

آشکارسازی اهداف دریایی با استفاده از تشعشعات ماهواره‌ای با به کارگیری وزن‌های فیلترهای وقتی

سلیمان حاجی صادقیان نجف‌آبادی^۱، عباس شیخی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۰۴)

چکیده

با توجه به مزایایی که رادارهای پسیو دارا می‌باشند این رادارها اخیراً با توجه به رشد تکنولوژی پردازش مجدداً مورد توجه قرار گرفته‌اند. در زمینه آشکارسازی اهداف دریایی با استفاده از رادارهای پسیو کارهای معدودی انجام گرفته است. در این مقاله با بررسی‌های صورت گرفته، تشعشعات ماهواره‌ای مناسب، جهت کشف اهداف دریایی، به‌عنوان فرستنده مغتنم معرفی شده است. در روش جدیدی که برای این کاربرد در این مقاله حاضر ارائه شده است، با استفاده از وزن‌های فیلتر وقتی و این نکته که در مورد اهداف دریایی، سطح مقطع راداری هدف، نسبت به سطح مقطع راداری سلول‌های کناری که مربوط به کلاتر دریاست، بیشتر است، به آشکارسازی اهداف دریایی پرداخته می‌شود (در این روش از تابع ابهام استفاده نمی‌شود). در واقع وزن‌های فیلتر وقتی بیان‌کننده تغییرات فاز و تأخیر هدف می‌باشند و با استفاده از این وزن‌ها می‌توان به کشف هدف پرداخت. در این مقاله به توضیح جزئیات این روش و مقایسه این روش با روش‌های سنتی و همچنین مقایسه عملکرد فیلترهای وقتی مختلف در مورد این کاربرد پرداخته می‌شود.

واژگان کلیدی: رادارهای پسیو، اهداف دریایی، فیلتر وقتی، آشکارسازی در حضور کلاتر.

۱. مقدمه

برای آشکارسازی اهداف هوایی پرداخته شده است که نتایج نشان می‌دهد که این سیستم راداری برای آشکارسازی اهداف هوایی در برد میانی مناسب می‌باشد.

در مرجع [۲] نیز به آشکارسازی اهداف دریایی با استفاده از رادار پسیو مبتنی بر سیگنال DVB-T پرداخته شده است و در آن از فیلتر وینر برای حذف کلاتر و از روش D^3 برای حذف سیگنال مسیر مستقیم در سناریوی STAP استفاده شده است. در مقاله حاضر، فرض استفاده از یک آنتن و با یک پرتو، جهت کشف هدف مطرح است. لذا رویکرد STAP قابل به کارگیری نمی‌باشد. از سوی دیگر روش D^3 بطور نسبی دارای بار محاسباتی بالایی می‌باشد.

در این مقاله با استفاده از پردازش وزن‌های فیلتر وقتی و بهره بردن از این نکته که سطح مقطع راداری اهداف دریایی، نسبت به سطح مقطع راداری کلاتر دریا، در سلول‌های تفکیک مجاور بیشتر هستند، روشی ارائه شده است که در مقایسه با دو روش، حذف کلاتر با استفاده از فیلتر وقتی و تابع ابهام برای آشکارسازی هدف و همچنین استفاده از تابع ابهام برای آشکارسازی، بدون حذف کلاتر با استفاده از فیلتر وقتی، بسیار کارا تر است.

رادارهای پسیو هیچ نوع فرستنده اختصاصی ندارند و در عوض از فرستنده‌های مغتنم موجود در محیط بهره می‌گیرند. همین امر موجب می‌شود که این نوع رادارها مزیت‌هایی را داشته باشند که عبارتند از: پایین بودن هزینه ساخت، پایین بودن هزینه نگهداری به دلیل نداشتن فرستنده، پنهان کاری راداری به علت نداشتن امواج ارسالی، اندازه کوچکتر نسبت به رادارهای اکتیو، امکان ردیابی و مقابله با جنگنده‌های پنهان کار به دلیل ماهیت چند پایه، مقاوم در برابر جیمینگ و غیر قابل ردیابی توسط موشک‌های ضد تشعشع. البته معایبی نیز دارند که عبارتند از: پیچیدگی تکنولوژی ساخت این رادارها و غیر قابل اعتماد بودن در شرایطی که نویز محیط زیاد است. در خصوص مسئله آشکارسازی اهداف دریایی در رادارهای پسیو، تحقیقات کمی انجام شده و استفاده از تشعشعات ماهواره‌ای در این کاربرد تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است.

در مرجع [۱] به صورت کلی به طراحی رادار پسیو با استفاده از تشعشعات ماهواره‌ای GEO و مقایسه دو ماهواره EMEA I-4 و W2A

² Direct Data Domain

* ایمیل نویسنده پاسخگو : sheikhi@shirazu.ac.ir

۲. بررسی ماهواره GEO استفاده شده

سیگنال ماهواره‌های GEO به سه دلیل برای رادارهای پسیو مناسب می‌باشند:

- ۱- مشخصات موج ارسالی (EIRP بالا، پهنای باند مناسب، پیوستگی ارسال و ...)
- ۲- ناحیه همگرایی وسیع
- ۳- سادگی پردازش (به خلاف ماهواره‌های LEO و MEO نیاز به ردیابی موقعیت ماهواره و تغییرات فرکانس داپلر ندارد که این امر به دلیل موقعیت ثابت ماهواره‌های GEO نسبت به زمین می‌باشد).

برای استفاده از سیگنال ماهواره‌های GEO به منظور آشکارسازی لازم است با توجه به منطقه‌ای که قرار است آشکارسازی صورت گیرد، ماهواره‌های مناسب شناسایی شوند.

با توجه به بررسی‌هایی که صورت گرفته، از جمله ماهواره‌های GEO ای که روی ایران دارای سیگنال قوی می‌باشند می‌توان به AMOS 3، Intelsat 1002، Badr-5 و Inmarsat I-4 EMEA اشاره کرد که در این مقاله از سیگنال ماهواره Inmarsat I-4 EMEA در پرتو spot آن استفاده شده است. دلیل استفاده از این ماهواره EIRP بالای آن و همچنین سهولت ساخت آنتن آرایه‌ای با سطح مؤثر بزرگ و تعداد المان کم به علت طول موج نسبتاً بلند (باند L) در این ماهواره می‌باشد.

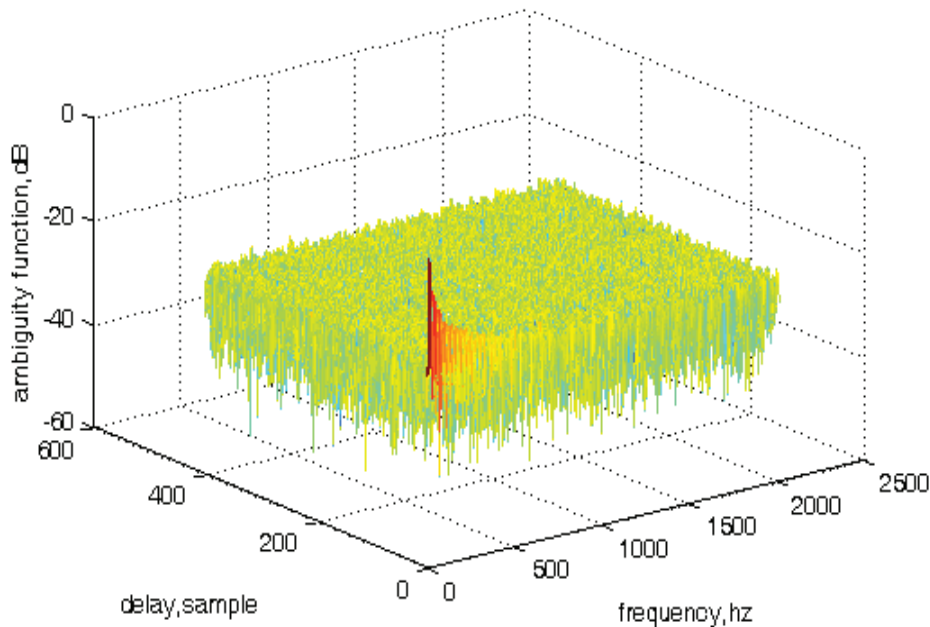
مشخصات کلی این ماهواره در جدول ۱ آمده است [۱]. نوع مدولاسیون این ماهواره در بیم 16-QAM، spot می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات ماهواره Inmarsat I-4

