

طراحی سیگنال در رادار پالس داپلر با استفاده از روش باقیمانده چینی مقاوم جهت رفع ابهام در برد

بیژن عباسی آرند^۱، محسن عسکری^{۲*}

۱- استادیار دانشکده برق دانشگاه تربیت مدرس ۲- دانشجوی دکتری دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۸/۰۱/۹۳، پذیرش: ۹۳/۰۶/۰۷)

چکیده

به دلیل مزایایی که رادارهای پالس داپلر در مقابله با کلاترهای گسترده در فرکانس دارند، ناچاریم در برخی کاربردها از این نوع رادار استفاده کنیم. در این مقاله روش نوین طراحی سیگنالینگ و پردازش سیگنال در رادارهای پالس داپلر فرکانس تکرار بالا ارائه شده است. این روش مبتنی بر روش باقیمانده چینی مقاوم است که جهت رفع ابهام در برد به کار برده شده است. طراحی دو رادار پالس داپلر فرکانس تکرار بالا بر این اساس انجام شده است. با استفاده از روابط ریاضی و انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه نشان داده می‌شود که با انتخاب مناسب تعداد بسته‌های ارسالی به سمت هدف، قادر خواهیم بود در رادارهای برد بلند نیز رفع ابهام در برد را به خوبی انجام دهیم. همچنین مشکل افت گرفتگی که در رادارهای پالس داپلر فرکانس تکرار بالا بسیار محدود کننده است به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته و روشی برای غلبه بر این افت ارائه شده است.

واژگان کلیدی

رادار پالس داپلر فرکانس تکرار بالا، افت گرفتگی، روش باقیمانده چینی مقاوم.

۱. مقدمه

کلاتر در حوزه فرکانس، سیگنال ورودی به پردازشگر تقریباً خالی از کلاتر خواهد بود. روش‌های مختلفی برای رفع ابهام در برد در رادارهای پالس داپلر وجود دارد که اصول کار در کلیه روش‌ها یکسان است اما نحوه فورمول‌بندی ریاضی این روش‌ها تفاوت می‌کند. یکی از روش‌های مرسوم جهت رفع ابهام در برد، روش باقیمانده چینی است [۶]. این روش قادر است برد بدون ابهام را با دقتی برابر با دقت اندازه‌گیری برد با ابهام تخمین بزند. مشکل این روش این است که در صورتی که برد با ابهام تخمین زده شده دارای خطا باشد، برد بدون ابهامی که این روش تخمین می‌زند نیز با خطای بسیار بزرگی همراه می‌شود. روش‌های مختلفی برای مقاوم کردن روش باقیمانده چینی در برابر خطا در تخمین برد با ابهام ارائه شده است. برخی از این روش‌ها بر پایه جستجو است که در بسیاری از کاربردها مطلوب نمی‌باشد [۷-۱۲]. اخیراً روش باقیمانده چینی مقاوم به صورت فرم بسته ارائه شده است و نشان داده شده که عملکرد این روش نسبت به روش‌های قبل بهتر است [۱۳].

کاربرد اصلی رادارهای پالس داپلر، آشکارسازی اهداف متحرک با محدوده فرکانسی بالا در حضور کلاتر قوی است [۱، ۲]. رادارهای پالس داپلر به سه دسته عمده تقسیم می‌شوند؛ پالس داپلر فرکانس تکرار پایین^۱، پالس داپلر فرکانس تکرار میانی^۲ و پالس داپلر فرکانس تکرار بالا^۳. در این مقاله به بررسی رادارهای پالس داپلر فرکانس تکرار بالا پرداخته می‌شود. فرکانس تکرار پالس این رادارها به گونه‌ای است که هیچ‌گونه ابهامی در سرعت نداشته باشیم. به دلیل ماهیت سیگنالینگ رادارهای پالس داپلر فرکانس بالا، برد بدون ابهام رادار بسیار کم است و می‌توان گفت در هر مأموریتی که رادار به کار گرفته شود و به برد اهداف آشکار شده نیاز باشد، در برد ابهام داریم [۳-۵]. به دلیل بالا بودن فرکانس تکرار پالس، کلاتر، تنها درصد اندکی از طیف فرکانسی را اشغال می‌کند و با حذف سیگنال

* رایانامه نویسنده پاسخگو: m_askari@iust.ac.ir

^۱ Low PRF (LPRF)

^۲ Medium PRF (MPRF)

^۳ High PRF (HPRF)

نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که انتخاب حداقل مقدار برای فرکانس تکرار پالس طبق رابطه (۲) باعث یک ابهام در سرعت می‌شود و آن هم نزدیک شونده یا دور شونده بودن اهداف است. در برخی از مراجع به این سیگنالینگ، سیگنالینگ شبه فرکانس بالا گفته می‌شود و در برخی دیگر نیز سیگنالینگ فرکانس بالا می‌خوانند. برای از بین بردن ابهام در سرعت (داپلر)، پس از اینکه هدف در دو بسته آشکارسازی شد، در صورتی که فرکانس داپلر آن ثابت بماند هدف نزدیک شونده است و اگر فرکانس داپلر آن ثابت نباشد، این هدف دور شونده است و بایستی فرکانس داپلر واقعی آن به دست آید.

البته توجه داریم که اگر فرکانس داپلر در دو بسته مجزا، متفاوت از یکدیگر تخمین زده شود لزوماً این دو اکو مربوط به یک هدف نیست و ممکن است دو هدف در فضای مورد جستجو وجود داشته باشد که هر کدام در یک بسته آشکارسازی شده است. برای از بین بردن این ابهامات، پارامتر دیگری به نام f_{di}' را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$f_{di}' = PRF_i - f_d; \quad i = 1, \dots, k \quad (3)$$

در صورتی که هدف نزدیک شونده باشد، f_d که در ابتدا تخمین زده شده است، در تمامی بسته‌ها یکسان است و f_{di}' برای بسته‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. اگر هدف دور شونده باشد، f_d تخمین زده شده متفاوت است اما f_{di}' به ازای بسته‌های مختلف یکسان خواهد بود. در این صورت فرکانس داپلر واقعی هدف طبق رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$f_d' = f_d - PRF_i; \quad i = 1, \dots, k \quad (4)$$

طراحی رادار به صورتی که تنها یک ابهام در داپلر داشته باشیم نسبت به حالتی که هیچ ابهامی در داپلر نداشته باشیم دارای مزایایی است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کم شدن فرکانس تکرار پالس که متعاقباً پیچیدگی کمتر سایر قسمت‌های رادار را به دنبال دارد
- داشتن درجه آزادی بیشتر در انتخاب فرکانس تکرار پالس
- بهبود عملکرد الگوریتم‌های رفع ابهام در برد که ناشی از افزایش دوره تکرار پالس است

مسئله ما یافتن مقدار دوره تکرار پالس به گونه‌ای است که اولاً فرکانس تکرار پالس از مقدار حداقل به دست آمده در رابطه (۲) بیشتر باشد و در ضمن با استفاده از این تعداد بسته‌ها بتوان عملیات رفع ابهام در برد را با روش باقیمانده چینی مقاوم انجام داد. به منظور استفاده از روش باقیمانده چینی مقاوم، مقدار دوره تکرار پالس در بسته‌های مختلف را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{1}{PRF_i} = PRI_i = (Mr_s M_i) \frac{2}{c}; \quad i = 1, \dots, k \quad (5)$$

در این مقاله طراحی سیگنالینگ رادار و نحوه پردازش بر مبنای روش باقیمانده چینی مقاوم است که در [۱۳] آورده شده است. به دلیل استفاده مکرر از این روش، مقاله حاضر به روش باقیمانده چینی مقاوم نامیده می‌شود. همچنین مشکل افت گرفتگی^۱ که مشکل اساسی رادارهای پالس داپلر فرکانس تکرار بالا است به صورت دقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت و راهکار مقابله با این مشکل بررسی می‌شود. علاوه بر بسته‌های مورد نیاز برای رفع ابهام در برد، یک یا چند بسته اضافی نیز ارسال می‌شود تا مشکل افت گرفتگی تا حد زیادی رفع شود.

