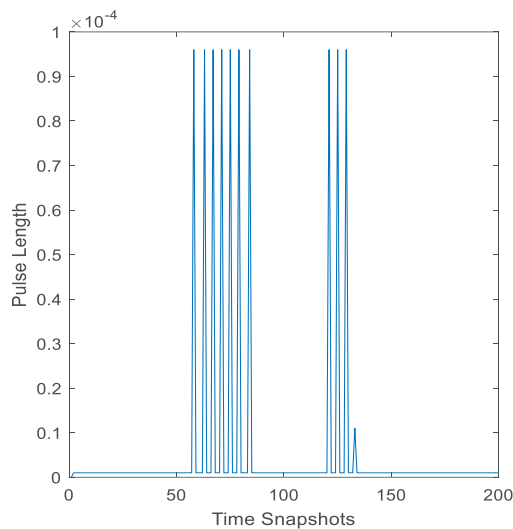
در این رابطه پیش بینی تخمین خطای ردگیری و ارتباط آن به عرض پالس نشان داده شده است. ماتریس کوواریانس خطای اندازه گیری در این رابطه به صورت زیر می باشد.

$$N(\tau) = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{ct}{\sqrt{SNR(\tau,R)}}\right)^2 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\theta_{3dB}}{\sqrt{SNR(\tau,R)}}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

از این رابطه مشخص است که افزایش عرض پالس موجب افزایش σ_r^2 و کاهش σ_θ^2 می شود و بالعکس. بنابراین لازم است که بین پارامترهای σ_r^2 و σ_θ^2 مصالحه ای صورت پذیرد که همین مصالحه موجب تفاوت بین رادارهای کلاسیک و رادارهای شناختگر است و موجب بهبود عملکرد رادارهای شناختگر نسبت به رادارهای کلاسیک می شود.

جهت تعیین عرض پالس مناسب، در هر مرحله از اجرای الگوریتم، این رابطه به ازای عرض پالس های مختلف محاسبه می شود و عرض پالسی که به ازای آن پیش بینی خطای ردگیری کمترین مقدار باشد برای ارسال در مرحله بعدی انتخاب می شود. در الگوریتم شبیه سازی شده برای این رادار از یک کتابخانه با ۲۰ عرض پالس از ۳ میکروثانیه تا ۱۰۰ میکروثانیه استفاده شده است. لازم به ذکر است که در شبیه سازی ها CPI و PRF ثابت در نظر گرفته شده است، بنابراین با تغییر عرض پالس خللی در

مشاهده می شود که با استفاده از شکل موج تطبیقی واریانس خطای تخمین نسبت به حالت شکل موج ثابت کاهش داشته است که این کاهش در زمان هایی که هدف مانور داشته است مشهود می باشد. منحنی تغییرات عرض پالس در طول مدت ردگیری به صورت شکل (۱۰) است. مشخص است که الگوریتم طراحی تطبیقی شکل موج در زمان هایی که هدف مانور داشته است، با افزایش عرض پالس واریانس خطای ردگیری را کاهش داده است.



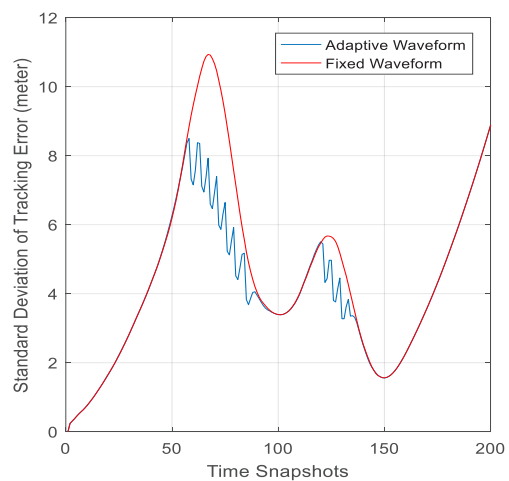
شکل ۱۰. منحنی تغییرات عرض پالس در مراحل مختلف ردگیری

میانگین مربعات خطا در این حالت در دستگاه کاتزین برابر ۱۳ متر، خطای بردسنجی برابر $3/2$ متر و خطای زاویه سنجی برابر $0/18$ درجه می باشد. مشاهده می شود که خطاهای قابل وصول با استفاده از شکل موج تطبیقی در حد قابل قبول مشخصات مورد نیاز است. لازم به ذکر است که دستیابی به این خطاها تنها با تغییرات تطبیقی شکل موج با توجه به مانور هدف و شرایط ردگیری ممکن است، زیرا با انتخاب حداقل و یا حداکثر عرض پالس به صورت ثابت امکان دستیابی به خطای زاویه سنجی و بردسنجی مناسب به صورت همزمان ممکن نخواهد بود. همچنین در صورت عدم استفاده از عرض پالس تطبیقی با آرایه پهنای پرتو ۲ درجه خطاهای ردگیری در دستگاه کاتزین برابر ۱۸ متر، خطای بردسنجی برابر $4/5$ متر و خطای زاویه سنجی برابر $0/28$ درجه می باشد.