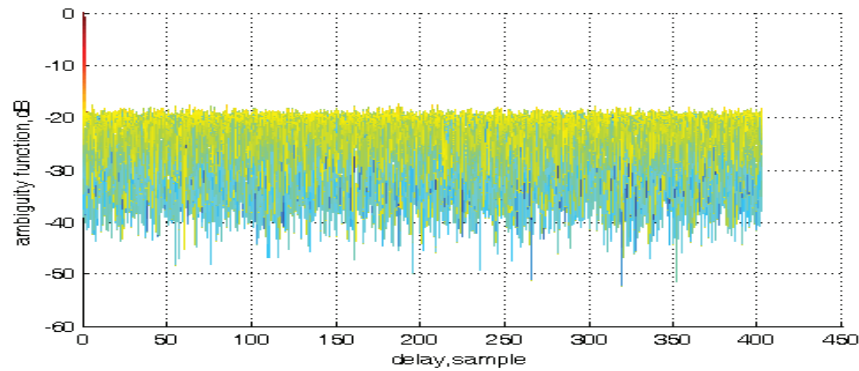
Latitude/Longitude	0° / 25.12° E
Height	35800 Km
EIRP	67 dBW
Carrier frequency	1.5 GHz
Signal Bandwidth	200 KHz
Coverage	Europe – Africa – Middle Asia

۲-۱. بررسی تابع ابهام سیگنال Inmarsat I-4

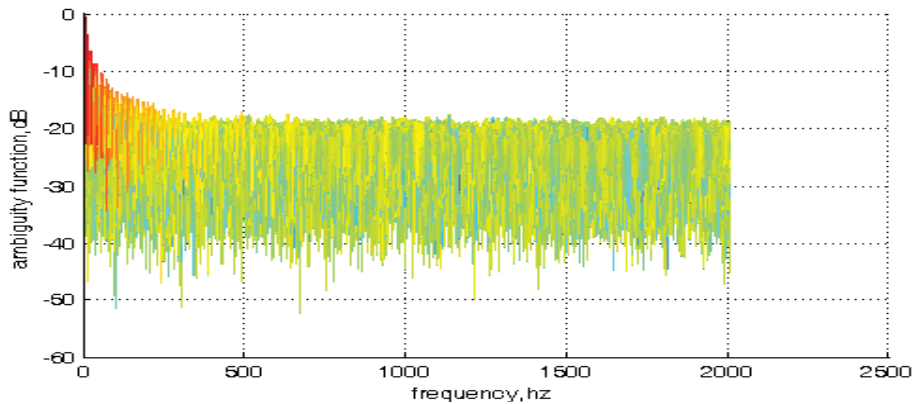
تابع ابهام سیگنال این ماهواره، در طول زمان شبیه‌سازی 62.5ms در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل و شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند تابع ابهام سیگنال این ماهواره دارای ابهام نمی‌باشد و از این جنبه برای استفاده در رادار پسیو مناسب است. سطح لوب‌های تابع ابهام چه در بعد برد و چه در بعد داپلر به -20dB محدود می‌شود که این امر باعث کاهش برد رادار، در رویکرد مبتنی بر تابع ابهام می‌گردد؛ چرا که اهداف و کلاترهای نزدیک، مانع کشف اهداف دور می‌شوند.



شکل ۱. تابع ابهام سیگنال Inmarsat I-4



شکل ۲. تابع ابهام سیگنال Inmarsat I-4 در راستای زمان (fs=604800 hz)



شکل ۳. تابع ابهام سیگنال Inmarsat I-4 در راستای داپلر

خواهند شد، اما اگر در این کاربرد بتوان به گونه‌ای سیگنال دریافتی را در حد پهنای لوب اصلی تابع ابهام سیگنال در برد، به مولفه‌های شکل دهنده‌اش افزاز نمود، در آن صورت چون سطح مقطع راداری اهداف راداری، نسبت به سطح مقطع راداری کلاتر، در گستره‌ی یک سلول تفکیک بسیار بیشتر است، می‌توان اهداف را از کلاتر تمیز داد. ایده‌ای که در این مقاله دنبال می‌شود، استفاده از ویژگی فوق و بهره‌گیری از وزن‌های فیلترهای وقتی جهت بسط سیگنال دریافتی متشکل از نمونه‌های تأخیر یافته و تضعیف شده‌ی سیگنال مرجع به مولفه‌های خود است و در مرحله بعد با اعمال پردازش‌های CFAR روی طیف وزن‌های فیلتر وقتی اقدام به کشف اهداف می‌نماییم. ساختار کلی فیلترهای وقتی transversal غیر برگشتی، به صورت شکل ۴ است که تنها تفاوت فیلترهای وقتی مختلف، مکانیزم کنترل وزن می‌باشد. بر خلاف روش‌های گذشته که از سیگنال خطای خروجی فیلتر با همان $e(n)$ برای آشکارسازی اهداف استفاده می‌شود، در روش پیشنهادی از آنالیز طیفی وزن‌های فیلتر وقتی به عنوان آماره‌ی آشکارسازی استفاده می‌شود.

۳. تبیین الگوریتم پیشنهادی

یکی از روش‌های حذف کلاتر و تداخل مسیر مستقیم، استفاده از فیلترهای وقتی در حوزه زمان می‌باشد. تاکنون این روش‌ها در حذف کلاتر و تداخل مسیر مستقیم، جهت آشکارسازی اهداف هوایی به کار گرفته شده‌اند [۳]. در این کاربردها سیگنال‌های مزاحم نسبت به سیگنال کانال مرجع، تنها دارای تأخیر و تضعیف هستند که با فیلترهای وقتی قابل حذف می‌باشند اما سیگنال اهداف، علاوه بر تأخیر و تضعیف دارای شیفت داپلر نیز هستند که این امر موجب عدم حذف آنها در خروجی فیلتر وقتی می‌گردد. لذا در این کاربردها در خروجی فیلتر وقتی تداخل‌های با داپلر صفر، حذف شده و اکوهای با داپلر غیر صفر باقی می‌ماند و سپس با محاسبه تابع ابهام، کشف و ردیابی می‌شوند [۴]. در حالی که در کاربرد کشف اهداف دریایی، کلاتر، تداخل مسیر مستقیم و اهداف همگی دارای داپلر تقریباً برابر با صفر هستند. لذا اگر از روش‌های متداول استفاده شود، در خروجی فیلتر وقتی اهداف نیز حذف

ضرایب دامنه و فرکانس‌های داپلر را در خود جا داده‌اند. بنابراین با توجه به اینکه ضریب دامنه هدف از ضریب دامنه کلاتر، در گستره یک سلول تفکیک بیشتر است، دامنه وزن مربوط به هدف از دامنه وزن‌های کناری بیشتر است و به این‌صورت هدف قابل تشخیص است. بنابراین در این روش تعداد سلول‌های برد برابر با تعداد وزن‌های فیلتر وقتی است. در نتیجه اگر تعداد وزن‌های فیلتر وقتی ۱۰۰ باشد، با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۶۰۴۸۰۰ هرتز، تا برد ۴۹ کیلومتر را پوشش می‌دهد.

آشکارساز CFAR به‌کارگرفته شده به‌خاطر خصوصیت سیستم، آشکارساز CA-CFAR می‌باشد. حال اگر خروجی قسمت قبل را به این آشکارساز بدهیم، تأخیر و داپلر هدف را به‌درستی شناسایی می‌کند. همان‌گونه که خواهیم دید این روش نسبت به روش سنتی آشکارسازی با استفاده از تابع ابهام، در آشکارسازی اهداف دریایی بسیار کارآمدتر است.

۳-۱. بررسی اثر تغییرات فرکانس داپلر و فاصله هدف بر روی نحوه تغییرات وزن‌های فیلتر وقتی

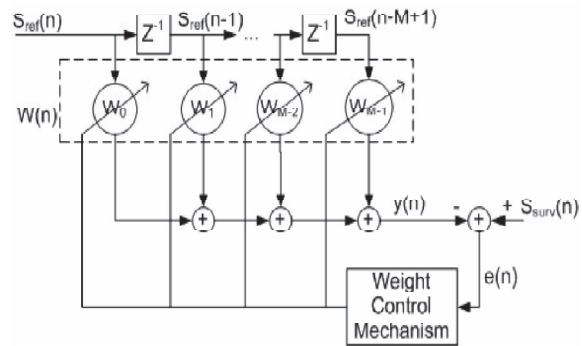
با بررسی وزن‌های فیلتر وقتی متوجه می‌شویم که با تغییر فاصله هدف، شماره قوی‌ترین وزن فیلتر نیز تغییر می‌کند که این امری واضح است. با بررسی فاز وزن‌ها نیز درمی‌یابیم که با تغییر فرکانس داپلر، فاز وزن‌ها نیز تغییر می‌کند.