در ادامه و در بخش دوم، سیگنالینگ رادار و در بخش سوم افت گرفتگی بررسی خواهد شد. در بخش چهارم نحوه پردازش سیگنال‌های ارسالی ارائه می‌شود و نحوه رفع ابهام در برد نیز در بخش پنجم بیان می‌شود. در بخش ششم با انجام شبیه‌سازی، عملکرد روش ارائه شده در مقاله از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و بخش پایانی نتیجه‌گیری مقاله می‌باشد.

۲. سیگنالینگ

فرض می‌کنیم k بسته با فرکانس تکرار پالس متفاوت ارسال می‌کنیم. مقادیر فرکانس تکرار پالس این k بسته مجموعه‌ای k عضوی را تشکیل می‌دهد که با \mathfrak{R} نشان می‌دهیم. برای اینکه یک هدف، آشکارسازی و سپس رفع ابهام در برد انجام شود بایستی این هدف حداقل در l بسته از k بسته ارسال شده، آشکارسازی و برد با ابهام آن در این بسته‌ها استخراج شود. بنابراین همه مجموعه‌های l عضوی از مجموعه \mathfrak{R} را با $\mathfrak{R}_i; i = 1, \dots, L$ نشان می‌دهیم. L تعداد کل زیر مجموعه‌های l عضوی از \mathfrak{R} است که برابر مقدار زیر است:

$$L = \binom{k}{l} = \frac{k!}{l!(k-l)!} \quad (1)$$

در [۱۳] حداکثر میزان خطای برد با ابهام برای داشتن تخمین برد قابل قبول $\frac{M}{4}$ است که M مضرب مشترک ضرایب است. با توجه به کاربرد مورد نظر این مقاله که طراحی سیگنالینگ رادار است، منظور از ضرایب همان دوره تکرار پالس است.

هدف این است که راداری داشته باشیم که بتواند اهدافی را که تا برد R_{\max} قرار دارند آشکارسازی و برد بدون ابهام آنها را استخراج کند. فرکانس کاری رادار را f_c و حداکثر سرعت اهداف قابل آشکارسازی را v_{\max} در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه رادار پالس داپلر فرکانس بالا داریم، حداقل فرکانس تکرار پالس رادار برابر حداکثر شیفت داپلر است. لذا داریم:

$$PRF_{\min} = fd_{\max} = \frac{2 \times v_{\max} \times f_c}{c} = \frac{2 \times v_{\max}}{\lambda} \quad (2)$$

¹ Eclipsing loss

هم‌زمان قیده‌های مطرح شده در رابطه (۷) را برقرار سازند بسیار محدود خواهد بود. لذا رابطه (۷) در بسیاری از موارد بدون نیاز به استفاده از الگوریتم‌های جستجو و تنها با دانش طراح قابل حل است. البته در برخی از موارد درجه آزادی برای انتخاب پارامترها زیاد خواهد بود و روش‌های جستجو مانند الگوریتم ژنتیک [۱۷] می‌تواند برای حل آن مورد استفاده قرار گیرد.

تابع هزینه‌ای که در مسئله (۷) تعریف شده است به این صورت است که بردی که رادار قادر است رفع ابهام کند بیشینه شود. در صورت کم بودن برد دارای ابهام رادار، اگر اهداف با اکوهای قوی در نقاط خارج از پوشش رادار قرار داشته باشد و اکوی آنها توسط رادار آشکارسازی شود، ممکن است ایتن اهداف به اشتباه در محدوده پوشش رادار کلاس‌بندی شود و مشکلاتی را برای کاربر رادار ایجاد کند. توجه شود که در مسئله طراحی رادار و انتخاب فرکانس تکرار پالس، مقدار افت گرفتگی لحاظ نشده است. در ادامه نشان می‌دهیم که افت گرفتگی باعث می‌شود احتمال آشکارسازی اهداف اندکی پایین بیاید. در صورتی که احتمال آشکارسازی رادار بالا باشد، بایستی تعداد بسته‌های ارسالی به اندازه کافی باشد تا بتوان به این خواسته رسید.

۳. افت گرفتگی

رادارهای پالس داپلر فرکانس تکرار بالا دارای مشکلات بسیاری هستند و حل مسئله، تنها به یافتن مقدار r_s و M_i ختم نمی‌شود. یکی از مشکلاتی که وجود دارد افت گرفتگی‌ای است که ناشی از خاموشی گیرنده در زمان ارسال پالس توسط فرستنده است. این مشکل در رادارهای تک پایه^۱ وجود دارد و یکی از مشکلات اساسی این‌گونه رادارها، بالا بودن فرکانس تکرار پالس است. این مسئله در حالتی که سیکل کاری رادار بالا باشد حاد خواهد بود. برای اطلاعات بیشتر می‌توانید به [۱۴] مراجعه کنید. برای غلبه بر این مشکل در رادارهای فرکانس بالا و فرکانس میانه تعدادی بسته اضافی ارسال می‌شود؛ به گونه‌ای که در نهایت منطقه‌ای خالی از گرفتگی داشته باشیم و بتوانیم رفع ابهام مورد نیاز را در بسته‌هایی انجام دهیم که سیگنال دریافتی گرفتگی نداشته باشد [۱۵، ۱۶]. این رویکرد در صورتی جوابگو است که مشکلی که افت گرفتگی ایجاد می‌کند، عدم آشکارسازی هدف باشد. در عمل اگر توان اکوی دریافتی بالا باشد و حتی اگر بخشی از سیگنال نیز در زمان خاموشی گیرنده دریافت شود، این هدف آشکار خواهد شد. توجه داریم که در این حالت اکوی سیگنال دریافتی دیگر مطابق فیلتر منطبق استفاده شده در گیرنده رادار نمی‌باشد؛ چرا که فیلتر استفاده شده در گیرنده با توجه به عرض پالس ارسالی (τ) تنظیم شده است ولی اکوی دریافتی، پالس با عرض

که در این روابط r_s برابر فاصله سلول‌های حافظه به متر، c سرعت موج در فضای آزاد، و M_i بیانگر ضریب افزایش متناسب با هر بسته است. توجه داریم که مقدار M_i ها نباید با یکدیگر مضرب مشترک داشته باشند تا تنها مضرب مشترک بین دوره تکرار پالس‌ها M باشد. به زبان ریاضی بایستی روابط زیر برقرار باشد:

$$PRI_i \leq \frac{1}{PRF_{\min}}; \quad i = 1, \dots, k \quad (6)$$

$$M \times r_s \times \prod_{i \in \mathcal{R}_j} M_i \geq R_{\max}; \quad i = 1, \dots, k$$