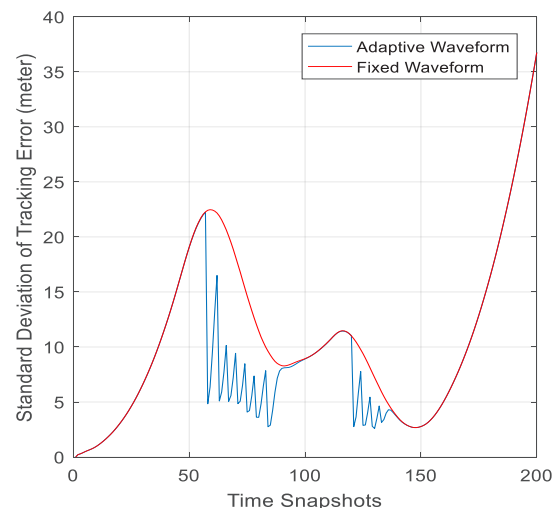
لازم به ذکر است برای کاهش تعداد المان ها به میزان ۳ برابر، حدود 14dB کاهش توان بهره آنتن فرستندگی، 4.7dB بهره آنتن گیرندگی و 4.7dB کاهش توان ارسال) توسط افزایش تعداد پالس ها به میزان قابل تحمل سیستم (از نظر زمان در اختیار) جبران گردید و افزایش خطای ورودی فیلتر ردگیری به میزان ۲ برابر (ناشی از افزایش پهنای پرتو رادار) توسط تکنیک های رادار شناختگر و شکل موج تطبیقی جبران شد.

آشکارسازی هدف ایجاد نخواهد شد و تنها دقت های داده ورودی به فیلتر ردگیری تغییر می کند.

برای شبیه سازی الگوریتم ردگیری با استفاده از شکل موج تطبیقی از سناریویی مشابه حالت طرح کلاسیک استفاده می شود. با این تفاوت که داده های ورودی فیلتر ردگیری، با توجه به افزایش خطای واحد زاویه سنجی مونوپالس به دلیل افزایش پهنای پرتو، به میزان $0/34$ درجه خطای تصادفی دارند. انحراف از معیار خطای ردگیری در راستای X و Y به صورت شکل های (۸) و (۹) است. در این شکل ها خط قرمز رنگ واریانس خطای تخمین ردگیری رادار طرح کلاسیک و خط آبی رنگ واریانس خطای تخمین ردگیری رادار شناختگر با استفاده از شکل موج تطبیقی است.



شکل ۸. مقایسه واریانس خطای شکل موج ثابت و شکل موج تطبیقی در راستای X در زمان های مختلف ردگیری



شکل ۹. مقایسه واریانس خطای شکل موج ثابت و شکل موج تطبیقی در راستای Y در زمان های مختلف ردگیری

نتیجه گیری

ای باشد و استفاده از ارسال تطبیقی شکل موج، با توجه به وضعیت هدف در هر لحظه، موجب جبران افزایش خطای ردگیری ناشی از افزایش پهنای پرتو می گردد. به این ترتیب برای دستیابی به خطای ردگیری مشخصی، به آرایه آنتنی با تعداد المان های کمتری نیاز خواهد بود. این کاهش تعداد المان در هر راستا متناسب خواهد بود با نسبت پهنای پرتو مورد نیاز برای دستیابی به دقت ردگیری به پهنای پرتو مورد نیاز برای دستیابی به حدتفکیک زاویه ای مورد نیاز، که این کاهش با توجه در آرایه های مربعی می تواند به میزان نصف شدن تعداد المان ها باشد.

ایده اصلی در رادارهای شناختگر، بهبود عملکرد رادار با استفاده از شکل موج تطبیقی در فرستندگی رادار، با توجه به مشخصات دینامیکی هدف تحت ردگیری، می باشد. در این مقاله با استفاده از شکل موج تطبیقی در فرستندگی رادارهای شناختگر، جهت کاهش تعداد المان های رادار آرایه فازی برای دستیابی به خطای ردگیری مورد نیاز است. در این مقاله نشان داده شد که در رادارهای شناختگر معیار طراحی در آرایه آنتن رادارهای آرایه فازی، به جای دقت زاویه سنجی می تواند حدتفکیک زاویه

