

# بهبود آشکارسازی اهداف راداری با استفاده از نویززدائی بر پایه تبدیل موجک

حمید سعیدی\*، محمود مدرس هاشمی\*\* و سعید صدری\*\*

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۹/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۱۶)

چکیده - با پیشرفت سیستمهای رادار روشهای متنوعی برای پردازش سیگنال و آشکارسازی در رادارها پدید آمده است. برخی از روشهای نوین پردازش سیگنال رادار از تبدیلهای زمان-فرکانس، به ویژه تبدیل موجک که یک تبدیل خطی زمان-فرکانس است، استفاده می کنند. از مهمترین کاربردهای تبدیل موجک در پردازش سیگنال، حذف تداخل از سیگنال دریافتی است. در روشهای مرسوم آشکارسازی، ابتدا تداخل حذف شده و سپس از یک آشکارساز ساده استفاده می شود. ما نیز با استفاده از روشهای مبتنی بر تبدیل موجک تداخل را حذف کرده، آن گاه آشکارساز ساده ای مانند آشکارساز انرژی به کار می بریم. هدف ما در این مقاله آن است که نشان دهیم در موارد عملی و رایج که عملکرد فیلتر منطبق یا فیلترهای شبه منطبق کاهش می یابند پردازشهای مبتنی بر تبدیل موجک کارآمدترند. همچنین بهبود عملکرد آشکارساز انرژی برای اهداف با سرعت شعاعی کم یا نزدیک سرعت کور در مواردی که به جای فیلتر MTI از نویززدائی بر پایه تبدیل موجک استفاده شود از دیگر دستاوردهای این تحقیق است.

واژگان کلیدی: رادار، آشکارسازی، آشکارساز انرژی، تبدیل موجک، آستانه گذاری قالبی، آستانه گذاری کوچکترین حداکثر

## Performance Improvement of Radar Target Detection by Wavelet-based Denoising Methods

H. Saeedi, M. Modarres-Hashemi, and S. Sadri

Department of Electrical Engineering, Isfahan University of Technology

**Abstract:** With progress in radar systems, a number of methods have been developed for signal processing and detection in radars. A number of modern radar signal processing methods use time-frequency transforms, especially the wavelet transform (WT) which is a well-known linear transform. The interference canceling is one of the most important applications of the wavelet transform. In Ad-hoc detection methods, the interference is firstly canceled and then a simple detector, like an energy detector, is

\* - دانشجوی کارشناسی ارشد \*\* - استادیار

used. Therefore, we have used wavelet-based approaches to cancel the interference and then an energy detector has been employed. In this paper, it is shown that in practical cases where the performance of matched filter or near-matched filter is degraded, wavelet-based methods are more efficient. Also, we have shown that for cases where targets with slow radial velocity or one close to blind velocity are removed by the MTI filter, wavelet-based denoising has a better performance.

**Keywords:** Radar, Detection, Energy detector, Wavelet transform, Block thresholding, Minimax thresholding

## ۱- مقدمه

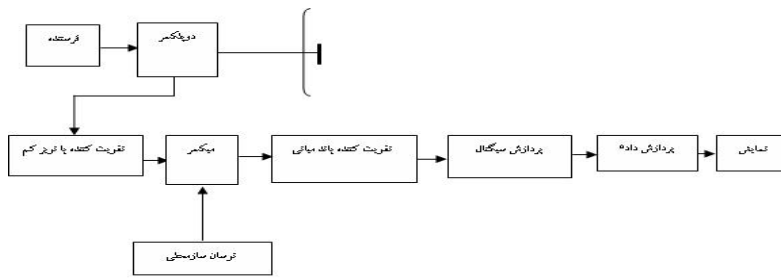
هدف مشخص شده و در نتیجه هدف کشف شده است. در [۳، ۴] به دلیل تغییر مقیاس سیگنال دریافتی در رادارهای باند وسیع از تبدیل موجک برای محاسبه میزان تاخیر و تغییر مقیاس سیگنال دریافتی و در نتیجه آشکارسازی استفاده شده است. در [۵-۹] تداخل موجود در یک سیستم راداری که قسمت عمده آن کلاتر است با استفاده از تبدیل موجک حذف شده است. به نظر می‌رسد که مهمترین کاربرد تبدیل موجک در رادار استفاده از خاصیت نویززدائی این تبدیل است. از آنجا که در مراجع موجود اولاً الگوریتم نویززدائی مناسبی مطرح نشده و مهمتر از آن از دیدگاه آشکارسازی مطالعه‌ای صورت نگرفته است، لذا مباحث این مقاله روی این دو موضوع متمرکز شده است. در ادامه پس از معرفی دقیقتر آشکارسازی متداول و مدل‌کردن سیگنال و تداخل در بخش دوم، ابزار پردازشی تبدیل موجک در بخش سوم بیان گردیده و در نهایت مسأله حذف تداخل با استفاده از تبدیل مذکور در بخش چهارم بررسی می‌شود. در بخش‌های پنجم و ششم آشکارسازی در حضور کلاتر غیر سفید و همچنین در حالت تغییر مقیاس سیگنال دریافتی مورد بحث قرار می‌گیرد. نهایتاً در بخش هفتم نتیجه گیری از مباحث مطرح شده به عمل خواهد آمد.

## ۲- مدل‌کردن سیگنال و تداخل در آشکارسازی رادار

زمانی که هدف در دید رادار قرار می‌گیرد سیگنال دریافتی مجموع بازتاب ناشی از هدف به همراه تداخل است. با توجه به زاویه نگاه رادار به هدف، یک سطح مقطع راداری ( $\sigma$ ) برای هدف قابل تعریف است. با توجه به تغییرات زیاد  $\sigma$  مدل‌های مختلفی برای سیگنال منعکس شده از هدف وجود دارد. در

با رشد سریع تکنولوژی و کاربرد رایانه در امر پردازش سیگنال، سیستم‌های رادار نیز پیشرفت چشمگیری داشته‌اند، به طوری که امروزه در ادوات نظامی، فرودگاه‌ها، هواشناسی و غیره به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۱) نمودار جعبه‌ای کلی یک سیستم رادار دیده‌بانی پالسی را نشان می‌دهد. اساسی‌ترین کار رادار، تصمیم‌گیری بر سر وجود یا عدم وجود هدف است که بر عهده بلوک پردازش سیگنال است. به طور کلی در رادار آشکارسازی از دو دیدگاه قابل بررسی است. دیدگاه اول مربوط به طراحی آشکارساز بهینه با فرض معلوم بودن مدل سیگنال، مدل تداخل و معیار آشکارسازی می‌باشد و نگاه دیگر مبتنی بر حذف تداخل (از روی مشخصات سیگنال هدف و تداخل) و سپس استفاده از یک آشکارساز ساده مانند آشکارساز انرژی<sup>۱</sup> است که از این شیوه به عنوان آشکارسازی معمولی یا عادی<sup>۲</sup> یاد می‌شود و به دلیل متداول بودن آن، از این به بعد آن را آشکارساز متداول می‌نامیم. بنابراین در جعبه پردازش سیگنال ابتدا سیگنال دریافتی پردازش شده و بعد تصمیم به وجود یا عدم وجود هدف گرفته می‌شود.