این مسئله در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. برای نشان دادن این موضوع از فیلتر LMS با اندازه گام ۰/۰۱ استفاده شده است که برای فیلترهای وقتی NLMS و RLS نیز قابل تعمیم است. در این قسمت یک هدف در تأخیر ۶۵ نمونه و ۵ کلاتر در تأخیرهای ۶۰، ۶۴، ۶۵، ۶۶ و ۷۰ نمونه قرار دارند که دامنه هدف ۱ و دامنه کلاترها ۰/۶ و با داپلر صفر و SNR ورودی نیز ۰dB در نظر گرفته شده است. در کلیه شبیه‌سازی‌ها، زمان جمع‌آوری داده، ۱ ثانیه و فرکانس نمونه‌برداری ۶۰۴۸۰۰ هرتز می‌باشد. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری، هدف در تأخیر ۶۵ نمونه، معادل با برد ۳۲۲۴۲ متر می‌باشد.

در شکل ۵، ۶ و ۷ فاز ایده‌آل متناظر با داپلر هدف نیز بر روی تراژکتوری فاز فیلتر وقتی رسم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود تراژکتوری فاز وزن فیلتر وقتی، تطابق خوبی با تغییرات فاز ایده‌آل متناظر با داپلر هدف دارد. (فاز ایده‌آل متناظر با فرکانس داپلر نرمالیزه شده f_d برابر با $2\pi f_d n$ می‌باشد).

۳-۲. تحلیل طیفی وزن‌ها

دیدیم که تغییر داپلر و فاصله هدف، تأثیر مستقیمی بر کیفیت تغییرات وزن متناظر با فاصله هدف دارد و با تغییر داپلر هدف، فاز مربوط به وزن هدف تغییر می‌کند. بدین ترتیب اگر تعداد وزن‌های فیلتر وقتی برابر با M و طول مدت آموزش بعد از حذف نمونه‌های گذرای فیلتر برابر با N نمونه باشد، خروجی روش پیشنهادی یک ماتریس $M \times N$ است که مشابه خواص صفحه برد، پالس یک رادار



شکل ۴. ساختار کلی فیلتر وقتی

به‌عنوان نمونه اگر فیلتر وقتی استفاده شده، فیلتر LMS باشد، وزن‌های آن با استفاده از روابط (۱)، (۲) و (۳) به‌روزی می‌گردند.

$$y(n) = w^H(n)S(n) \quad (1)$$

$$e(n) = S_{surv}(n) - y(n) \quad (2)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu S(n)e^*(n) \quad (3)$$

M مرتبه فیلتر، μ اندازه گام فیلتر، W بردار وزن‌ها، $S_{surv}(n)$ سیگنال دریافتی از هدف و $S(n)$ نیز برداری متشکل از M نمونه آخر $S_{ref}(n)$ می‌باشد [۵] و [۶].

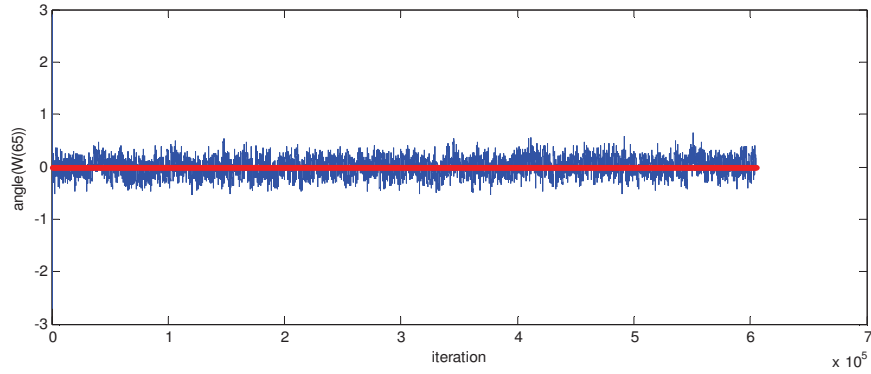
معادلات (۲) و (۳) نشان می‌دهند که هر چه $S_{surv}(n)$ بزرگتر باشد وزن فیلتر وقتی نیز اندازه بزرگتری دارد. در نتیجه سیگنال بازگشتی از هدف وقتی وارد فیلتر می‌شود، در پردازش وقتی، وزن نمونه‌ای که مربوط به تأخیر متناظر با هدف است، از وزن نمونه‌های اطراف که مربوط به کلاتر دریاست، مقدار بزرگتری خواهد داشت. پس وزن‌های فیلتر وقتی می‌توانند نشان‌دهنده تأخیر هدف باشند. حال اگر سیر تغییرات هر یک از این وزن‌ها را مثلاً با اندازه FFT تحلیل طیفی نماییم، خروجی حاصل، محتوای فرکانس منعکس کننده‌های سلول فاصله متناظر با هر وزن را دارا می‌باشد. با توجه به اینکه هدف نسبت به کلاتر اطراف خود قوی‌تر است، خروجی در تأخیر و فرکانس داپلر مربوط به هدف، نسبت به سلول‌های همسایه قوی‌تر است. این شرایط برای فیلترهای وقتی NLMS و RLS نیز قابل تعمیم است. به بیانی دیگر سیگنال دریافتی از منعکس کننده‌های مختلف (اهداف و کلاتر) از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$S_{surv}(n) = \sum_L a_L S_{ref}(n - n_L) \exp(j2\pi f_{dL} n) \quad (4)$$

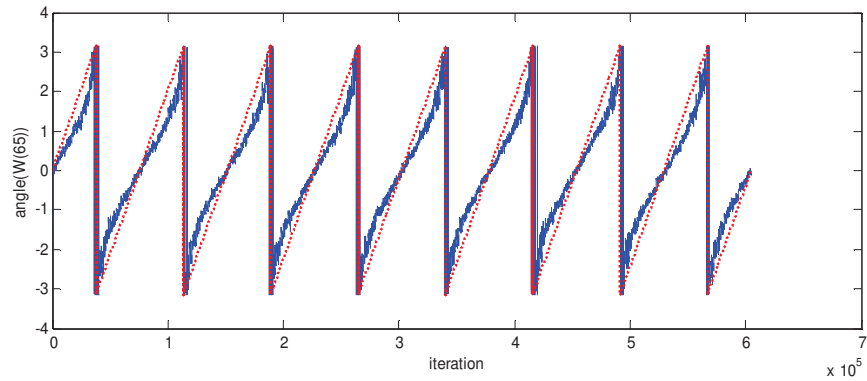
در این رابطه n_L ، a_L ، f_{dL} به ترتیب دامنه، تأخیر و داپلر منعکس کننده L ام می‌باشند. با توجه به اینکه فیلترهای وقتی در طول کار، با تغییر وزن‌های خود سعی در بازسازی سیگنال $S_{surv}(n)$ به‌صورت ترکیب خطی سیگنال مرجع و تأخیر یافته‌های آن پس از مدوله کردن هریک با دنباله وزن متناظر می‌نمایند، $(\sum_L W_L(n) S_{ref}(n - n_L))$ انتظار می‌رود که در فیلتر وقتی وزن متناظر با تأخیر n_L در حالت ایده‌آل برابر با $\exp(j2\pi f_{dL} n)$ بوده و در عمل، نزدیک به آن باشد. لذا وزن‌های فیلتر وقتی، اطلاعات

نمودارهای زیر نشان می‌دهند، قله اندازه FFT، وزن متناظر با فاصله هدف در فرکانس متناظر با داپلر هدف است. شرایط شبیه‌سازی سیگنال هدف و کلاتر مشابه بخش ۱-۳ است.