بنابر این مسئله به دست آوردن دوره تکرار پالس برابر است با یافتن k تا M_i و همچنین انتخاب مقدار مناسب برای r_s . مقدار r_s به فرکانس نمونه‌برداری در باند پایه وابسته است. در کاربردهای راداری که عموماً فرکانس کریر رادار زیاد است، باعث می‌شود حداکثر فرکانس داپلر اهداف بزرگ باشد و متعاقباً مقدار دوره تکرار پالس بایستی کوچک انتخاب شود. بنابراین لازم است تا حد امکان مقدار فرکانس نمونه‌برداری در باند پایه، بزرگ انتخاب شود تا درجه آزادی‌ای که برای انتخاب M_i ها داریم زیاد باشد و بتوان با استفاده از آنها خواسته مسئله را تأمین کرد. از سوی دیگر در فرآیند طراحی رادار باید طراح به این نکته توجه داشته باشد که توان اکوی دریافتی از اهداف به قدری بالا باشد که بتوان با دقت بالا، برد با ابهام را استخراج کرد. با این توضیحات، پس از انتخاب یک مقدار مناسب برای M ، مسئله یافتن فرکانس تکرار پالس در بسته‌های مختلف به صورت زیر خواهد بود:

$$\arg \max_{M_i} \sum_{j=1}^L \prod_{i \in \mathcal{R}_j} M_i$$

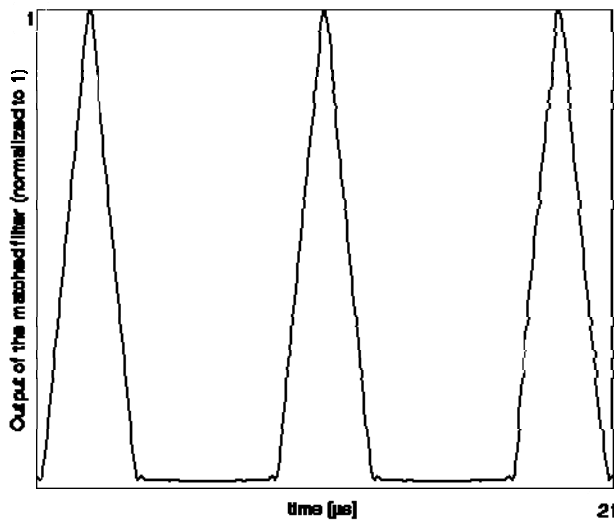
$$\text{subject to } M_i \leq \frac{\lambda f_s}{2Mv_{\max}}; \quad i = 1, \dots, k \quad (7)$$

$$\prod_{i \in \mathcal{R}_j} M_i \geq \frac{R_{\max}}{Mr_s}; \quad i = 1, \dots, k$$

$$r_s = \frac{c}{2f_s}$$

که f_s فرکانس نمونه‌برداری در باند پایه است. این مسئله با روش‌های عددی قابل حل است. پس از اینکه مقادیر مناسب برای r_s و M_i پیدا شد، مقدار دوره تکرار پالس از رابطه (۵) به دست می‌آید. مقدار M هرچه بزرگتر باشد، دقت در تخمین برد بدون ابهام نیز بهتر خواهد بود. البته باید توجه داشته باشیم که M نمی‌تواند از حد مشخصی بزرگتر انتخاب شود زیرا سایر شروط دچار مشکل خواهد شد. به‌عنوان مثال فرکانس تکرار پالس با مقدار M نسبت عکس دارد و در صورتی که M بزرگ انتخاب شود، رابطه (۶) برقرار نخواهد بود. توضیح دادیم که مقدار r_s نیز نمی‌تواند از یک حد مشخص کمتر باشد. با این توضیحات، مقادیر M و M_i که بتوانند

¹ Mono-static Radar



شکل ۳. خروجی فیلتر منطبق

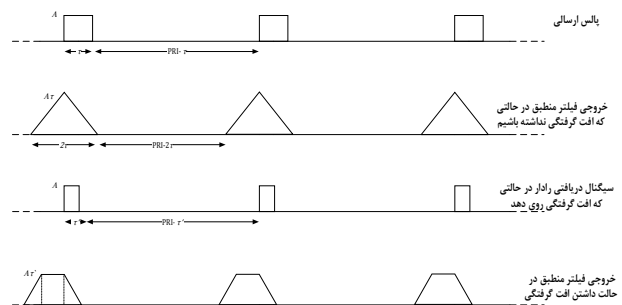
حتی تا چند ده سلول حافظه جابه‌جا شود و متناظراً خطای بسیار بزرگی را در تخمین برد بدون ابهام داشته باشیم.

برای غلبه بر مشکل گفته شده، روشی که در این مقاله پیشنهاد می‌گردد این است که در مرحله طراحی، هدف در محدوده برد کمینه تا برد بیشینه رادار، با گام حرکت بسیار کوتاه جابه‌جا شود و در هر مرحله، برد بدون ابهام توسط رادار تخمین زده شود. از سوی دیگر برد با ابهام واقعی رادار نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

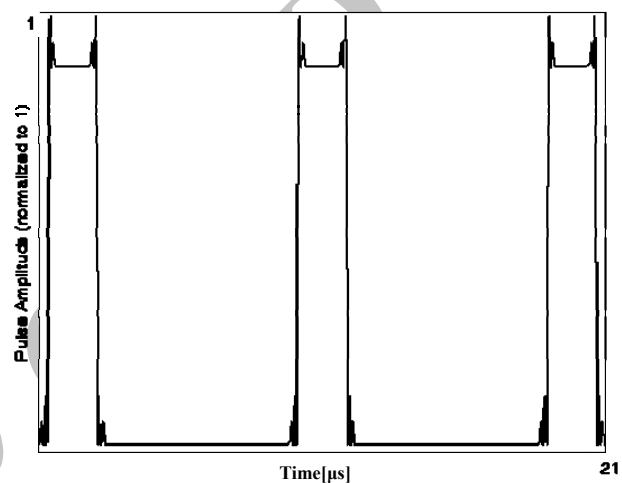
$$R_{amb} = R_{target} \bmod \left(\frac{c}{2} PRI_i \right); \quad i = 1, \dots, k \quad (8)$$

این عمل در هر برد به ازای بسته‌های مختلف انجام می‌شود. در نهایت تابعی بر برد تخمین زده شده اعمال می‌کنیم؛ به گونه‌ای که خروجی تابع با برد با ابهام واقعی تقریباً برابر باشد. با توجه به اینکه افت گرفتگی در نقاط ابتدایی و انتهایی سلول‌های حافظه اتفاق می‌افتد در این مقاله به ازای سلول‌های حافظه ابتدایی، یک تابع و به ازای نمونه‌های انتهایی آن تابع دیگری استفاده شده است که به خوبی بتواند برد با ابهام واقعی را تخمین بزند. در بخش شبیه‌سازی به این مسئله بیشتر اشاره شده است. نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که فاصله بهینه‌ای که برای انتخاب به عنوان گام تغییرات فاصله هدف می‌توان در نظر گرفت، به اندازه $\frac{c}{2 \times f_s}$ است.