از جمله روش‌های پردازش سیگنال که اخیراً در حوزه آشکارسازی رادار مورد استفاده قرار گرفته است تبدیل‌های زمان-فرکانس است. روش تجزیه سیگنالها در صفحه مشترک زمان-فرکانس در دهه ۱۹۴۰ توسط گابور<sup>۳</sup> به صورت تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۴</sup> ابداع شد [۱] و سپس انواع دیگری از این تبدیلها مانند ویگنر<sup>۵</sup>، موجک<sup>۶</sup> و بسته موجک<sup>۷</sup> به مرور زمان پدید آمدند. از مهمترین تبدیل‌های زمان-فرکانس که استفاده وسیعی پیدا کرده تبدیل موجک است [۱]. در [۲] با استفاده از این تبدیل لبه‌های پالس بازگشتی از



شکل ۱- نمودار جعبه‌ای کلی یک سیستم راداری

داخلی سیستم رادار است که بهترین مدل برای نویز حرارتی، سفید گوسی مختلط است. کلاتر، سیگنال ناخواسته برگشتی از منعکس کننده‌هایی غیر از هدف مانند زمین، کوه، دریا، جنگل، ابر و موانع دیگر است. اگرچه عامل بوجود آورنده کلاتر همان سیگنال ارسالی است، ولی به علت برخورد به موانعی غیر از هدف مورد نظر و ماهیت تصادفی آن، مانند یک نویز تصادفی رفتار می‌کند. با این حال برخلاف نویز حرارتی سفید، پهنای باند تابع چگالی طیف توان کلاتر کوچک بوده و همبستگی نمونه‌های کلاتر در یک سلول برد (همبستگی زمانی<sup>۱۳</sup>) بسیار زیاد است. با فرض غالب بودن کلاتر سطحی زمین، یک مدل مناسب برای چگالی طیف توان کلاتر زمین فرم گوسی با فرکانس مرکزی صفر است (فرکانس مرکزی در سطح کشتزارها و جنگلها دقیقاً صفر نیست لیکن جزیی بوده و قابل صرف نظر کردن است) [۱۱]:

$$p(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \cdot e^{-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma_c^2}} \quad (4)$$

که  $f_0 = 0$  است. همبستگی بین نمونه‌های کلاتر در سلولهای برد مجاور نیز وجود دارد که به آن همبستگی مکانی<sup>۱۴</sup> می‌گویند. این همبستگی به حدی است که حداقل دو سلول مجاور با هم همبسته‌اند [۱۱]. با توجه به اینکه غالباً توان کلاتر بسیار بیشتر از توان نویز داخلی سیستم است، اغلب مشخصات آماری تداخل، تحت الشعاع مشخصات آماری کلاتر قرار می‌گیرد. بنابراین برای مدل‌سازی تداخل باید به دنبال یک مدل

آشکارسازی به شیوه همدوس اگر  $S_k$  نمونه  $K$  ام بردار سیگنال  $S$  باشد، در کلی‌ترین حالت آن را می‌توان به شکل پارامتری زیر نوشت [۱۰]:

$$S_k = A_k \cdot e^{j\phi} \cdot e^{jk\Omega} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

که  $N$  تعداد پالس برگشتی،  $\phi$  تغییر فاز ناشی از تاخیر و  $\Omega$  فرکانس زاویه‌ای ناشی از دوپلر هدف است.  $\phi$  یک متغیر تصادفی یکنواخت در فاصله  $[0, 2\pi)$  و  $\Omega$  در حالتی که نامعلوم فرض شود مشابه  $\phi$  مدل می‌شود. اما از نقطه نظر تغییرات دامنه، سه مدل مناسب برای سیگنال هدف عبارت‌اند از [۱۰]:

الف- مدل بدون موج<sup>۱۵</sup>: در این حالت بردار  $S$  به صورت

$$S = A \cdot e^{j\phi} \cdot [1 \quad e^{j\Omega} \quad e^{j2\Omega} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\Omega}] \quad (2)$$

مدل می‌شود و  $A$  برای تمام پالسهای برگشتی کاملاً معلوم و ثابت است.

ب- مدل موج آهسته<sup>۹</sup>: بردار  $S$  در این حالت نیز مشابه قبل است با این تفاوت که  $A$  یک متغیر تصادفی با توزیع رابلی یا مربع کای<sup>۱۰</sup> است.

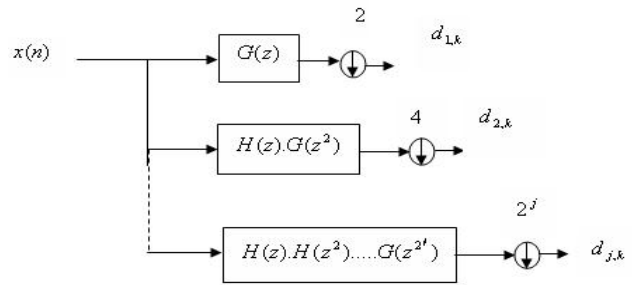
ج- مدل موج سریع<sup>۱۱</sup>: بردار  $S$  به صورت:

$$S = e^{j\phi} \cdot [A_0 \quad A_2 e^{j\Omega} \quad \dots \quad A_{N-1} e^{j(N-1)\Omega}] \quad (3)$$

بوده و  $A_i$ ها متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع رابلی یا مربع کای هستند.

تداخل، سیگنال ناخواسته‌ای است که توسط بردار دریافتی رادار به آشکارساز وارد شده و باعث ایجاد خطا در آشکارسازی می‌شود. تداخل، ناشی از ترکیب کلاتر<sup>۱۲</sup> و نویز

خط تاخیردار بی معناست.



شکل ۲- ضرایب تجزیه موجک معادل یک بانک فیلتر با ضریب کیفیت ثابت

### ۳- تبدیل موجک و نویزدائی<sup>۶</sup> توسط آن [۱]

هدف از تبدیل موجک (که تبدیلی خطی است) انتقال سیگنال از فضای زمان به فضای مشترک زمان-فرکانس است. تبدیل موجک پیوسته به صورت:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

است که  $\Psi(t)$  موجک مادر و  $a, b$  مقادیر پیوسته‌اند. تبدیل موجک را می‌توان این گونه تفسیر کرد که مقدار آن برابر میزان شباهت تابع  $f(t)$  و تابع  $\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  است چرا که تبدیل موجک در واقع از ضرب داخلی سیگنال  $f(t)$  در بردار پایه  $\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  به دست می‌آید که مبین تصویر  $f(t)$  در راستای این بردار پایه است. واضح است که هر چه حاصلضرب به دست آمده بزرگتر باشد نشان‌دهنده شباهت بیشتر این دو است. همچنین از مهمترین ویژگیهای تبدیل موجک امکان انتخاب موجک مادر از میان مجموعه بزرگی از توابع است.