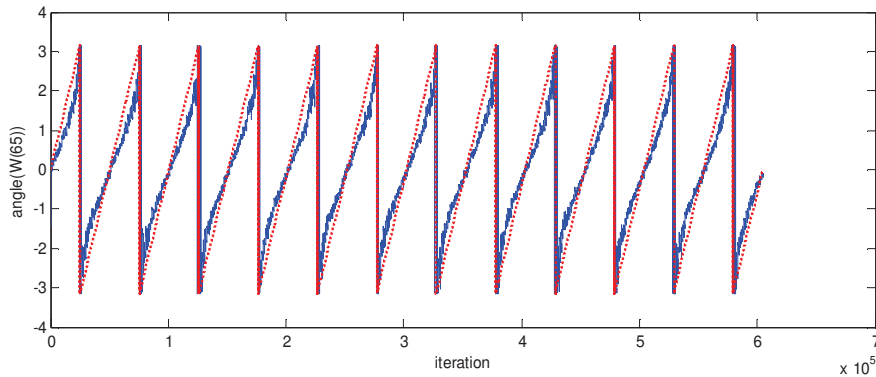
فعال با M سلول فاصله و N پالس دریافتی در یک CPI^1 را دارا می‌باشد. لذا می‌توان از روش‌های پردازشی مشابه استفاده نمود. در ادامه به بررسی خواص FFT وزن‌ها می‌پردازیم. همان‌طورکه



شکل ۵. فاز مربوط به وزن متناظر با تأخیر هدف، با داپلر صفر هرتز به همراه فاز ایده‌ال

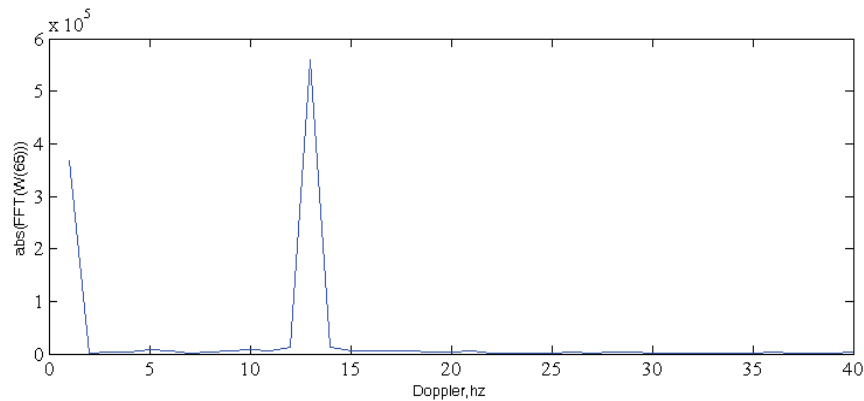


شکل ۶. فاز مربوط به وزن متناظر با تأخیر هدف، با داپلر ۸ هرتز به همراه فاز ایده‌ال

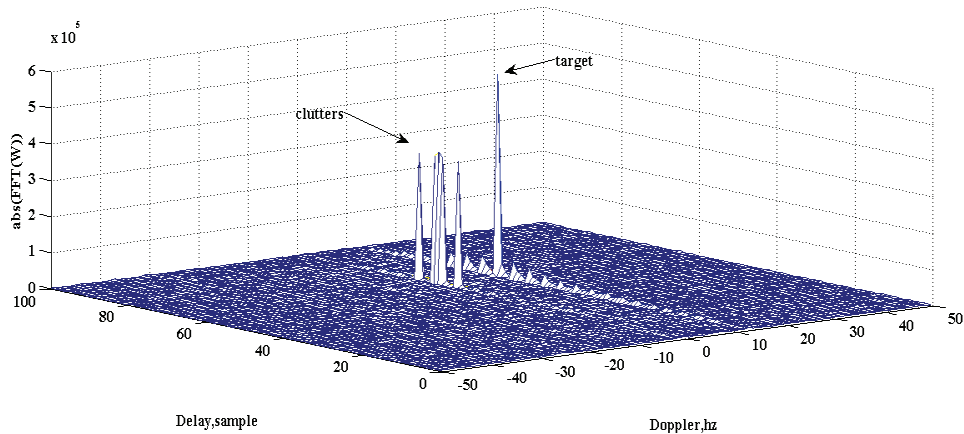


شکل ۷. فاز مربوط به وزن متناظر با تأخیر هدف، با داپلر ۱۲ هرتز به همراه فاز ایده‌ال

¹ Coherent Processing Interval



شکل ۸. اندازه FFT وزن متناظر با هدف (هدف با تأخیر ۶۵ نمونه) با داپلر ۱۲ هرتز



شکل ۹. اندازه کلیه FFT وزنها

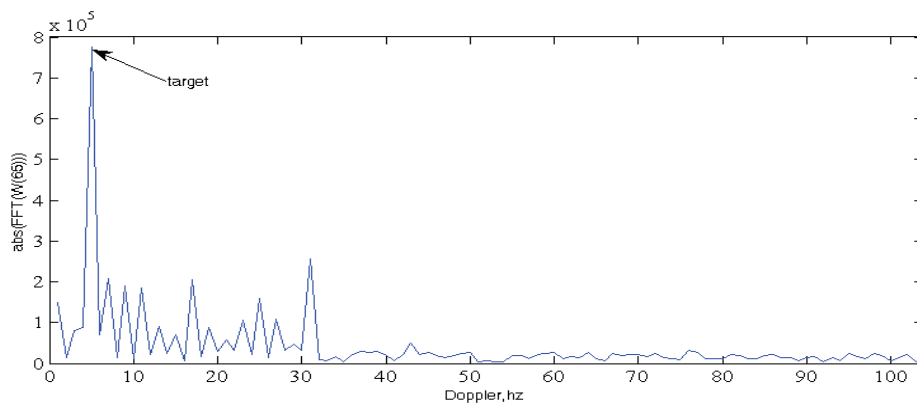
σ_0 در نظر گرفته شده برای کلاتر دریا $1m^2/m^2/0.1$ می باشد [۷، ص ۴۲۵]. پهناي زاويه‌اي هر سلول کلاتر برابر با پهناي پرتو در سمت آنتن گیرنده رادار يعني ۶ درجه در نظر گرفته شده است. طول هر سلول فاصله نیز متناظر با فواصل نمونه برداری یعنی $496/0.3$ متر لحاظ شده است. کلاتر در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی‌های ارائه شده در بخش‌های بعدی نیز به همین صورت است. کلاتر دریا در تمام سلول‌های فاصله وجود دارد و توان آن طبق معادله رادار در هر سلول محاسبه شده است. لازم به ذکر است پهناي هر سلول فرکانس یا frequency-bin برابر با یک هرتز می باشد. خروجی قسمت آشکارساز CA-CFAR حول هدف به صورت ماتریسی است که در حالت ایده‌ال فقط درایه مربوط به هدف آن یک است و بقیه درایه‌ها صفر هستند. همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، سلول هدف نسبت به سلول‌های کناری خود اندازه بیشتری دارد.

۳-۳. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

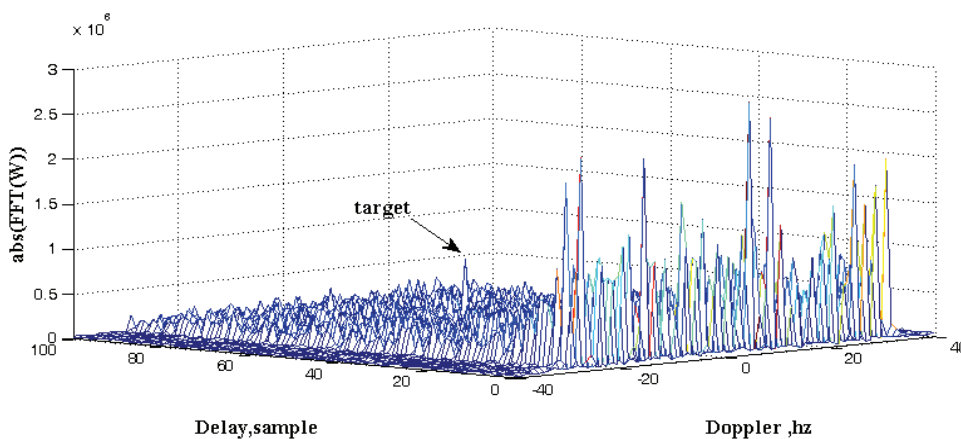
بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. آشکارساز CFAR به کار گرفته شده به خاطر خصوصیت سیستم، آشکارساز CA-CFAR دو بعدی می باشد. حال اگر اندازه FFT را به این آشکارساز بدهیم، تأخیر و داپلر هدف را به درستی شناسایی می‌کند. این روش نسبت به روش سنتی، در آشکارسازی با استفاده از تابع ابهام، در آشکارسازی اهداف دریایی، بسیار کارآمدتر است. خروجی واحد اندازه FFT وزنها برای سناریویی شامل یک هدف با داپلر ۴ هرتز، برد 32242 متر و RCS برابر با 600 متر مربع در حضور کلاتر دریا در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است (هدف در هر دو شکل با پیکان مشخص شده است). مدل در نظر گرفته شده برای کلاتر دریا دارای توزیع رابلی است که در پهناي باند 30 - هرتز تا 30 هرتز با اختلاف دو هرتز پخش شده است.



شکل ۱۰. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی



شکل ۱۱. اندازه FFT وزن مربوط به هدف



شکل ۱۲. اندازه FFT وزن‌ها

در برد، قدری بهتر از مقدار مورد انتظار است. حد تفکیک در داپلر مورد انتظار نیز برابر با $\frac{1}{T}$ است که با توجه به زمان جمع آوری داده، ۱ ثانیه، یک هرتز می‌باشد [۸، ص ۱۱].