در مقایسه با پالس‌هایی که از مدولاسیون استفاده می‌کنند در رادارهای پالس داپلر فرکانس بالا، ارسال پالس ساده بسیار بهتر است. در صورتی که از مدولاسیون پالسی استفاده شود، عدم تطبیق فیلتر منطبق باعث می‌شود خروجی این فیلتر بسیار تحت تأثیر قرار گیرد و اثرات آن را نتوان به روش گفته شده در این مقاله جبران کرد.



شکل ۱. سیگنال خروجی فیلتر منطبق، در حالتی که پالس ارسالی به طور کامل دریافت می‌شود و در حالتی که بخشی از این سیگنال به دلیل افت گرفتگی از بین رفته است



شکل ۲. پوش سیگنال ارسالی با در نظر گرفتن فیلترهایی که در مسیر وجود دارد

است. $\tau' \leq \tau$ لذا خروجی فیلتر منطبق در گیرنده به جای اینکه مثلث باشد، یک دوزنقه خواهد بود. در شکل ۱ این موضوع نشان داده شده است.

در صورتی که پالس‌های ارسالی و دریافتی دقیقاً به صورت بالا باشد، دوزنقه‌های شدن اکوی دریافتی باعث می‌شود که برای یافتن برد با ابهام هدف، محل لبه پایین رونده دوزنقه را تشخیص دهیم. در عمل، پالس واقعی نداریم و پالس‌های ارسالی و دریافتی رادار از فیلترهای مختلفی عبور می‌کند. شکل کلی پوش یک پالس ارسالی رادار به صورت شکل ۲ است.

بدین ترتیب خروجی فیلتر منطبق چه در حالتی که پالس دریافتی در حالت گرفتگی باشد و چه در حالتی که این پالس کاملاً دریافت شود به صورت شکل ۳ است. تنها تفاوتی که افت گرفتگی ایجاد می‌نماید این است که قله خروجی فیلتر منطبق را اندکی جابه‌جا می‌کند. بنابراین در بخش پردازش بایستی این جابه‌جایی لحاظ شود، چرا که همین جابه‌جایی باعث می‌گردد برد با ابهام هدف

تعداد بردهای تخمین زده شده برای یک هدف بیشتر از ۱ باشد و اگر اختلاف بین بردهای بدون ابهام تخمین زده شده از یک حد معین کمتر باشد، از کل بردهای تخمین زده شده میانگین گیری می شود. در حالتی که یکی و یا چندین برد بدون ابهام تخمین زده شده فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر داشته باشند، در عملیات استخراج برد با ابهام، خطایی رخ داده است که اغلب به دلیل افت گرفتگی است که حتی توابع گفته شده در قسمت های قبل نیز قادر به جبران سازی کامل آن نیستند. در این حالت در صورتی که تعداد غالب بردهای تخمین زده شده به یک عدد خاص نزدیک باشند، آن عدد به عنوان برد بدون ابهام هدف انتخاب و گزارش می شود.

۵. رفع ابهام در برد

فرض می کنیم یک هدف خاص در تعداد p بسته آشکارسازی شده باشد (که $l \leq p \leq k$). با توجه به اینکه از ابتدا عملیات رفع ابهام در برد را بر پایه l بسته مختلف بنا نهادیم، بنابراین به تعداد P حالت درجه آزادی داریم که از این درجات آزادی برای از بین بردن خطای ناشی از افت گرفتگی استفاده می کنیم. مقدار P در رابطه (۹) به دست آورده شده است:

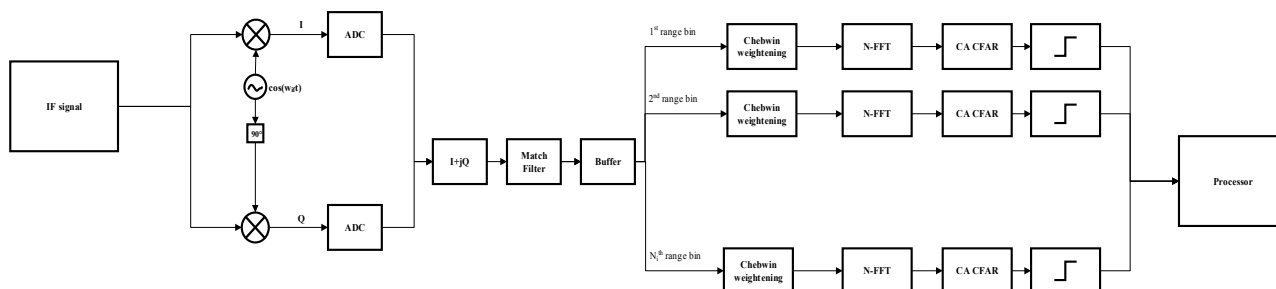
$$P = \binom{l}{p} = \frac{l!}{p!(l-p)!} \quad (9)$$

برای همه حالات ممکن عملیات رفع ابهام در برد را انجام می دهیم، برد بدون ابهام تخمین زده شده در هر حالت را R_{α}^{am} ؛ $\alpha=1, \dots, P$ می نامیم. برای هر R_{α}^{am} عملیات رفع ابهام در برد به صورت زیر انجام می شود:

برد با ابهام بسته های موجود در حالت α ؛ $\alpha=1, \dots, P$ را $R_{\alpha, i}^{am b}$ ؛ $i=1, \dots, l$ می نامیم. یکی از بسته ها را به عنوان مرجع انتخاب می کنیم. بدون اینکه به کلیت مسئله خللی وارد شود فرض می کنیم بسته انتخابی باشد.

ابتدا مقدار γ_i ؛ $i=1, \dots, l$ را به دست می آوریم:

$$\gamma_i = M_1 M_2 \dots M_{i-1} M_{i+1} \dots M_l \quad (10)$$



شکل ۴. بلوک دیاگرام پردازش سیگنال رادار پالس داپلر

۴. پردازش سیگنال

بلوک دیاگرام کلی پردازش سیگنال برای رادار پالس داپلر در شکل ۴ آورده شده است. ابتدا مؤلفه های هم فاز و متعامد سیگنال ارسالی استخراج می شود و سیگنال مختلط باند پایه در پردازشگر دیجیتال حاصل خواهد شد. سیگنال حاصله از فیلتر منطبق عبور می کند. پس از اینکه کلیه سیگنال های دریافتی از فیلتر منطبق عبور کرد، سیگنال های مربوط به هر سلول برد به ازای پالس های مختلف، زیر هم چیده می شوند. بنابراین خروجی بافر مشخص شده در شکل ۴ یک ماتریس است که تعداد ستون های آن برابر تعداد سلول های حافظه موجود در دوره تکرار پالس است و تعداد سطرهای آن نیز برابر تعداد پالس هایی است که در دوره کاری ارسال می شود. در هر سلول حافظه FFT گرفته می شود و در حوزه فرکانس آشکارسازی انجام می شود. توجه داریم که محدوده ابتدایی طیف فرکانسی مربوط به سیگنال کلاتر خواهد بود که بخش بزرگی از این سیگنال در قسمت آنالوگ حذف شده است. لذا داده های مربوط به محدوده آغازین طیف فرکانسی دارای اطلاعات خاصی برای استخراج اکوی سیگنال نیستند و پردازش نخواهند شد. به عنوان مثال در یک رادار زمینی با فرکانس مرکزی ۱۰GHz و با لحاظ کردن بیشینه سرعت ۵۵۰Hz/m برای کلاترهای متحرک، محدوده فرکانسی کمتر از ۵۵۰Hz متعلق به کلاتر است. برای داشتن نرخ هشدار کاذب ثابت، از CA CFAR استفاده می شود. نمونه هایی که از سطح آستانه بالاتر می روند ذخیره می شوند و در نهایت مکان هدف، هم در حوزه فرکانس و هم در حوزه برد با ابهام استخراج می گردد.