به علت پیوسته بودن پارامترهای  $(a, b)$  تبدیل موجک تابع  $f(t)$  دارای افزونگی است. برای حذف این افزونگی می‌توان پارامترهای زمان و مقیاس را گسسته کرد. یکی از روشهای انجام این کار که به تجزیه دودویی<sup>۱۶</sup> معروف است به صورت  $a = 2^{-j}, b = 2^{-j}k \quad \forall j, k \in Z$  است [۱]. در نتیجه:

$$d_{j,k} = \langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot 2^{j/2} \cdot \Psi^* (2^j t - k) dt \quad (7)$$

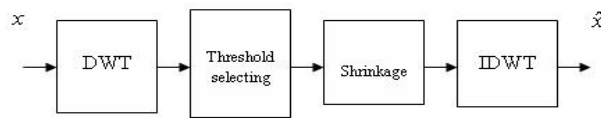
که با تغییر  $j$ ، ضرایب تجزیه موجک  $(d_{j,k})$  در مراتب مختلف حاصل می‌شود. در عمل و از دیدگاه فرکانسی، ضرایب تجزیه موجک معادل خروجیهای یک بانک فیلتر<sup>۱۷</sup> با ضریب کیفیت ثابت است که در شکل (۲) نشان داده شده است. پیاده سازی تبدیل موجک توسط نظریه تجزیه سیگنالها با دقت چندگانه صورت می‌گیرد (که هر موجک  $\Psi(t)$  دارای تابع مقیاس  $\Phi(t)$  است) و منوط به انتخاب دو فیلتر آینه‌ای

مناسب برای کلاتر بود. اگر چه برای مدل‌سازی کلاتر توزیعهای متفاوتی ارائه شده است، اما توزیع رایلی از مهمترین و متداولترین توزیع‌هایی است که برای توصیف دامنه کلاتر، از دیرباز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad x > 0 \quad (5)$$

توزیع رایلی دامنه کلاتر چنین توجیه می‌شود که کلاتر، حاصل پژواکهایی است که از منعکس‌کننده‌های سطح یک سلول بزرگ راداری منعکس می‌شوند و در محل رادار با یکدیگر ترکیب شده و کلاتر آن سلول را بوجود می‌آورند. از آنجا که طبق قضیه حد مرکزی این پژواکها دارای توزیع گوسی اند پس توزیع دامنه آن رایلی است. در این مقاله برای مدل‌سازی دامنه کلاتر از توزیع رایلی استفاده می‌شود.

همانگونه که ذکر شد در روش آشکارسازهای متداول، ابتدا تداخل را حذف کرده و سپس از یک آشکارساز ساده برای آشکارسازی استفاده می‌شود. معمولترین روش حذف تداخل در رادار استفاده از یک فیلتر منطبق در باند میانی و یک حذف‌کننده خط تاخیردار<sup>۱۵</sup> در باند پایه است. فیلتر منطبق برای تداخل سفید بهینه بوده و بیشترین سیگنال به نویز در خروجی آن حاصل می‌شود [۱۲]. حذف‌کننده خط تاخیردار بر اساس کم کردن دامنه پالسهای متوالی از یکدیگر کار کرده و لذا کلاتر ثابت را حذف می‌کند. لازم به ذکر است که اگر فرایند آشکارسازی با تک پالس صورت گیرد استفاده از حذف‌کننده



شکل ۳- نمودار جعبه ای کلی حذف نویز توسط تبدیل موجک

$$Wy = Wx + We \quad (۸)$$

ثابت می‌شود که  $We$  همچنان سفید گوسی باقی مانده و در نتیجه انرژی نویز در تمام صفحه زمان-فرکانس پخش می‌شود. روش کلی حذف نویز توسط تبدیل موجک مطابق شکل (۳) است.

آستانه‌گذاری همواره با حذف بخشی از اطلاعات روبرو است، لذا برای تعیین سطح آستانه روشهای متفاوتی ارائه شده که می‌توان به آستانه‌گذاری فراگیر<sup>۲۲</sup>، تخمین ناریب ریسک اشتاین<sup>۲۳</sup> (SURE)، کوچکترین حداکثر<sup>۲۴</sup> و آستانه‌گذاری بلوکی<sup>۲۵</sup> اشاره کرد [۱۴]. در آستانه‌گذاری فراگیر ضرایب تمام مراتب با یک سطح آستانه مقایسه می‌شوند، اما در SURE و کوچکترین حداکثر برای هر مرتبه تجزیه سطح آستانه مجزایی تعیین می‌شود. تفاوت این دو با روش قبلی تخریب کمتر سیگنال نویزدائی شده است [۱۶]. در شیوه آستانه‌گذاری بلوکی ابتدا ضرایب موجک سیگنال را به بخش‌هایی با طول یکسان تقسیم کرده و در هر بخش به طور مجزا سطح آستانه تعیین می‌شود. سطح آستانه در هر بخش (B) از بخش‌های دیگر کاملاً مجزا بوده و به صورت زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\lambda = (1 - \lambda^* \cdot \hat{\sigma}^2) \cdot \frac{L}{S^2} \quad (۹)$$

که در معادله (۹)،  $L = \lceil \log N \rceil$  (N تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی)،  $\lambda^* = 4.50524$  یک عدد ثابت و  $\hat{\sigma}^2$  تخمینی از

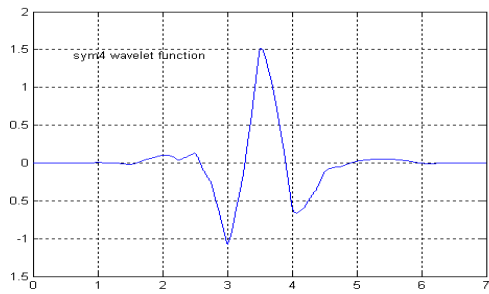
واریانس نویز است  $\left( \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i^2 \right)$ . همچنین  $S^2$  برابر است با:

$$S^2 = \sum_{k=0}^{L-1} d_{j,k}^2 \quad d_{j,k} \in B \quad (۱۰)$$

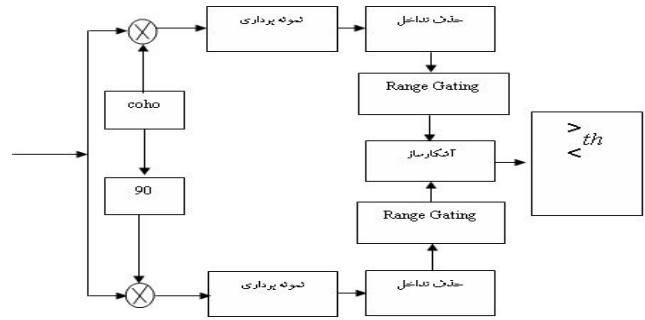
تربيعی<sup>۱۸</sup> بالا و پایین گذر می‌باشد [۱]. این فیلترها دارای طول مساوی بوده و مجموع حاصلضرب ضرایب آن دو صفر است که این خاصیت تعامد نامیده می‌شود. تعامد فیلترها در تبدیل موجک متعامد، موجب کاهش همبستگی بین ضرایب تجزیه موجک شده و نویز را سفید نگه می‌دارد [۱۵]. برای کاهش همبستگی بین ضرایب تجزیه موجک و همچنین سفید ماندن نویز لازم است فیلترها متعامد باقی بمانند و نیز برای سادگی پیاده‌سازی و وجود پایداری، مناسب است فیلترها FIR انتخاب شوند [۱۵].