در بررسی حد تفکیک در داپلر رویکرد پیشنهادی، در حالتی که اختلاف دو هدف در داپلر یک هرتز است هر دو هدف تشخیص داده می‌شوند ولی از هم جدا نمی‌شوند. زمانی که دو هدف، دو هرتز در داپلر اختلاف دارند، هر دو هدف به صورت کاملاً مجزا آشکار می‌شوند شکل ۱۳. خروجی آشکارساز برای هر دو حالت در شکل ۱۴ آمده است. برای بررسی حد تفکیک در برد رویکرد پیشنهادی نیز دو هدف با اختلاف برد ۹۹۲ متر (معادل دو نمونه) به صورت مجزا از هم تشخیص داده می‌شوند. این موضوع در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ آمده است RCS هدف، ۱۰۰۰ متر مربع در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در روش سنتی با همان نرخ نمونه‌برداری و زمان جمع آوری داده و RCS برابر با ۳۰۰۰ متر مربع، در بررسی حد تفکیک در داپلر در حالتی که دو هدف در داپلر، ۳ هرتز اختلاف دارند (همان‌طور که شکل ۱۸ نشان می‌دهد)، یک هدف با داپلر ۴ هرتز تشخیص داده می‌شوند ولی اگر اختلاف به ۴ هرتز برسد دو هدف از هم به‌طور مجزا تشخیص داده می‌شوند.

۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی روش ارائه‌شده با روش سنتی

همان‌طور که اشاره شد در صورتی که برای حذف کلاتر در آشکارسازی اهداف دریایی از فیلتر وقتی استفاده شود، اگر داپلر هدف، پایین باشد به همراه حذف کلاتر، هدف نیز حذف می‌شود و در خروجی تابع ابهام، هدف آشکار نمی‌شود. لذا این روش برای کشف اهداف با داپلر پایین مناسب نیست. از سوی دیگر اگر بدون استفاده از فیلتر وقتی و تنها با استفاده از تابع ابهام به آشکارسازی بپردازیم، تا حدی می‌توان اهداف قوی را کشف کرد. به همین دلیل در ادامه به مقایسه این دو روش می‌پردازیم.

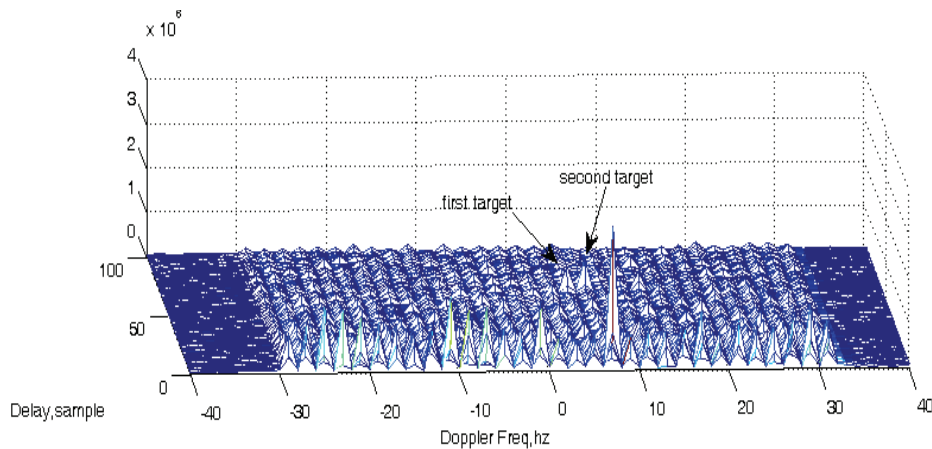
۴-۱. مقایسه دو روش براساس حد تفکیک در برد و داپلر

به‌عنوان قاعده‌ای سرانگشتی، حد تفکیک در تأخیر قابل انتظار برای یک سیگنال داده شده، تقریباً برابر با $\frac{1}{B}$ عنوان می‌گردد (که B پهنای باند سیگنال است که با توجه به $B=200\text{kHz}$ و فرکانس نمونه 604800Hz معادل ۳ نمونه است). حال با توجه به هندسه دو پایه رادار پسیو $\frac{1}{B}$ تأخیر معادل با $\frac{c}{B}$ در برد می‌شود (c سرعت نور است). در روش پیشنهادی همان‌طوری که در ادامه خواهیم دید، حد تفکیک

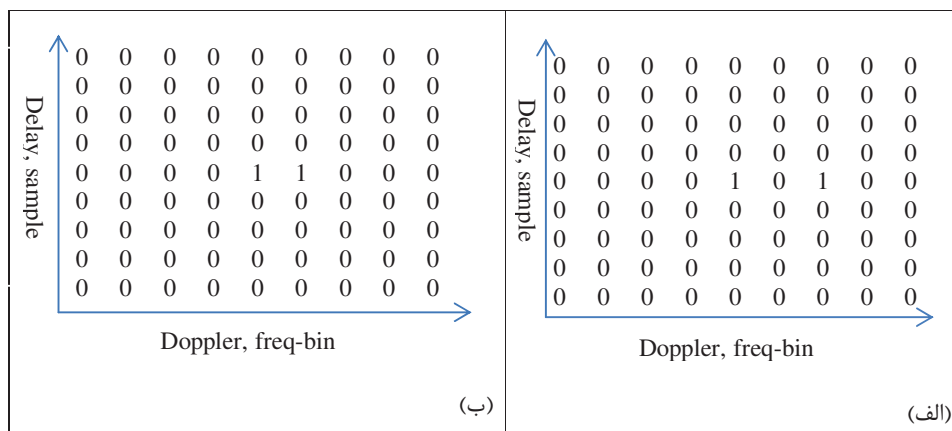
۴-۲. مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش تابع ابهام، براساس قابلیت کشف اهداف ضعیف در حضور اهداف قوی

با توجه به اینکه در زمان شبیه‌سازی 62.5ms سطح لوب‌های تابع ابهام به 20dB- محدود می‌شوند (البته در زمان شبیه‌سازی ۱ ثانیه این مقدار کاهش می‌یابد)، بنابراین در آشکارسازی با روش تابع ابهام، هدف قوی مانع کشف هدف ضعیف می‌شود. به همین منظور دو هدف در برد ۲۹۷۶ متری (معادل ۶ نمونه تأخیر) و برد ۴۶۶۲۴ متری (معادل ۹۴ نمونه تأخیر) قرار می‌دهیم و منحنی pd بر حسب RCS را برای هدف ضعیف به دست می‌آوریم. این نتایج در (شکل‌های ۲۱ و ۲۲) برای هر دو روش نشان داده شده است. RCS هدف قوی برای هر دو روش برابر با ۲۲۰۰۰۰ متر مربع است.

برای حد تفکیک در برد نیز اگر اختلاف برد دو هدف ۲۹۷۶ متر (معادل ۶ نمونه) باشد، دو هدف از هم به‌طور مجزا تشخیص داده می‌شوند. این موضوع در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آمده است. همان‌طور که خروجی آشکارساز سناریوی شکل ۱۹ نشان می‌دهد، در روش تابع ابهام، هدف در برد پخش شده است که این امر موجب افت تفکیک پذیری در این حالت در برد شده است. فیلترتوقی استفاده شده در روش پیشنهادی در شبیه‌سازی‌های این بخش، LMS با اندازه گام ۰/۰۱ می‌باشد که البته برای دو فیلترتوقی NLMS و RLS نیز حد تفکیک‌ها به همین مقدار می‌باشند. ضمناً CFAR استفاده شده دارای ماسک ماتریسی به ابعاد 7x7 است که محدوده 3x3 وسط آن به‌عنوان محدوده محافظ حذف شده است.