فرآیند بالا برای کلیه بسته های ارسالی انجام می شود و در هر بسته برد با ابهام و فرکانس داپلر اهداف تخمین زده می شود. با توجه به فرکانس داپلر اهداف تخمین زده شده، برد با ابهام اهداف را مرتب می کنیم. با توجه به اینکه فرکانس داپلر اهداف بدون ابهام استخراج شده است، به ازای هر هدف، چندین برد با ابهام به ازای بسته های مختلف وجود دارد. در صورتی که تعداد دفعات آشکارسازی یک هدف بیشتر و یا مساوی با تعداد مورد نیاز برای رفع ابهام در برد باشد، برد بدون ابهام برای آن هدف استخراج می شود. در صورتی که

۶. شبیه‌سازی

در این بخش یک رادار پالس داپلر فرکانس بالا در باند فرکانسی X را با رویکرد رفع ابهام در برد به روش باقیمانده چینی مقاوم طراحی می‌کنیم. با فرض اینکه برد با ابهام دارای خطا در تخمین باشد، عملکرد روش باقیمانده چینی مقاوم در این رادار نسبت به خطا در تخمین برد با ابهام مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان نیز عملکرد رادار طراحی شده در این بخش برای حالت واقعی داشتن افت گرفتگی ارزیابی می‌شود. برای طراحی انجام شده، مقدار M و مقادیر M_i متناظر با آن در جدول آورده شده است. به منظور جلوگیری از طولانی شدن مقاله، تنها به ذکر این پارامترها اکتفا می‌گردد. پس از اینکه مقادیر مناسب برای M و M_i پیدا شدند، دوره تکرار پالس با استفاده از رابطه (۵) قابل استخراج است. همچنین طراحی‌هایی که در این مقاله انجام شده است برای حالتی که سیکل کاری ۲۰٪ باشد انجام شده است.

در طراحی رادار باند X ، به دنبال رادار جستجوی هستیم که فرکانس کاری آن ۱۰GHz است. بیشینه سرعت اهداف قابل کشف برای این رادار ۱۰۰۰m/s در نظر گرفته شده است. این رادار بایستی قادر باشد برای اهدافی که تا برد ۱۰۰km قرار دارند، رفع ابهام در برد را انجام دهد. با توجه به مشخصات داده شده، حداقل فرکانس داپلری که خواهیم داشت برابر ۶۶/۶۷kHz است. طبق توضیحاتی که در بخش‌های گذشته داده شد، برای این رادار می‌توان محدوده ۵۵۰Hz اولیه از طیف فرکانسی را متعلق به کلاتر دانست و با پردازش نکردن اطلاعات این محدوده، تنها سیگنال اهداف متحرک را آشکارسازی نمود. دقت شود که با توجه به بالا بودن فرکانس تکرار پالس، کلاتر، کمتر از ۱ درصد از کل طیف را اشغال کرده و به راحتی قابل حذف است.

پس از تبدیل سیگنال دریافتی به سیگنال باند میانی و سپس سیگنال باند پایه و همچنین با در نظر داشتن کاهش فرکانس نمونه‌برداری که در مسیر گیرندگی وجود دارد، فرکانس نمونه‌برداری باند پایه که از روی آن فاصله سلول‌های برد استخراج می‌شود، $f_s=15\text{MHz}$ است. لذا فاصله سلول‌های برد ۱۰ متر خواهد بود.

روش کار به این صورت است که ۴ بسته به سمت هدف ارسال می‌شود. برای اینکه یک هدف تشخیص داده شود و متعاقباً رفع ابهام در برد انجام گردد، این هدف بایستی حداقل در ۳ بسته از این بسته‌های ارسالی آشکارسازی شود و برد با ابهام آن نیز در هر بسته تخمین زده شود. بنابراین به دنبال یافتن $M_i, i=1, \dots, 4$ بر حسب مقدار مشترک M هستیم. در ادامه برای مقادیر $M=20, 16, 12$ طراحی رادار انجام می‌شود و نتایج حاصل از طراحی‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

واضح است که M_i و γ_i نسبت به هم اول هستند.

$i=1, \dots, l$; $\bar{\Gamma}_{i,1}$ نیز به صورتی به دست می‌آید که رابطه (۱۱) برقرار باشد:

$$\bar{\Gamma}_{i,1} M_i \bmod M_i = 1 \quad (11)$$

مقدار $r_{\alpha,i,1}$ را به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$r_{\alpha,i,1} = \left[\frac{R_{\alpha,i}^{amb} - R_{\alpha,1}^{amb}}{M} \right]; \quad 2 \leq i \leq l \quad (12)$$

که در این رابطه، $[\]$ نمایانگر نزدیک‌ترین مقدار صحیح است. سپس $\varepsilon_{\alpha,i,1}; i=2, \dots, l$ را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\varepsilon_{\alpha,i,1} = r_{\alpha,i,1} \bar{\Gamma}_{i,1} \bmod M_i \quad (13)$$

مقدار $\hat{n}_{\alpha,i}$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{n}_{\alpha,i} = \sum_{i=2}^l \varepsilon_{\alpha,i,1} b_{\alpha,i,1} \frac{\gamma_i}{M_i} \bmod \gamma_i \quad (14)$$

که $b_{\alpha,i,1}$ در رابطه (۱۵) صدق می‌کند:

$$b_{\alpha,i,1} \frac{\gamma_i}{M_i} \bmod M_i = 1 \quad (15)$$

در پایان برد بدون ابهام، R_{α}^{un} ، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_{\alpha}^{un} = \hat{n}_{\alpha,1} PRI_1 \frac{c}{2} + R_{\alpha,1}^{amb} \quad (16)$$

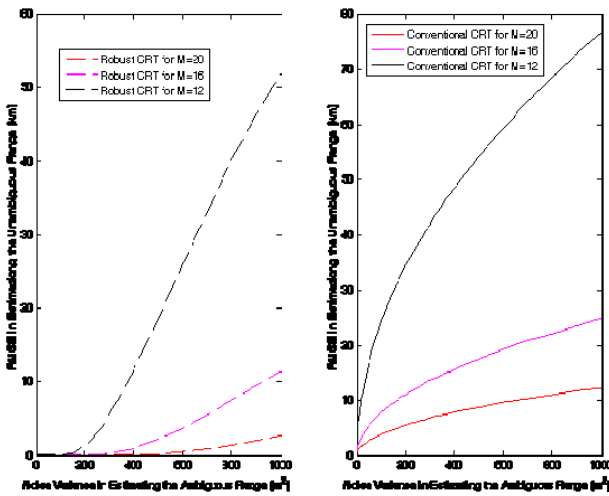
البته می‌توان برد بدون ابهام را با استفاده از سایر $R_{\alpha,i}^{amb}$ ها به دست آورد. برای این منظور بایستی ابتدا $\hat{n}_{\alpha,i}; i=2, \dots, l$ را به دست بیاوریم. این مقادیر طبق رابطه (۱۷) به دست می‌آیند:

$$\hat{n}_{\alpha,i} = \frac{\hat{n}_{\alpha,1} M_i - r_{\alpha,i,1}}{M_i}; \quad i=2, \dots, l \quad (17)$$