از کاربردهای تبدیل موجک متعامد، حذف نویز از سیگنال مغشوش شده دریافتی است [۱۳، ۱۴]. فلسفه استفاده از تبدیل موجک برای تخمین سیگنال در نویز، توزیع انرژی نویز در تمام صفحه زمان-فرکانس و تجمع انرژی سیگنال در موزاییکهای خاصی است. روش کار بدین صورت است که ابتدا سیگنال دریافتی را در چندین مرتبه تجزیه کرده و سپس روی ضرایب در مراتب مختلف، آستانه‌گذاری انجام داده (به عبارت دیگر ضرایب کوچکتر از یک سطح آستانه معین را صفر کرده) و نهایتاً دوباره سیگنال بازسازی می‌شود. این روش که آبرفتگی<sup>۱۹</sup> ضرایب تجزیه موجک نامیده می‌شود در ابتدا توسط دونوهو<sup>۲۰</sup> و جان استون<sup>۲۱</sup> ارائه شد [۱۴].

اگر سیگنال  $x(n)$  در نویز سفید گوسی  $e(n)$  با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  غرق شده و سیگنال اندازه‌گیری شده  $y(n) = x(n) + e(n)$  باشد، هدف تخمین  $x(n)$  با فرض داشتن سیگنال  $y(n)$  است. با توجه به اینکه تبدیل موجک متعامد گسسته به صورت یک اپراتور متعامد ( $W \cdot W^H = I$ ) خطی قابل تعریف است [۱۴] داریم:



شکل ۵- تابع موجک Symmlet4



شکل ۴- سیستم راداری مورد بحث

آستانه‌گذاری در هر بلوک به روش زیر انجام می‌شود:

$$\hat{d}_{j,k} = \begin{cases} \lambda \cdot d_{j,k} & \lambda > 0 \\ 0 & \lambda \leq 0 \end{cases} \quad d_{j,k} \in B \quad (11)$$

از مزایای این روش، عملکرد مناسب آن برای دسته وسیعی از سیگنالها و سرعت بالای آن است [۱۴].

از دیگر روشهای نویززدائی، استفاده از تبدیل موجک متعامد مختلط است. به عنوان مثال اگر نویززدائی به روش کوچکترین حداکثر انجام شود، پس از تعیین سطح آستانه، ضرایب تجزیه موجک مطابق روش آستانه‌گذاری نرم با حفظ فاز آستانه‌گذاری می‌شوند یعنی هرگاه اندازه ضرایب از آستانه کمتر بود صفر شده و هرگاه بزرگتر بود توسط معادله زیر اصلاح می‌شوند [۱۶]:

$$\forall j \quad d_{j,k} = \frac{d_{j,k}}{|d_{j,k}|} \cdot (|d_{j,k}| - \lambda)_+ \quad (12)$$

پارامتر  $\lambda$  معرف سطح آستانه بوده و برابر است با:

$$\lambda = \hat{\sigma} \cdot \sqrt{2 \ln(N \ln(N))} \quad (13)$$

که  $\hat{\sigma}$  تخمینی از انحراف معیار سیگنال ورودی و  $N$  تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی است.

اگرچه تداخل مطرح شده برای نویززدائی، سفید گوسی است ولی با توجه به اینکه ضرایب موجک هر فرایند ایستاد با تابع چگالی احتمال دلخواه و چگالی طیف توان طیف غیر سفید به سمت توزیع گوسی و چگالی طیف توان سفید میل می‌کند [۱۷] لذا حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک را می‌توان برای تداخلهای دیگر نیز بکار برد. در بخشهای بعد به کارگیری روش نویززدائی به منظور آشکارسازی اهداف راداری مورد

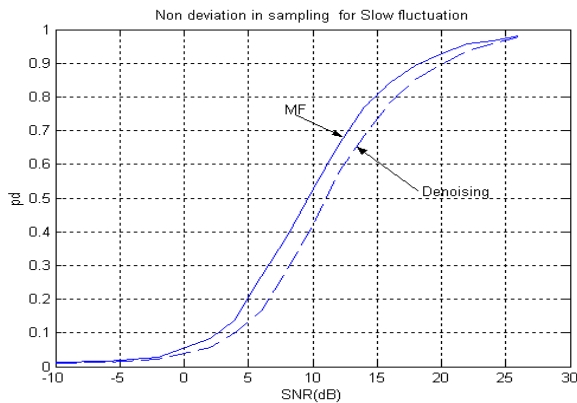
بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۴- کاربرد تبدیل موجک در آشکارسازی متداول اهداف راداری

با توجه به اینکه در آشکارسازهای متداول و مرسوم ابتدا تداخل را حذف کرده و سپس از یک آشکارساز ساده مانند آشکارساز انرژی استفاده می‌شود، در این بخش مسأله حذف تداخل رادار توسط تبدیل موجک مطرح می‌گردد.

سیستم راداری مورد بحث را مطابق شکل (۴) در نظر می‌گیریم. برای سادگی در جعبه حذف تداخل یکبار فیلتر منطبق و بار دیگر پردازنده موجک قرار داده و عملکرد فیلتر منطبق با نویززدائی بر پایه تبدیل موجک مقایسه می‌شود. برای مقایسه، کارایی آشکارساز انرژی در دو مورد فوق به ازای  $p_{fa} = 10^{-2}$  بر حسب سیگنال به نویز (SNR) رسم می‌شود. نویز زدایی به روش آستانه گذاری قالبی بوده و موجک مورد استفاده Symmlet4 است که در شکل (۵) نشان داده شده است.

از مهمترین پارامترهایی که بر عملکرد نویززدائی تاثیر می‌گذارد تعداد سطوح تجزیه سیگنال است. از آنجا که با افزایش سطوح تجزیه، نمونه‌های فرکانس پایین که اکثرا هم به سیگنال تعلق دارند ظاهر می‌شوند [۱۵]، به نظر می‌رسد که باید عملکرد نویززدائی مناسبتر باشد. اما با افزایش تعداد مراتب، تخمین واریانس نویز به دلیل کاهش نمونه‌های آن دقت کمتری دارد. افزایش حجم پردازش نیز از معضلات دیگر آن است. بنابراین تعداد سطوح تجزیه را تعداد معقولی (بسته به کاربرد) در نظر



شکل ۷- مقایسه عملکرد فیلتر منطبق و نویز زدائی در حالت تموج آرام (برای تداخل سفید گوسی)