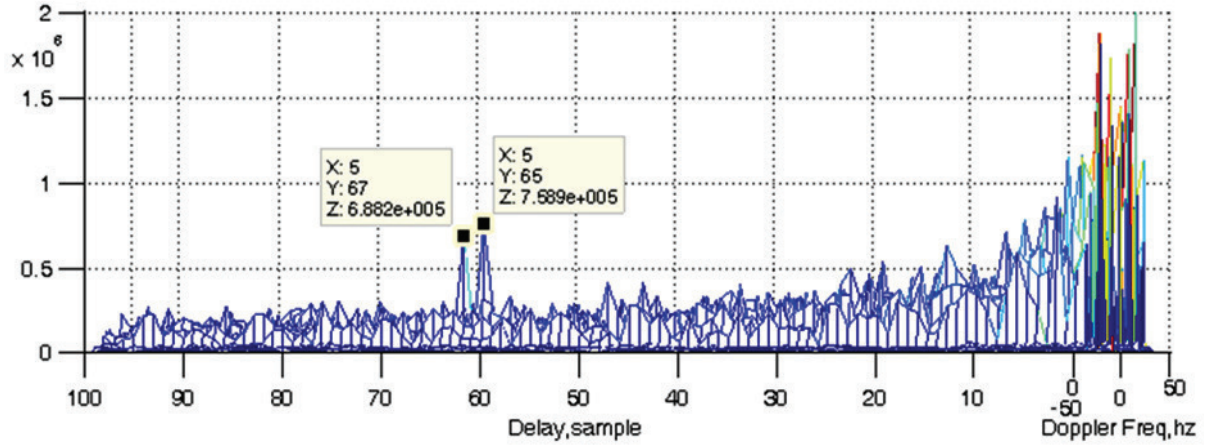


شکل ۱۳. نمایش حد تفکیک در داپلر برای روش ارائه‌شده، برای تشخیص دو هدف در برد یکسان (هدف اول در داپلر ۴ هرتز و تأخیر ۶۵ نمونه و هدف دوم در داپلر ۶ هرتز و همان تأخیر)

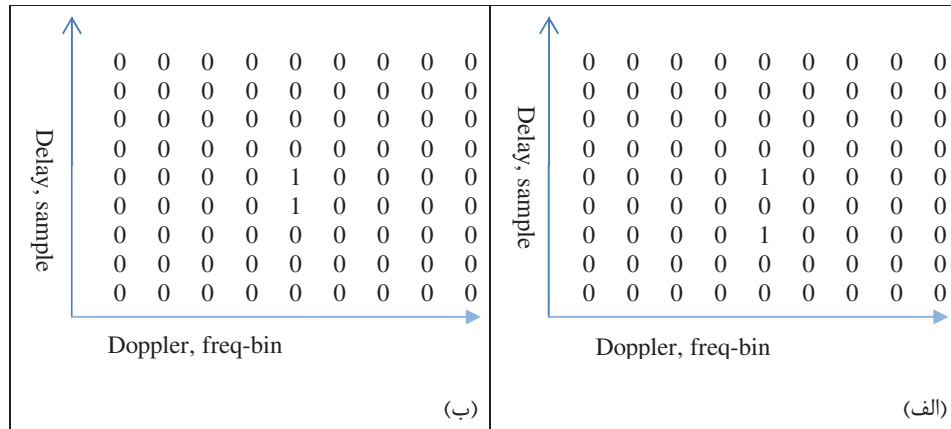


شکل ۱۴. خروجی آشکارساز برای روش پیشنهادی

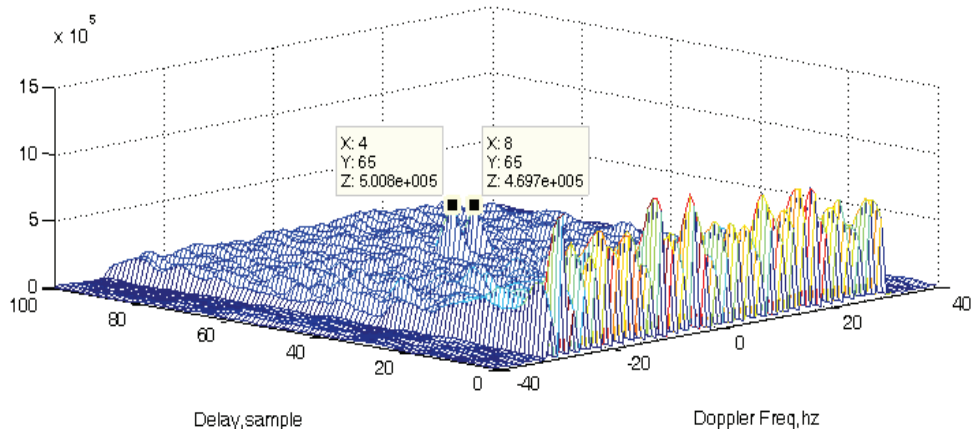
(الف) دو هدف با اختلاف دو هرتز در داپلر (خروجی سناریوی شکل ۱۳). (ب) دو هدف با اختلاف یک هرتز در داپلر



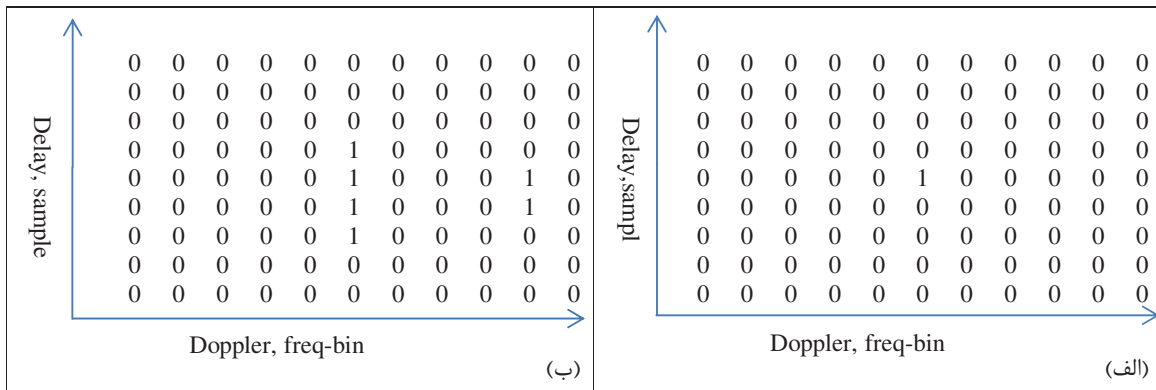
شکل ۱۵. نمایش حد تفکیک در برد برای روش ارائه‌شده، برای تشخیص دو هدف در داپلر یکسان (هدف اول در داپلر ۴ هرتز و تأخیر ۶۵ نمونه که معادل برد ۳۲۲۴۲ متر است و هدف دوم در همان داپلر و تأخیر ۶۷ نمونه)



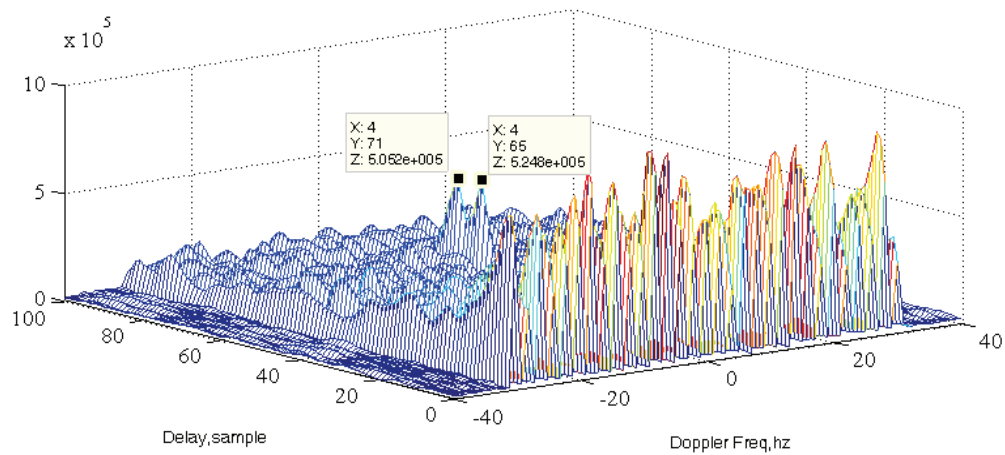
شکل ۱۶. خروجی آشکارساز برای روش پیشنهادی (الف) دو هدف با اختلاف دو نمونه در برد (خروجی سناریوی شکل ۱۵). (ب) دو هدف با اختلاف یک نمونه در برد