برد بدون ابهام با استفاده از هریک از بسته‌ها به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_{\alpha}^{un} = \hat{n}_{\alpha,i} PRI_i \frac{c}{2} + R_{\alpha,i}^{amb} \quad (18)$$

مراحل بالا (روابط ۱۲ تا ۱۸) برای تمام P حالت ممکن انجام می‌شود و برد بدون ابهام در هر حالت محاسبه می‌شود. در صورتی که بردهای تخمین زده شده دارای یک مقدار غالب باشند، این مقدار به عنوان برد بدون ابهام تخمین زده شده، محاسبه می‌گردد. در حالتی که بردهای تخمین زده شده از یکدیگر فاصله داشته باشند، افت گرفتگی تأثیر بسیار زیادی در تخمین بردهای با ابهام داشته است و باعث شده که برد بدون ابهام به خوبی تخمین زده نشود. همان‌گونه که در بخش شبیه‌سازی مشاهده خواهد شد، این حالت برای بخش بسیار اندکی از اهداف ممکن است پیش آید به طوری که عملکرد کلی رادار را تحت تأثیر قرار ندهد.



شکل ۵. جذر میانگین مربعات خطای برد رفع ابهام شده بر حسب واریانس خطا در تخمین برد با ابهام

پس از اطمینان از عملکرد الگوریتم باقیمانده چینی مقاوم در رادار طراحی شده، در ادامه به بررسی نحوه پردازش سیگنالینگ طراحی شده در یک رادار و تأثیر افت گرفتگی در پردازش رادار خواهیم پرداخت. در ادامه این بخش برای شبیه‌سازی‌های انجام شده، توان سیگنال ارسالی و تضعیف‌های موجود در محیط به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که اکوی سیگنال دریافتی در گیرنده رادار از قدرت کافی برخوردار باشد و آشکارسازی به خوبی انجام گیرد. پس از تشکیل مؤلفه‌های هم‌فاز و متعامد، سیگنال‌های دریافتی به باند پایه برده و از فیلتر منطبق عبور داده می‌شود، سپس داده‌های مربوط به هر سلول حافظه در زیر هم قرار می‌گیرد. از این داده‌ها تبدیل فوریه دیجیتال با تعداد ۲۰۴۸ نقطه گرفته می‌شود. در هر سلول حافظه در حوزه فرکانس، آشکارسازی را انجام می‌دهیم. آشکارساز به کاررفته در این رادارها، آشکارساز با نرخ هشدار کاذب ثابت است که از میانگین‌گیری روی سلول‌های مجاور استفاده می‌کند. فرآیند آشکارسازی در حوزه فرکانس برای تمامی سلول‌های حافظه انجام می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل متغیر بودن تعداد سلول‌های حافظه به ازای فرکانس تکرار پالس ارسالی، از ذکر این تعداد به ازای هر بسته صرف نظر شده است.

در شکل ۶ نمایش دو بعدی سیگنال ورودی آشکارساز را می‌بینیم. برای رسم این شکل یک هدف در محیط و در حضور نویز، شبیه‌سازی شده است که در فاصله ۱۲ کیلومتری رادار قرار دارد. هدف فوق به صورت کامل قابل رؤیت است و افت گرفتگی ندارد. برد با ابهام این هدف به خوبی و با دقت بسیار بالا تخمین زده می‌شود.

طبق رابطه (۷)، مسئله یافتن بهینه مقادیر M_i به صورت زیر است:

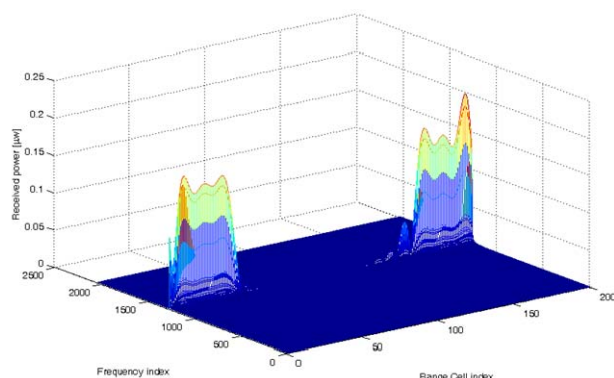
$$\begin{aligned} \arg \max_{M_i} & \sum_{j=1}^L \prod_{i \in \mathcal{R}_j} M_i \\ \text{subject to } & M_i \leq \frac{225}{M}; \quad i = 1, \dots, 4 \\ & \prod_{i \in \mathcal{R}_j} M_i \geq \frac{1000}{M}; \quad i = 1, \dots, 4 \\ & r_s = \frac{c}{2f_s} = 10 \end{aligned} \quad (19)$$

با حل رابطه فوق، مقادیر مناسب برای حالت‌های مختلف M به دست می‌آید که در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر M_i به ازای طراحی‌های مختلف انجام شده برای رادار در فرکانس ۱۰GHz

$M=20$	$M=16$	$M=12$	
۷	۹	۱۳	M_1
۹	۱۱	۱۵	M_2
۱۰	۱۳	۱۷	M_3
۱۱	۱۴	۱۸	M_4

برای ارزیابی طراحی انجام شده جهت مقابله با خطای بردسنجی که در رادار وجود دارد، به صورت تصادفی هدفی در فاصله $[0, 100\text{km}]$ قرار می‌گیرد. برد تخمین‌زده شده از این هدف خطا خواهد داشت و خطای در نظر گرفته شده، یک خطای گوسی با میانگین صفر و واریانس متغیر خواهد بود. در شکل ۵ جذر میانگین مربعات خطای تخمین برد بدون ابهام بر حسب تغییرات واریانس رسم شده است. در این شکل دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ روش باقیمانده چینی مقاوم [۱۳] و روش باقیمانده چینی ساده [۶]. همچنین این شبیه‌سازی به ازای مقادیر $M=12, 16, 20$ (مقدار مشترک دوره تکرار پالس) انجام شده است. با دقت در شکل درمی‌یابیم که در واریانس خطای کم، عملکرد روش باقیمانده چینی مقاوم بسیار بهتر از روش باقیمانده چینی ساده است. ماهیت رادار نیز به این صورت است که خطایی که در تخمین برد با ابهام وجود دارد محدود است؛ لذا استفاده از روش باقیمانده چینی مقاوم در کاربردهای راداری عملکرد بهتری دارد. همچنین هرچه M بیشتر باشد، عملکرد استخراج برد بدون ابهام بهتر انجام شده است و الگوریتم قادر است در صورت وجود خطای بزرگ‌تر در تخمین برد با ابهام، اقدام به استخراج صحیح برد بدون ابهام نماید. شبیه‌سازی انجام شده در هر نقطه به ازای ۳۰ هزار هدف انجام گرفته است و با میانگین‌گیری از نتایج اندازه‌گیری شده، شکل ۵ رسم شده است.