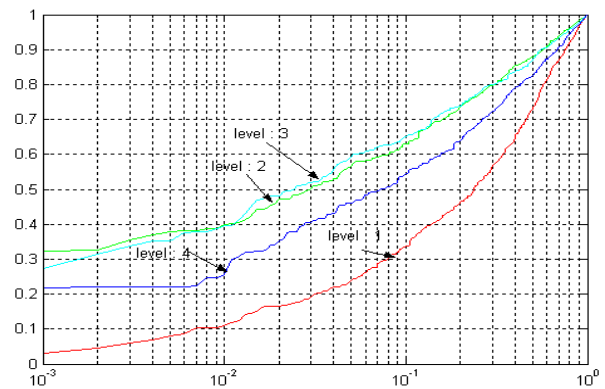
انتظار می‌رود که کارایی فیلتر منطبق در حضور کلاتر کاهش یافته و احتمالاً روشهای نویز زدائی موثرتر واقع شوند. عمده‌ترین کلاتر متعلق به زمین است. در صورتی که سلولهای مجاور ناهمبسته فرض شوند، معادله باند پایه کلاتر بازگشتی مربوط به یک پریود سیگنال دریافتی رادار پس از نمونه برداری، و با فرض یک نمونه برای هر عرض پالس، به صورت:

$$C = [c_1 + jd_1 \quad c_2 + jd_2 \quad c_3 + jd_3 \quad \dots \quad c_N + jd_N] \quad (14)$$

بوده که در معادله فوق  $N$  تعداد نمونه‌ها در جهت برد و  $c_i, d_i$  ها متغیرهای تصادفی گوسی مستقل اند. همبستگی مکانی به میزان وابستگی سلولهای برد مجاور مربوط است. معمولاً شدت کلاتر، از یک سلول تا سلول دیگر متغیر بوده و تغییرات آن به صورت آماری بیان می‌شود. در عمل کلاتر سلولهای مجاور دارای همبستگی متغیری اند به نحوی که حداقل دو سلول مجاور همبسته‌اند [۱۱]. یک راه ساده برای ایجاد همبستگی فوق، عبور بردار  $C$  از فیلتری با پاسخ ضربه  $h$  است تا همبستگی بین تداخل موجود در یک سلول و سلولهای برد مجاور ایجاد شود [۱۸]. فیلتر همبسته ساز مذکور عبارت است از:

$$h = [1 \quad \dots \quad 1] \quad (15)$$

در حقیقت هرگاه طیف ورودی این فیلتر سفید باشد، به دلیل محدود بودن پهنای باند آن، طیف خروجی محدود شده و یک



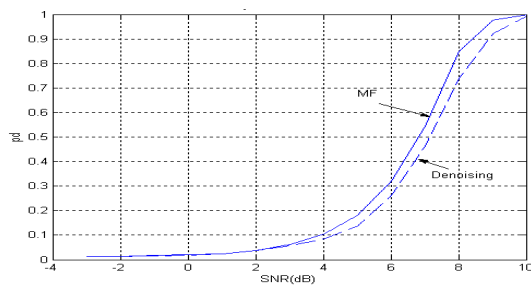
شکل ۶- مقایسه عملکرد نویز زدائی با تعداد مراتب تجزیه متفاوت

می‌گیرند. در شکل (۶) عملکرد نویز زدائی به ازای تعداد مراتب تجزیه ۱ تا ۴ رسم شده است. مشاهده می‌شود که عملکرد نویز زدائی بر پایه تبدیل موجک به ازای تعداد مراتب تجزیه ۳ و ۲ تقریباً یکسان است. در این مقاله جهت افزایش سرعت پردازش تعداد سطوح تجزیه ۲ در نظر گرفته شده است.

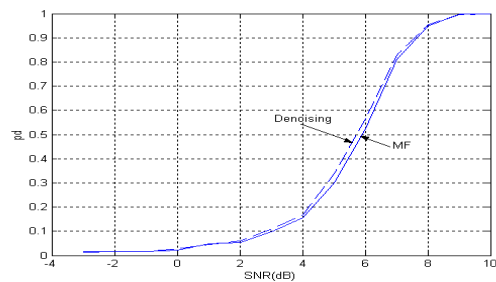
اگر تداخل، سفید گوسی و سیگنال دریافتی کاملاً معلوم باشد فیلتر منطبق بهینه بوده [۱۲] و طبیعتاً هیچگونه پردازش دیگری و از جمله نویز زدائی با هر نوع موجکی نمی‌تواند بهتر از آن عمل نماید. در شکل (۷) برای حالت تموج آرام مقایسه مذکور صورت گرفته و بهینگی فیلتر منطبق را نشان می‌دهد. اما از شرایط اولیه برای بهینگی فیلتر منطبق، سفید بودن تداخل و عدم تغییر مقیاس سیگنال دریافتی نسبت به ارسالی است. در ادامه دو حالت کاملاً رایج و یا به تعبیر بهتر دو فرض معقول در نظر گرفته می‌شود. یکبار با فرض وجود کلاتر، سفید بودن و بار دیگر در حالت مدولاسیون کد شده فاز<sup>۲۶</sup>، عدم تغییر مقیاس را نقض کرده و نشان داده می‌شود عملکرد آشکارساز پس از نویز زدائی نسبت به عملکرد آن بعد از فیلتر منطبق مناسب‌تر است.

## ۵- آشکارسازی در حضور کلاتر غیر سفید

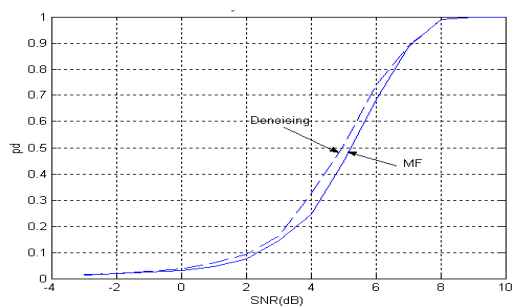
چنانکه قبلاً گفتیم یکی از تداخلهای مهم در رادار، کلاتر است. از آنجا که معمولاً فیلترهای منطبق مورد استفاده در رادار، در حالت تداخل سفید بهینه‌اند و کلاترها عموماً غیر سفیدند لذا



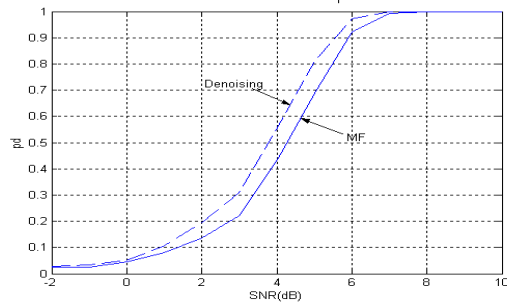
$n = 5$



$n = 10$



$n = 15$



$n = 25$

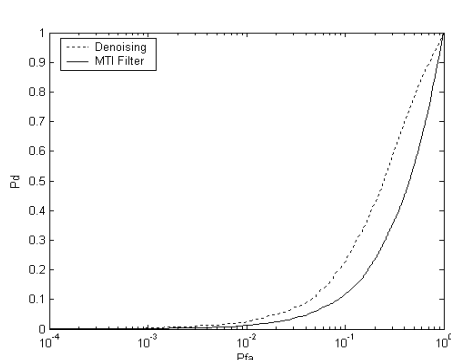
شکل ۸- مقایسه عملکرد فیلتر منطق و نویزدائی در حضور کلاتر غیر سفید برای طول فیلتر ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۵

و تقارن قابل جمع شدن نیست [۱] موجکی انتخاب می‌گردد که فیلترهای متناظرش شبه‌متقارن باشد. با این ایده خانواده موجک‌های سیملت<sup>۲۷</sup> و کوایفلت<sup>۲۸</sup> مناسب به نظر می‌رسند [۱] که در تحقیق حاضر از موجک Symmlet4 استفاده شده است، شکل (۵).