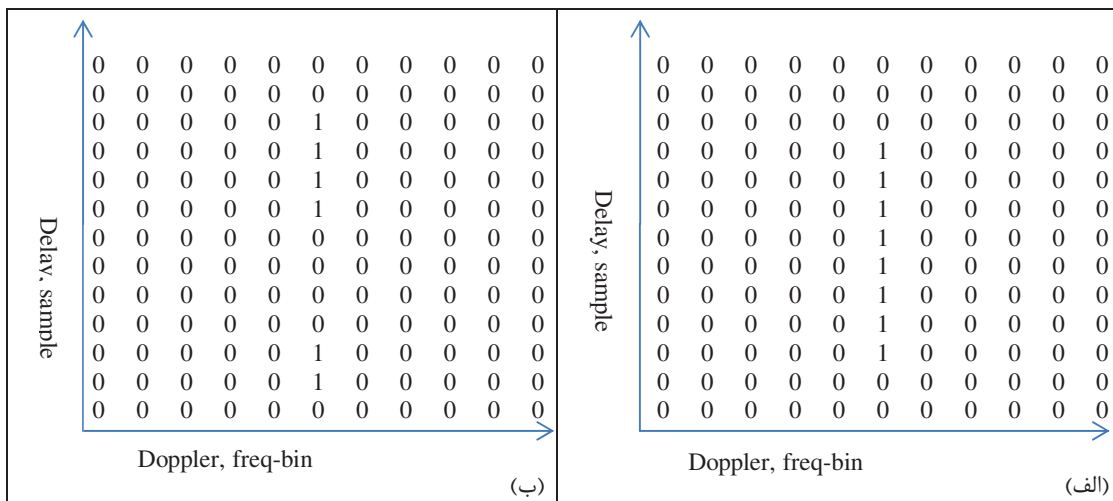
شکل ۱۷. نمایش حد تفکیک در داپلر برای روش تابع ابهام، برای تشخیص دو هدف در برد یکسان (هدف اول در داپلر ۴ هرتز و تأخیر ۶۵ نمونه و هدف دوم در داپلر ۸ هرتز و همان تأخیر)



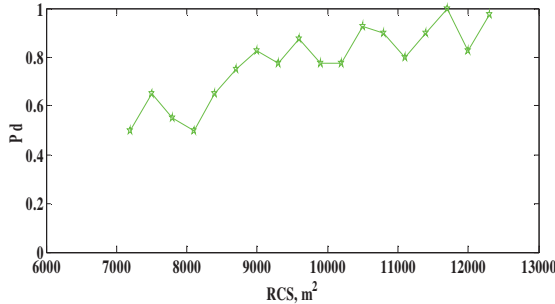
شکل ۱۸. خروجی آشکارساز برای روش تابع ابهام
 (الف) دو هدف با اختلاف داپلر ۳ هرتز (ب) دو هدف با اختلاف داپلر ۴ هرتز (خروجی سناریوی شکل ۱۷)



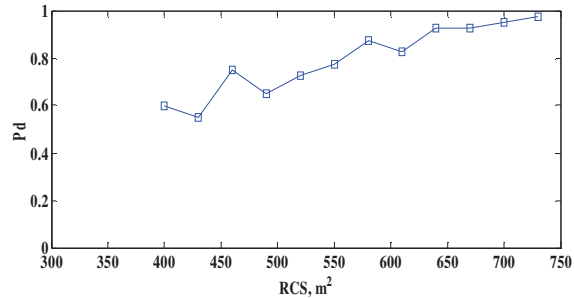
شکل ۱۹. نمایش حد تفکیک در برد برای روش تابع ابهام برای تشخیص دو هدف در داپلر یکسان (هدف اول در داپلر ۴ هرتز و تأخیر ۶۵ نمونه و هدف دوم در همان داپلر و تأخیر ۷۱ نمونه)



شکل ۲۰. خروجی آشکارساز برای روش تابع ابهام
 (الف) دو هدف با اختلاف ۵ نمونه در برد (ب) دو هدف با اختلاف ۶ نمونه در برد (خروجی سناریوی شکل ۱۹)



شکل ۲۲. منحنی P_d برای روش تابع ابهام



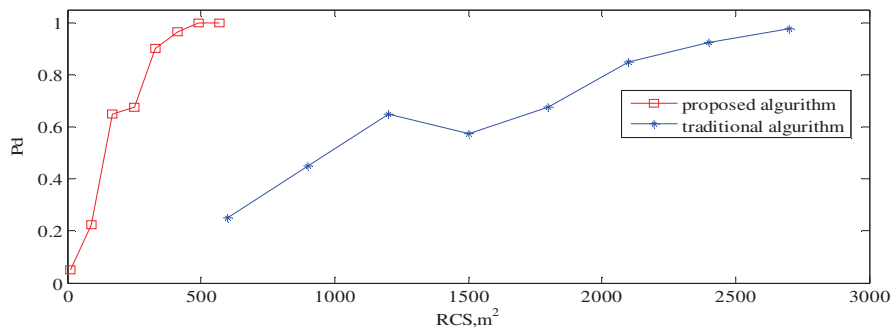
شکل ۲۱. منحنی P_d برای روش پیشنهادی

شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌کنیم روش پیشنهادی، هدف با RCS برابر با ۴۱۰ متر مربع را با احتمال آشکارسازی نزدیک به یک کشف می‌کند. این در حالی است که در روش سنتی در RCS برابر با ۲۷۰۰ متر مربع به احتمال آشکارسازی ۰/۹۷۵ می‌رسد. SNR ورودی در شکل ۲۳ برابر با 20dB در نظر گرفته شده است (برای SNR=-30dB هم شبیه‌سازی انجام شد و دقیقاً همان شکل ۲۳ تکرار گردید. این امر به‌خاطر غالب بودن کلاتر بر نویز است). ضمناً در شکل ۲۴ همان سناریوی فوق برای حالت بدون کلاتر بررسی و منحنی P_d بر حسب SNR در ورودی رسم شده است. در حالت بدون کلاتر عملکرد روش سنتی (تابع ابهام) بهتر است که امری طبیعی است؛ چرا که تابع ابهام فیلتر منطبق، برای حالت نویز سفید است که از نظر عملکرد آشکارسازی بهینه است. اما در حضور کلاتر عملکرد روش پیشنهادی برتر است.

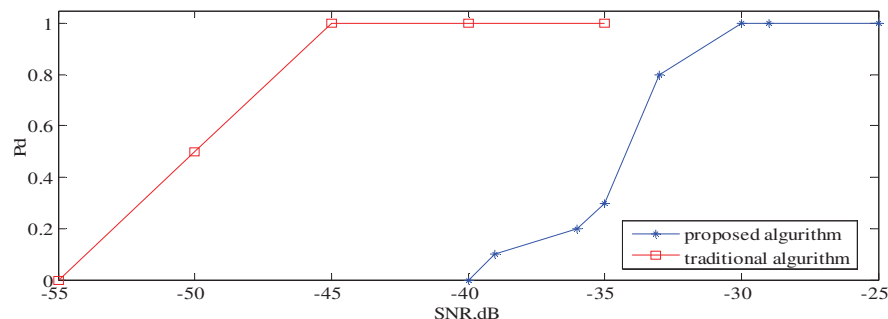
همان‌طور که دیده می‌شود در روش تابع ابهام، هدف قوی مزاحمت بسیار بیشتری برای کشف هدف ضعیف ایجاد نموده است. لذا برای کشف مطلوب اگر از روش تابع ابهام استفاده شود، RCS هدف ضعیف، ۱۶ برابر حالتی است که از روش پیشنهادی استفاده شود.

۳-۴. مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش تابع ابهام براساس احتمال آشکارسازی

به‌منظور مقایسه دو روش، سناریویی را در نظر می‌گیریم که هدفی با داپلر ۴ هرتز در تأخیر ۶۵ نمونه متناظر با برد ۳۲۲۴۲ متر قرار دارد. مشخصات کلاتر نیز مشابه مشخصات ذکر شده در بخش ۳-۳ می‌باشد. همان‌طور که شکل ۲۳ نشان می‌دهد عملکرد روش ارائه‌شده بسیار بهتر می‌باشد. در روش ارائه‌شده، فیلتر وفقی LMS با اندازه گام ۰/۰۱ استفاده شده است. لازم به‌ذکر است که تمام منحنی های P_d بر حسب RCS در این مقاله برای $P_{fa}=0.001$ محاسبه



شکل ۲۳. احتمال آشکارسازی بر حسب تغییرات RCS، برای مقایسه روش ارائه‌شده و روش سنتی



شکل ۲۴. احتمال آشکارسازی بر حسب تغییرات SNR برای مقایسه روش ارائه‌شده و روش سنتی

$$P_c = \frac{EIRP \cdot \sigma_c \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_g^2 R^2} \quad (۶)$$

σ_c سطح مقطع راداری کلاتر در یک سلول فاصله است که با فرض زاویه خراش نزدیک به صفر از دید گیرنده رادار پسیو از رابطه (۷) به دست می آید [۷، ص ۴۰۶]:

$$\sigma_c = R \cdot \theta_{az} \cdot \Delta R \cdot \sigma_0 \quad (۷)$$

در رابطه (۷) ΔR طول سلول برد است (که وابسته به زاویه سمت سلول نسبت به سمت ماهواره متفاوت است و به راحتی می توان نشان داد که در سمت با اختلاف ۹۰ درجه نسبت به سمت ماهواره، طول سلول برد برابر با حاصلضرب طول سلول زمانی در سرعت نور می باشد، که فرض این مقاله است.