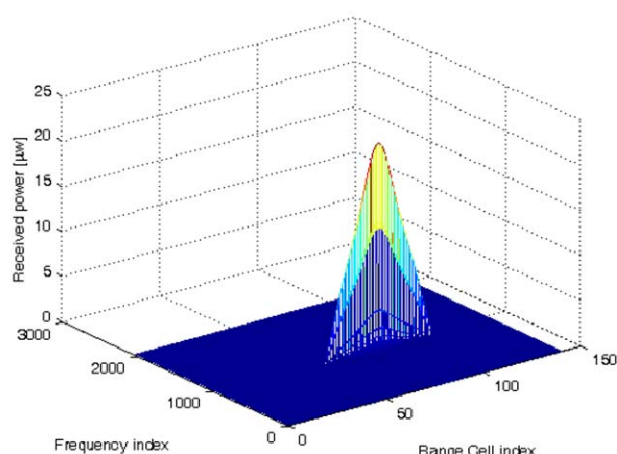


شکل ۸. نمایش دو بعدی سیگنال ورودی به آشکارساز به ازای فرکانس تکرار پالس ۷۵kHz

نیست اما در سه بسته دیگر به خوبی آشکارسازی می‌شود و لذا رفع ابهام در برد ممکن است.

سیگنال شکل ۸، حالتی است که افت گرفتگی باعث عدم آشکارسازی هدف شده است؛ حالتی که بیشتر اتفاق می‌افتد این است که افت گرفتگی باعث می‌شود سیگنال آشکارسازی شود اما برد با ابهام آن با خطا تخمین زده شود. روش ارائه شده این مقاله برای غلبه بر این مشکل این است که در مرحله طراحی رادار، یک هدف فرضی در نقاط مختلف فضا قرار گیرد به صورتی که حداقل یک محدوده برد بدون ابهام را از بسته ارسالی با دقت فاصله سلول‌های برد، تحت پوشش قرار دهد. مشاهده می‌شود که در فواصل ابتدایی و انتهایی محدوده برد، اعداد تخمین زده شده به‌عنوان برد با ابهام هدف دارای خطا هستند. در این مقاله از یک تابع درجه ۸ برای جبران خطای ناشی از افت گرفتگی استفاده شده است.

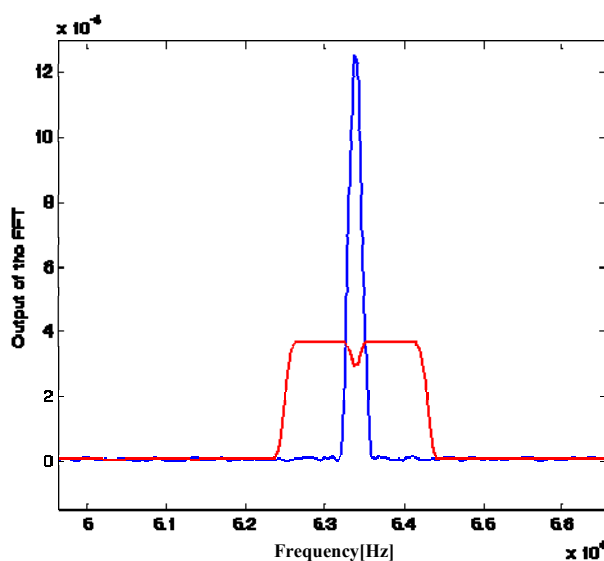
در رادار طراحی شده برای فرکانس کاری ۱۰GHz، حداکثر دوره تکرار پالس تقریباً $67/14 \mu\text{sec}$ است که معادل با برد $2/2 \text{ km}$ است. برای بررسی واقعی افت گرفتگی، در هر مرحله یک هدف در فاصله $[5 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ با گام سلول‌های برد که 10 m است، قرار داده می‌شود. به ازای هر هدف، ۴ بسته با فرکانس تکرار پالس طراحی شده طبق پارامترهای جدول ۱ ارسال می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها به صورتی انجام شده که از هدف در هر بسته، ۱۰۲۴ پالس دریافت شده باشد. همان‌گونه که پیش‌تر نیز گفته شد، توان سیگنال دریافتی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سیگنال به نویز دریافتی در گیرنده از حد مورد نیاز برای آشکارسازی مطلوب، بالاتر باشد. در شکل ۹ برد بدون ابهام هدف که نتیجه اعمال الگوریتم باقیمانده چینی مقاوم روی بردهای تخمین زده شده از آشکارساز رادار و در بسته‌های مختلف است، بر حسب برد واقعی آن نمایش داده شده است. در برخی از بردها، افت گرفتگی باعث می‌گردد که برد تخمین‌زده شده از هدف بسیار بیش از برد واقعی آن و محدوده پوشش رادار باشد.



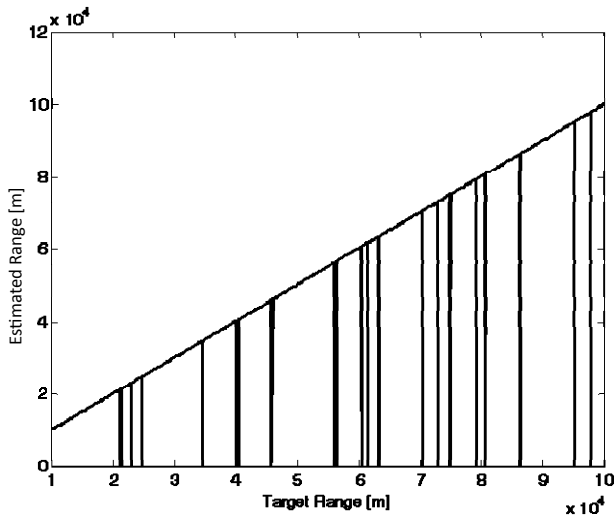
شکل ۶. نمایش دو بعدی سیگنال ورودی به آشکارساز به ازای فرکانس تکرار پالس ۱۰۷/۱۴kHz

اگر هدف در تمامی بسته‌ها به این صورت باشد در نهایت برد بدون ابهام آن با دقت بسیار خوب استخراج می‌شود. نحوه اعمال آشکارساز با نرخ هشدار کاذب ثابت در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل خروجی تبدیل فوریه در سلول برد شماره ۱۰۰ به رنگ آبی و واریانس نویز به رنگ قرمز است. برای اینکه هدف آشکارسازی شود باید سیگنال آبی رنگ به اندازه حد آستانه، بزرگتر از واریانس نویز باشد. الگوریتم آشکارسازی در تمامی سلول‌های حافظه در حوزه فرکانس انجام می‌گردد و به‌ازای هر هدف، فرکانس داپلر و برد با ابهام تخمین زده می‌شود.