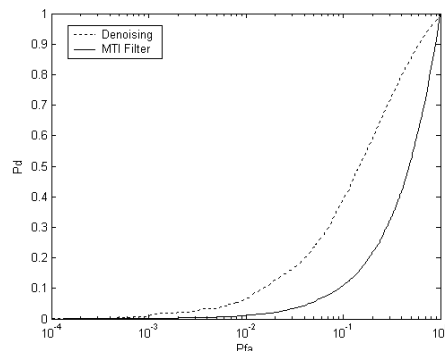
همچنین به منظور افزایش سرعت شبیه‌سازی سیگنال رادار با عرض پالس  $7\mu s$  در نظر گرفته شده و به ازای فرکانس نمونه برداری 1MHz و احتمال آژیر غلط ثابت  $p_{fa} = 10^{-2}$ ، احتمال آشکارسازی ( $p_d$ ) برحسب SNR به ازای چهار طول مختلف ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۵ برای فیلتر همبسته‌ساز رسم شده است، شکل (۸). مشاهده می‌شود که با افزایش طول فیلتر همبسته‌ساز، همبستگی بین نمونه‌ها افزایش می‌یابد تا فیلتر منطق بهینگی خود را در مقایسه با نویزدایی بیشتر از دست دهد. در حقیقت موجک به دلیل داشتن کرسی محدود<sup>۲۹</sup>، ممانهای صفر شونده<sup>۳۰</sup> و از همه مهمتر نزدیکی فیلترهای متناظر آن به تقارن

سیگنال غیر سفید تولید می‌شود. در این بخش کلاتر برای یک پیروید شبیه‌سازی می‌شود و لذا صرفاً همبستگی مکانی نمونه‌ها در نظر گرفته خواهد شد. هر چقدر طول فیلتر همبسته‌ساز بیشتر باشد تعداد سلولهای برد بیشتری با یکدیگر همبسته‌اند. اولین گام برای حذف نویز انتخاب الگوریتم نویزدائی و موجک مناسب است. سیگنال برگشتی از هدف، پالسهای با دوره زمانی بسیار کوتاه بوده و طبیعتاً انرژی آنها در ضرایب تجزیه موجک محدودی متمرکز است. با نگاهی به الگوریتمهای نویزدائی به نظر می‌رسد با توجه به خواص آستانه‌گذاری قالبی و بویژه عمل کردن این روش روی قالبهای کوچک، روش مذکور می‌تواند سیگنال رادار را به نحو مطلوبی نویزدائی کند. از طرفی سرعت بالای آن نیز از پارامترهای تعیین‌کننده است. برای انتخاب موجک مناسب به سراغ آنهایی می‌رویم که اولاً ضرایب تجزیه آنها آشکارساز لبه‌های پالس بوده و ثانیاً فیلترهای متناظر آنها برای کاهش اعوجاج خروجی متقارن اند. از آنجا که تعامد

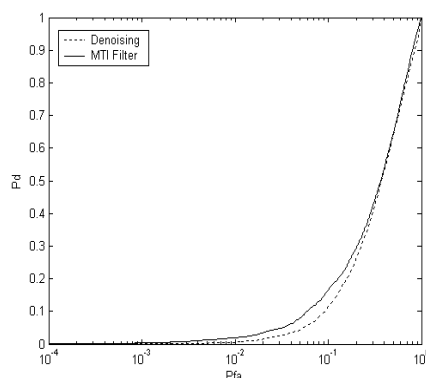




$$\frac{f_d}{PRF} = 0.1$$



$$\frac{f_d}{PRF} = 0.05$$

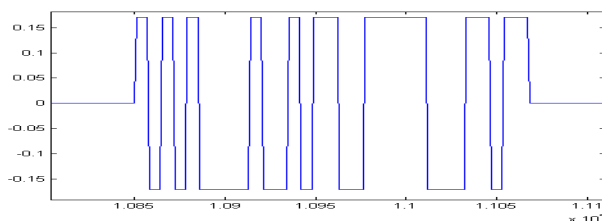


$$\frac{f_d}{PRF} = 0.15$$

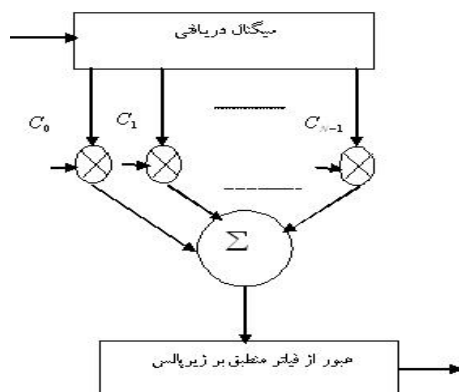
شکل ۹- منحنی احتمال آشکارسازی بر حسب احتمال آژیر غلط برای مقایسه کارایی فیلتر MTI و نویزدائی بر پایه تبدیل موجک

برخی حالتها جایگزین مناسبتری برای فیلتر MTI باشد. چنانکه می‌دانیم، اگر اهداف دارای سرعت‌های شعاعی کم و یا نزدیک سرعت‌های کور باشند فیلتر MTI این اهداف را حذف می‌کند. به عنوان مثال، در رادارهای مراقبت زمینی که وظیفه موقعیت یابی اهداف متحرک با سرعت کم مانند نفر، خودرو و یا اشیاء پرنده در ارتفاع کم را بر عهده دارند، با توجه به سرعت کم اهداف و کلاتر قوی محیط به‌ناچار از پردازش‌های داپلر استفاده می‌کنند [۱۱]. هدف ما استفاده از نویزدائی بر پایه تبدیل موجک و مقایسه آن با فیلتر MTI است. به عبارت دیگر نمونه‌های هر سلول برد در جعبه حذف تداخل نویزدائی شده

کامل [۱]، باعث توزیع انرژی کلاتر در تمام ضرایب شده و در نتیجه نسبت به فیلتر منطبق عملکرد مطلوبتری دارد. توجه کنید که تاکنون به دلیل استفاده از یک پالس، تنها از فیلتر منطبق استفاده شده و فیلتر MTI استفاده نشده است. اما می‌دانیم که آشکارسازی همواره با استفاده از چندین اکوی برگشتی از هدف صورت می‌گیرد و در این حالت آشکارسازی متداول با استفاده از حذف کلاتر در باند پایه توسط فیلتر MTI و سپس آشکارساز انرژی صورت می‌گیرد. بنابراین اکنون درصدد آن هستیم که نشان دهیم حتی در این حالت نیز که از فیلتر MTI برای حذف کلاتر استفاده می‌شود، پردازش موجک می‌تواند در