می توان نشان داد که در سایر سمت ها این مقدار تا سه برابر افزایش می یابد، σ_0 سطح مقطع راداری نرمالیزه شده بر واحد سطح کلاتر و θ_{az} پهنای پرتو در سمت آنتن راداری باشد. با جای گذاری رابطه (۷) در (۶) می بینیم که توان کلاتر متناسب با R کاهش می یابد.

با توجه به اینکه توان هدف با نسبت R^2 و توان کلاتر با نسبت R کاهش پیدا می کند، با افزایش برد، SCR با نسبت R کاهش یافته و عملکرد الگوریتم هم کاهش پیدا می کند (عملکرد الگوریتم تحت تأثیر SCR است).

از سوی دیگر SNR هم با نسبت R^2 کاهش می یابد. در جدول ۲ بر اساس محدودیت های SNR و SCR، برد قابل حصول مربوط به روش پیشنهادی مبتنی بر فیلتر وقتی RLS برای احتمال آشکارسازی ۰/۹۵ در $P_{fa}=0.001$ در سناریوهای مختلف از نظر RCS هدف و σ_0 کلاتر آورده شده است.

برد قابل آشکارسازی در روش پیشنهادی، مینیمم مقدار برد به دست آمده بر اساس دو محدودیت SNR و SCR می باشد. لازم به ذکر است که عدد نویز گیرنده رادار 6dB و بهره آنتن گیرنده رادار نیز 26.6dB در نظر گرفته شده است (پهنای پرتو آنتن در سمت ۶ درجه و در ارتفاع ۱۰ درجه است).

۴-۴. مقایسه عملکرد فیلترهای وقتی RLS، LMS و NLMS

در روش پیشنهادی

در این بخش بر اساس معیار احتمال آشکارسازی به مقایسه عملکرد فیلترهای وقتی RLS، LMS و NLMS در کاربرد آشکارسازی اهداف دریایی در حضور کلاتر می پردازیم. همان طور که شکل ۲۵ نشان می دهد الگوریتم RLS بهترین عملکرد را دارد و الگوریتم های LMS و NLMS تقریباً مشابه هم هستند ولی باز هم NLMS کمی بهتر است. هدف در نظر گرفته شده با داپلر ۴ هرتز در برد ۳۲۲۴۲ متری (تأخیر ۶۵ نمونه) قرار دارد. SNR ورودی در این شکل، -20dB است. البته تا زمانی که SNR ورودی بیشتر از -30dB است (با توجه به شکل ۲۴)، عملکرد روش پیشنهادی تحت تأثیر SNR ورودی نیست).

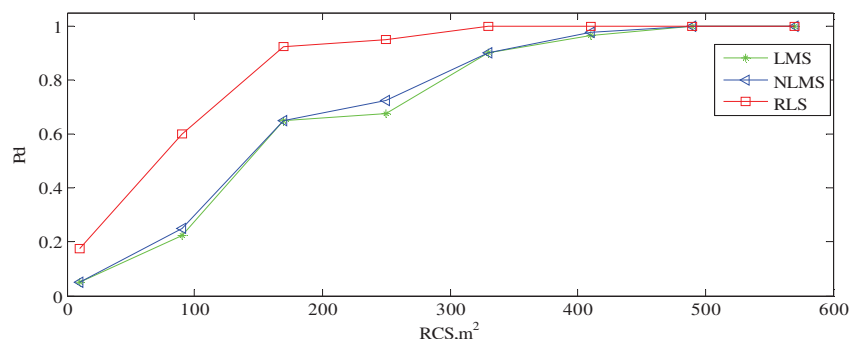
۴-۵. برد قابل شناسایی اهداف در σ_0 و RCS های متفاوت

طبق شکل ۲۴ روش ارائه شده تا SNR ورودی -30dB از نظر آشکارسازی مشکلی ندارد. عملکرد روش پیشنهادی در حضور کلاتر با سطح مقطع راداری نرمالیزه m^2/m^2 ۰/۰۰۱ در برد ۳۲۲۴۲ متر، مطابق شکل ۲۳ توصیف شده است. نمودار P_d بر حسب RCS نشان داده شده در شکل های ۲۳ و ۲۵ برای روش پیشنهادی قابل تعمیم به بردهای دیگر نیز می باشد.

با توجه به اینکه توان هدف از رابطه (۵) به دست می آید.

$$P_t = \frac{EIRP \cdot \sigma_t \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_g^2 R^2} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) EIRP توان تشعشی ماهواره، σ_t سطح مقطع راداری هدف، G_R بهره آنتن گیرنده، λ طول موج سیگنال، R برد هدف و R_g فاصله ماهواره از سطح زمین است. با توجه به اینکه فاصله ماهواره از سطح زمین خیلی زیاد می باشد، فاصله ماهواره از هدف را برای تمام اهداف R_g در نظر می گیریم. بنابراین توان هدف متناسب با R^2 کاهش می یابد. توان کلاتر از رابطه (۶) به دست می آید.



شکل ۲۵. احتمال آشکارسازی بر حسب تغییرات RCS برای مقایسه الگوریتم های وقتی در روش ارائه شده

جدول ۲. برد قابل شناسایی روش ارائه‌شده در حالت استفاده از فیلتر وقتی RLS

σ_0 (dBsm)	RCS(m ²)	برد براساس محدودیت SCR (km)	برد براساس محدودیت SNR (km)	برد نهایی (km)
-۳۰	۲۵۰	۳۲	۵۴	۳۲
	۳۸۸	۵۰	۶۷	۵۰
	۵۴۳	۷۰	۷۹	۷۰
	۷۷۵	۱۰۰	۹۴	۹۴
	۹۳۰	۱۲۰	۱۰۳	۱۰۳
-۲۵	۷۹۰	۳۲	۹۵	۳۲
	۱۲۲۷	۵۰	۱۱۹	۵۰
	۱۷۱۷	۷۰	۱۴۰	۷۰
	۲۴۵۱	۱۰۰	۱۶۸	۱۰۰
	۲۹۴۰	۱۲۰	۱۸۴	۱۲۰
-۲۰	۲۵۰۰	۳۲	۱۶۹	۳۲
	۳۸۸۰	۵۰	۲۱۱	۵۰
	۵۴۳۰	۷۰	۲۵۰	۷۰
	۷۷۵۰	۱۰۰	۲۹۸	۱۰۰
	۹۳۰۰	۱۲۰	۳۲۷	۱۲۰

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله از وزن‌های فیلتر وقتی، به‌عنوان ویژگی مورد استفاده جهت آشکارسازی اهداف، بهره گرفته شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که روش ارائه‌شده، هم از نظر حد تفکیک در برد و داپلر و هم از نظر آشکارسازی اهداف با RCS پایین و هم از نظر قابلیت کشف اهداف ضعیف در حضور اهداف قوی نسبت به روش معمول که با استفاده از خروجی تابع ابهام عمل می‌نماید، کارآمدتر بوده و بهبود حاصل شده قابل توجه می‌باشد.

۶. مراجع

- [1] Cristallini, D., Caruso, M., Falcone, P., Langellotti, D., Bongioanni, C., Colone, F., Scafè, S., Lombardo, P., "Space-Based Passive Radar Enabled by the New Generation of Geostationary Broadcast Satellite," Aerospace Conference, 2010 IEEE, pp.1-11, 2010.
- [2] Raout, J., MorphoAnalysis in Signal Process. Lab., Res. Center of the French Air Force, Salon-de-Provence, "Sea Target Detection Using Passive DVB-T Based Radar," Radar, 2008 International Conference on international conference on radar, IEEE, pp. 695-700, 2008.
- [۳] قرقان، ر، شیخی، ع، درختیان، م. "تنظیم بهینه و بررسی پاسخ فرکانسی فیلتر RLS در حذف کلاتر در رادارهای پسیو مبتنی بر FM تجاری" نوزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۹۰.
- [4] Griffiths, H., Howland, P., Baker, C., "Bistatic Radar: Emerging Technology," England, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [5] Farhang-Boroujeny, B., "Adaptive Filters Theory and Applications," John Wiley & Sons, 1998.
- [6] Widrow, B., Samuel, D. S., "Adaptive Signal Processing," Upper Addle River, New Jersey, 1985.
- [7] Skolnik, M.I., "Introduction to Radar Systems," Singapore: McGraw-Hill, Third edition, 2001.
- [8] Levanon, N., Mozeson, E., "Radar Signals," John Wiley & Sons, 2004.