مراجع

- and Prediction Problems”, Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, 1960.
- [14] Taek, P. & Lee, J, “Improved Kalman filter design for three-dimensional radar tracking”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 37, Issue 2, 727-739, April 2001.
- [15] Julier, S. & Uhlmann, J, “Unscented Filtering and Nonlinear Estimation”, Proceedings of the IEEE, vol. 92, No. 3, 401-422, March 2004.
- [16] Orton, M. & Fitzgerald, W, “A Bayesian Approach to Tracking Multiple Targets Using Sensor Arrays and Particle Filters”, IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 50, No. 2, 216-223, February 2002.
- [17] Cui, N. & Hong, L. & Layne, J, “A Comparison of Nonlinear Filtering Approaches with an Application to Ground Target Tracking”, Signal-Processing Elsevier, 1469–1492, 2005.
- [18] M. S. Greco, F. Gini, P. Stinco, “Cognitive Radars: Some Applications”, Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP2016), pp. 1077-1082, December 2016.
- [19] Haykin, S, Cognitive Dynamic Systems, Cambridge University Press, 2012.
- [20] Haykin, S. & Zia, A. & Arasaratnam, I. & Xue, Y, “Cognitive Tracking Radar”, IEEE Radar Conference, 1467-1470, 2001.
- [21] Bell, K. & Baker, C. & Smith, G. & Johnson, J. & Rangaswamy, M, “Cognitive Radar Framework for Target Detection and Tracking”, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 9, No. 8, 1427-1439, December 2015.
- [22] Greco, M. & Gini, F. & Stinco, P. & Bell, K, “Cognitive Radars: On the Road to Reality”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 35, No. 4, 112-125, July 2018.
- [23] Arulampalam, M. & Maskell, S. & Gordon, N. & Clapp, T, “A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking”, IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 50, No. 2, 174-
- [1] اکرم خوشخویی، مهرزاد نصربیان، “مدلسازی و شبیه سازی ردیابی موشک ماهواره بر به روش مونوپالس”، فصلنامه صنایع الکترونیک، پاییز ۱۳۹۳، دوره ۵، شماره ۳، ص ۴۵-۵۴.
- [۲] مهدی پودن چی، غلامرضا اکبری زاده، کریم انصاری اصل، “استخراج لبه اتوماتیک از تصاویر SAR بر اساس استنتاج فازی”، فصلنامه صنایع الکترونیک، پاییز ۱۳۹۵، دوره ۷، شماره ۳، ص ۶۷-۷۶.
- [۳] غلامرضا اکبری زاده، مریم فدایی، “بخش بندی تصاویر ماهواره ای SAR با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی وفقی آستانه گیری شده”، فصلنامه صنایع الکترونیک، پاییز ۱۳۹۴، دوره ۷، شماره ۳، ص ۳۴-۴۴.
- [4] Skolnik, M, Introduction to Radar Systems, McGraw Hill, 2001.
- [5] Barton, D, Modern Radar System Analysis, Artech House, 2001.
- [6] Haykin, S, “Cognitive Radar – A Way of the Future”, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 30-40, January 2006.
- [7] G. Kitagawa and W. Gersch, Smoothness Priors Analysis of Time Series. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [۸] زهرا مهرمحدی، عباس شیخی، مصطفی درختیان، “طراحی توامان سیگنال ارسالی و فیلتر گیرنده در رادارهای شناختگر به منظور آشکارسازی اهداف در حضور کلاتر”، مجله علمی پژوهشی رادار، پاییز ۱۳۹۶، شماره ۳، ص ۶۱-۷۲.
- [9] Siji, Q. & Weiping, Q. & Junhai, G. & Yan, Z, “Cognitive Radar: Critical Techniques and Limits”, 12th International Conference on Signal Processing, 2035-2038, 2014.
- [10] M. Steck, C. Neumann, M. Bockmair, “Cognitive Radar Principles and Application to Interference Reduction”, the 19th International Radar Symposium IRS2018, Germany, June 2018.
- [11] Haykin, S. & Xue, Y. & Setoodeh, P, “Cognitive Radar Step Toward Bridging The Gap Between Neuroscience And Engineering”, Proceedings Of The IEEE | Vol. 100, No. 11, 3102-3130, November 2012.
- [12] M. Greco, F. Gini, P. Stinco, K. Bell, “Cognitive Radars: On the Road to Reality”, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 112-125, July 2018.
- [13] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering

188, February 2002.

[24] A. E. Mitchell, G. E. Smith, K. L. Bell, A. Duly, "Fully Adaptive Radar Cost Function Design", IEEE Radar Conference (Radarconf 2018), pp. 1301-1306, April 2018.

[25] L. U. Medina, J. Grajal, "Implementation of the fully adaptive radar framework: practical limitations", IEEE

Radar Conference (Radarconf 2017), pp. 761-766, May 2017.