در شکل ۸ نمایش دو بعدی سیگنال همان هدف به ازای فرکانس تکرار پالس ۷۵ kHz نشان داده شده است. به ازای این فرکانس تکرار پالس هدف دچار افت گرفتگی شده و در این بسته قابل آشکارسازی



شکل ۷. نمایش حوزه فرکانس سیگنال سلول برد شماره ۱۰۰

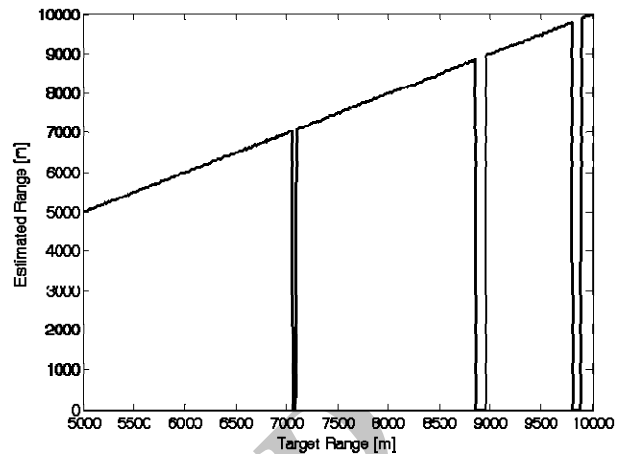


شکل ۱۰. برد تخمین زده شده بر حسب تغییر فاصله هدف در حالتی که پنج بسته به سمت هدف ارسال شود

۱۰m نشان داده شده است. افت گرفتگی در این حالت $1/67\%$ است که مقدار بسیار ناچیزی است.

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، روش نوین طراحی سیگنالینگ رادار پالس داپلر فرکانس بالا با رویکرد رفع ابهام در برد، به روش باقیمانده چینی مقاوم که اخیراً به چاپ رسیده ارائه شد. نحوه پردازش سیگنالینگ این رادارها مورد بررسی قرار گرفت و بلوک دیاگرام پردازشی آن و نحوه رفع ابهام در برد نیز ارائه گردید. مسئله افت گرفتگی که یکی از مشکلات اساسی رادارهای پالس داپلر فرکانس بالا است معرفی شد و تأثیر آن بر عملکرد رادار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روشی ساده و قابل پیاده سازی در رادارهای امروزی برای مقابله با خطاهای ناشی از افت گرفتگی معرفی شد. با انجام شبیه سازی عملکرد الگوریتم رفع ابهام در برد به روش باقیمانده چینی در حالتی که برد با ابهام تخمین زده شده، با خطا همراه باشد مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که این الگوریتم نتایج قابل قبولی دارد. با توجه به افت گرفتگی ناچیز که در شبیه سازی برای سیکل کاری 20% به دست آمد، به این نتیجه می رسیم که مسئله افت گرفتگی در این طراحی تا حد قابل قبولی حل شده است و مشکل اساسی ای برای آشکارسازی اهداف نخواهد داشت.



شکل ۹. برد تخمین زده شده برای هدفی که در نقاط مختلف فضا قرار

در این حالت پردازش داده، عدد تخمین زده شده به عنوان برد هدف را غیر قابل قبول می داند. در این موارد برد تخمین زده شده در شکل، صفر در نظر گرفته شده است. با شمارش تعداد نقاطی که در تخمین برد بدون ابهام دچار اشکال شده ایم و تقسیم آن بر تعداد بردهایی که هدف مورد آزمایش قرار گرفته است، افت گرفتگی به دست می آید. این عدد برای طراحی انجام شده با توجه به آنچه در شکل ۹ ملاحظه می کنید، $10/76\%$ است. در صورتی که احتمال آشکارسازی رادار کمتر از $0/85$ باشد، این عدد قابل قبول است و می توان با افزایش توان ارسالی، قدرت آشکارسازی رادار را بالا برد و افت گرفتگی را در احتمال آشکارسازی لحاظ کرد.

در صورتی که رادار طراحی شده یک رادار با احتمال آشکارسازی بالا باشد، افت گرفتگی 10% ، مشکل جدی ای برای رسیدن به احتمال آشکارسازی خواهد بود. در رادارهایی که احتمال آشکارسازی آنها بالا باشد، بایستی از تعداد بسته های بیشتری استفاده کرد تا احتمال اینکه هدف در سه بسته آشکارسازی شود، بیشتر گردد. طراحی انجام شده برای رادار فوق به ازای $M=20$ به گونه ای است که هیچ عدد دیگری برای M_5 می توان پیدا کرد که شرایط مسئله طراحی رادار را برقرار سازد. بنابراین در صورتی که به دنبال رادار با احتمال آشکارسازی بالا هستیم، باید طراحی رادار به ازای $M=16$ یا پایین تر انجام شود. برای این منظور بسته پنجم در حالتی که $M=16$ باشد دارای مقدار $M_5=7$ خواهد بود که متناظراً باعث می شود فرکانس تکرار پالس آن برابر $133/93\text{kHz}$ باشد. برای اینکه یک هدف آشکارسازی شده و رفع ابهام در برد در آن به خوبی انجام شود، باید ۳ بسته از ۵ بسته ارسالی آشکارسازی و رفع ابهام در برد انجام شود. در شکل ۱۰ نتیجه کار رادار به ازای $M=16$ و پنج بسته ارسالی رسم شده است. در این شکل برد بدون ابهام تخمین زده شده بر حسب تغییر فاصله هدف در بازه $[5\text{km}, 100\text{km}]$ با گام تغییرات

۸. مراجع

- [10] X. W. Li and X.-G. Xia, "A fast robust Chinese remainder theorem based phase unwrapping algorithm," *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 15, pp. 665-668, Oct. 2008.
- [11] X.-G. Xia and K. Liu, "A generalized Chinese remainder theorem for residue sets with errors and its application in frequency determination from multiple sensors with low sampling rates," *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 12, pp. 768-771, Nov. 2005.
- [12] X.-G. Xia and G. Wang, "Phase unwrapping and a robust Chinese remainder theorem," *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol. 14, pp. 247-250, Apr. 2007.
- [13] W. Wang and X. G. Xia, "A Closed-Form Robust Chinese Remainder Theorem and Its Performance Analysis," *IEEE Trans. on Signal Process.*, vol. 58, pp. 5655-5666, Nov. 2010.
- [14] S. I. Hovanessian, *Radar System Design and Analysis*. Dedham, MA: Artech House, 1984.
- [15] W. Skillman and D. Mooney, "Multiple High-PRF Ranging," in *IRE 5th National Convention on Military Electronics*, 1961, pp. 37-40.
- [16] F. Williams and M. Radant, "Airborne Radar and the Three PRFs," *Microwave j.*, pp. 129-133, Jul. 1983.
- [17] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Professional, 1989.
- [1] J. P. Stralka and W. G. Fedarko, "Pulsed Doppler Radar," in *Radar Handbook*, 3d Ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [2] D. C. Schlher, *MTI and Pulsed Doppler Radar*. Norwood, MA: Artech House, 1991.
- [3] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*. New York: Mc-Graw-Hill, 2003.
- [4] N. Levanon and E. mozeson, *Radar Signals*. U.S.A: Wiley, 2010.
- [5] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd Ed. New Jersey: SciTech Publishing Inc., 1998.
- [6] O. Ore, "The general Chinese remainder theorem," *Amer. Math. Monthly*, Vol. 59, pp. 365-370, Jun.-Jul. 1952.
- [7] O. Goldreich, D. Ron, and M. Sudan, "Chinese remaindering with errors," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 46, pp. 1330-1338, Jul. 2000.
- [8] V. Guruswami, A. Sahai, and M. Sudan, "Soft-decision decoding of Chinese remainder codes," in *Proc. 41st IEEE Symp. Foundations Computer Science*, Redondo Beach, pp. 159-168, 2000.
- [9] X. W. Li, H. Liang, and X.-G. Xia, "A robust Chinese remainder theorem with its applications in frequency estimation from undersampled waveforms," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 57, pp. 4314-4322, Nov. 2009.