شکل ۱۰- مدولاسیون پالس رادار به روش گذشته فاز



شکل ۱۱- قسمتی از ساختار گیرنده مرتبط با کدگشایی در حالت مدولاسیون گذشته فاز

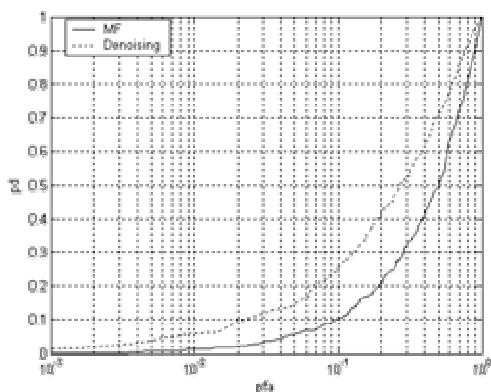
غلط رسم شده است. این منحنیها بیانگر آن است که برای اهداف با سرعت شعاعی کم پردازنده موجک بهتر از فیلتر MTI عمل می‌کند. با عنایت به پاسخ فرکانسی فیلتر MTI واضح است در مواردی که فرکانس دوپلر حول مضاربی از PRF باشد نیز عملکرد پردازنده موجک مناسبتر از فیلتر MTI است. به طور کلی برای اهداف با سرعتهای شعاعی کم یا نزدیک سرعت کور، کارایی پردازنده موجک مناسبتر از فیلتر MTI است [۱۹]. لازم به ذکر است که الگوریتم استفاده شده برای نویزدائی، روش کوچکترین حداکثر است.

## ۶- آشکارسازی در حالت تغییر مقیاس سیگنال

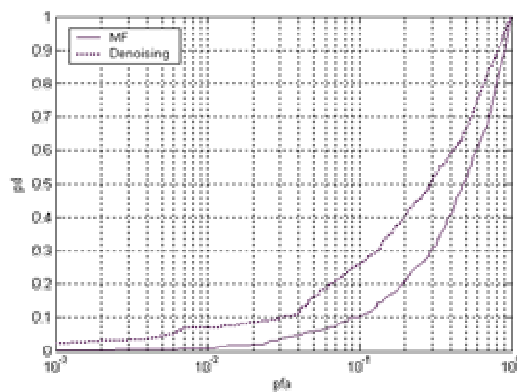
### دریافتی باند وسیع

فرض کنید سیگنال پالسی شکل  $f(t)$  به سمت یک هدف با سرعت ثابت ارسال شده و سیگنال دریافتی برابر  $g(t)$  باشد. پالس دریافتی  $g(t)$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

و سپس آشکارسازی و انتگرال‌گیری از آنها به عمل می‌آید. برای شبیه‌سازی توان کلاتر به نویز  $CNR = 15dB$ ، توان سیگنال به نویز  $SNR = -1dB$  و طیف کلاتر که وابستگی زمانی نمونه‌های کلاتر را نشان می‌دهد، طبق معادله (۴) گوسی با فرکانس مرکزی صفر و پهنای  $60 Hz$  فرض شده است. بردار سیگنال دریافتی در هر سلول فاصله با فرض مدل بدون تموج برای سیگنال هدف یکبار توسط کنسلر سه پالسی و بار دیگر توسط پردازنده موجک پردازش شده است. از آنجا که به دلیل وجود شیفت دوپلر، بردار مختلط سیگنال دریافتی هدف، نمونه‌های یک سیگنال سینوسی با فرکانس PRF است، روش آستانه‌گذاری قالبی در این حالت دیگر مناسب نیست. یکی دیگر از روشهای مناسب برای نویزدائی استفاده از فیلترهای مختلط متعامد (تبدیل موجک متعامد مختلط) است که در عین سادگی دارای قدرت بالای پردازش به دلیل استفاده از اطلاعات فاز است. به عنوان مثال در شکل (۹) برای سه  $\frac{f_d}{PRF}$  یعنی 0.05، 0.1، 0.15، احتمال آشکارسازی بر حسب احتمال آزیر



ب- چهار نمونه تغییر مقیاس



الف- دو نمونه تغییر مقیاس

شکل ۱۲- مقایسه عملکرد فیلتر منطبق و نویزدائی در حالت تموج اهسته با تغییر مقیاس سیگنال دریافتی

$$\frac{2v}{c} \cdot T \ll \frac{T}{N} \Rightarrow \frac{2v}{c} \ll \frac{1}{N} \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷) برای  $N$  بزرگ یا مقدار  $\frac{2v}{c}$  بزرگ (مثلاً در محیط سونار که  $c$  کوچک است) تقریب بکار رفته معقول نیست. به عبارت دیگر اگر تغییر مقیاس سیگنال دریافتی قابل قیاس با عرض چیپ باشد مشکل ساز بوده و فیلتر منطبق مذکور بهینگی خود را از دست می دهد.

در اینجا تعداد پالس برگشتی ۲، پریود تکرار پالس ۱ میلی ثانیه، عرض پالس ۱۰ میکروثانیه، تعداد نمونه برای هر زیرپالس ۷ و کد شبه تصادفی به طول ۳۱ در نظر گرفته می شود (که توسط شیفت رجیستر با فیدبک خطی<sup>۳۱</sup> تولید می شود). همچنین فرض می گردد تغییر مقیاس باعث جمع شدگی پالس دریافتی شده است (یا به عبارتی هدف به رادار نزدیک شده است) که این جمع شدگی تنها باعث کاهش ۲ یا ۴ نمونه در سیگنال دریافتی می شود. به ازای  $SNR = 8dB$  عملکرد نویزدائی با فیلتر منطبق (بر زیرپالس) در حالت تموج آرام مقایسه شده و مشاهده می شود که در هر دو حالت مخصوصاً حالت دوم که تغییر مقیاس بیشتر است عملکرد نویزدائی مطلوبتر است، شکل (۱۲). شایان ذکر است که این مسأله برای مدل‌های بدون تموج و تموج سریع نیز شبیه سازی شده که نتایج آن

$$g(t) = f(t - \tau(t)) = f\left(\left(1 - \frac{2v}{c}\right)t - \tau_0\right) \quad (16)$$

اگر بتوان تقریب  $1 - \frac{2v}{c} \cong 1$  را انجام داد در این صورت تغییر مقیاس پالس دریافتی قابل چشم پوشی است. در غیر این صورت سیگنال، باند وسیع است و تغییر مقیاس قابل چشم پوشی نیست [۲۰]. در مسأله فشردسازی پالس رادار (که از روشهای تولید سیگنال باند وسیع است) مثلاً حالت مدولاسیون کد شده فاز، تقریب مذکور مخصوصاً در طول کدهای بلند منطقی نیست. در این حالت در باند میانی یا RF، کل عرض پالس  $T$  به  $N$  زیرپالس به اندازه  $T \ll \tau$  تقسیم شده و فاز هر زیرپالس 0 یا  $\pi$  انتخاب می شود. در نتیجه مثل این است که پالس مدوله شده قبل از ارسال در یک دنباله تصادفی او-۱ ضرب شود، شکل (۱۰). در گیرنده همان کد به کار رفته در فرستنده در شکل موج ضرب شده و مقادیر زیرپالسها با هم جمع می شوند. در نتیجه عرض پالس در گیرنده  $T \ll \tau$  است. برای حذف تداخل، فیلتر منطبق بر عرض چیپ در گیرنده قرار داده می شود، شکل (۱۱) [۲۱].

در حالت مدولاسیون کد شده فاز شرط آنکه سیگنال دریافتی چندان دچار مشکل نشود و بتوان تقریب مذکور را بکار برد، آن است که میزان فشردگی از عرض زیرپالس بسیار کمتر باشد یعنی :

حاکمی از مطلوبتر بودن روش نویززدائی است [۲۲].

نویززدائی با فیلترهای واقعی بیشتر از تفاوت آن با فیلتر ایدئال است. همچنین نشان داده شد در مواردی که اهداف به دلیل سرعت شعاعی کم و یا نزدیکی به سرعت کور در فیلتر MTI حذف می شوند نویززدائی بر پایه تبدیل موجک عملکرد مطلوبتری دارد. از خصوصیات این پردازنده، سادگی پیاده سازی در کنار قدرت مناسب پردازشی آن است. از مهمترین مسائل در حوزه پردازش سیگنالهای راداری، انجام محاسبات در زمان حقیقی است که به دلیل پیشرفت سریع رایانه ها این مشکل حل شده است. لازم به ذکر است که برای تبدیل موجک نیز الگوریتمهای محاسبه با سرعت بالا طراحی شده است که این مانع را مرتفع می سازند. به هر حال پردازش سیگنال رادار با شیوه های متنوع می تواند باعث بهبود عملکرد سیستم شود اما معاوضه ای بین هزینه و پیچیدگی سیستم با بهبود عملکرد وجود دارد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از تکنیک پردازش سیگنال دیجیتال، در چند مورد که فیلتر منطبق بهینگی خود را از دست می دهد عملکرد آشکارساز بهبود داده شد. ابزار مورد استفاده برای پردازش، نویززدائی بر پایه تبدیل موجک و هدف از این پردازش کاهش تداخل سیگنال راداری بود. مشاهده شد که در شرایط کاملاً معمولی و رایج که کلاترهای غیر سفید موجود باشند، و یا تغییر مقیاس سیگنال قابل ملاحظه بوده و در حقیقت سیگنال باند وسیع باشد، عملکرد نویززدائی مبتنی بر تبدیل موجک بر استفاده از فیلترهای منطبق ارجح است. علاوه بر این باید توجه داشت که فیلتر منطبق استفاده شده در این مقاله یک فیلتر ایدئال است که هرگز در عمل وجود نداشته و فیلترهای عملی جایگزین آن می شوند. لذا تفاوت کارایی

## واژه نامه

- |                                 |                                    |   |
|---------------------------------|------------------------------------|---|
| 1. energy detector              | 12. Clutter                        | 23. Stein Unbiased risk estimator         |
| 2. Ad-hoc Detector              | 13. temporal correlation           | 24. minimax                               |
| 3. Gabor                        | 14. spatial correlation            | 25. block thresholding                    |
| 4. short time Fourier transform | 15. delay line canceller           | 26. phase code modulation                 |
| 5. Wigner                       | 16. dyadic                         | 27. Symmlet                               |
| 6. wavelet transform            | 17. filter bank                    | 28. Coiflet                               |
| 7. wavelet packet transform     | 18. quadrature mirror filter (QMF) | 29. compactly supported                   |
| 8. non fluctuation              | 19. shrinkage                      | 30. vanishing moment                      |
| 9. slow fluctuation             | 20. Donoho                         | 31. linear feedback shift register (LFSR) |
| 10. Chi square                  | 21. John Ston                      |   |
| 11. rapid fluctuation           | 22. universal thresholding         |   |

## مراجع

1. Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, San Diego, CA, Academic Press, 1998.
2. Elsehly, E., and Sobhy, M.I., "Detection of Radar Target Pulse in the presence of Noise and Jamming Signal Using the Multiscale Wavelet Transform," *IEEE International Symposium on Circuits and System*, Vol.3, pp.536-539, 1999.
3. Peng, Y.N., Tian, L. S., and Zhang, X.P., "Wavelet Detectors for Wide-Band Radar Signals," *CIE International Conference of Radar*, pp.289-292, 1996.
4. Jiang, X., and Zhang, J., "Wide-Band Signal Detection Based on Time-Scale Domain Two-Dimensional Correlation", *MTS/IEEE Conference and Exhibition*, Vol.3, pp.1660-1663, 2001.
5. Liu R., Liu X., and Suo, J., and Wang, X., "The Radar Clutter Processor with Wavelet Floating threshold," *proceeding of CIE International Conference on Radar*, pp.1001-1005, 2001.
6. Noel, S., and Szu, H., "Wavelets and Neural Networks for Radar," *Russian Academy for Nonlinear Sciences*, pp.105-158, 1998.
7. Lehmann, V., and Teschke, G., "Wavelet Based Methods for Improved Wined Profiler Signal Processing," *European Geophysical Society*, pp.825-836, 2001.
8. Guohuo, W., and Siliang, Wu., "Denoising Radar Signals Using Complex Wavelet," *International Symposium on Signal Processing*, Vol. 1, pp.341-

- 344, 2003.
9. Murai, K., Hayashi, Y., Miyoshi, Y. and, Inokuchi, S., "Suppression of the Sea Clutter in the Marine Radar System," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 4, PP. 3952 - 3955, 2002.
۱۰. تابان، م.، ر.، آشکارسازی سیگنالهای راداری در حالت غیر گوسی، رساله دکترای مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، آبانماه ۱۳۷۷.
11. Scheleher D.C., *MTI and Pulsed Doppler Radar*, Artech House, 1991.
12. Skolnik, M.I., *Introduction to radar system*, New York, McGraw-Hill, 1980.
13. Burrus, C.S., and Gopinath, R.G., *Introduction to wavelets and wavelet transforms*, New York, Prentice Hall, 1998.
14. Vidankovic, B., *Statistical Modeling of Wavelets*, Johns Wiley & Sons Inc., 1999.
۱۵. صدری، س.، پردازش سیگنالهای آرایه در حوزه مشترک زمان-فرکانس، رساله دکترای مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، آبانماه ۱۳۷۷.
16. Sardy, S., "Minimax Threshold for Denoising Complex Signals with Waveshrink," *IEEE Trans. On Signal Processing*, vol. 48, No. 4, pp. 1023-1028, April 2000.
17. Borda, M., and Isar, D., "Whitening with Wavelets," *Proceeding of IEEE Int.conf, ECCTD'97, August 1997*.
۱۸. پاشا، س.، جنگ الکترونیک و به کارگیری الگوریتم LMS برای حذف تداخل، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، آبانماه ۱۳۷۰.
۱۹. سعیدی سورک، ح.، مدرس هاشمی، م.، صدری، س.، کاربرد نویززدائی بر پایه تبدیل موجک در آشکارسازی اهداف رادار، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه مشهد، اردیبهشت ماه ۸۳.
20. Weiss, L.G., "Wavelets and Wideband Correlation Processing," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 11, 1994.
21. Natanson, F.E., *Radar Design Principles*, New York, MC Graw Hill, 1969.
۲۲. سعیدی سورک، ح.، آشکارسازی اهداف راداری در حوزه مشترک زمان-فرکانس، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان، بهمن ماه ۱۳۸۱.