

طراحی یک ماتریس اندازه‌گیری مناسب برای بازسازی اهداف راداری با استفاده از حسگری فشرده

شهرام صمدی^۱، مرتضی ولی‌زاده^{۲*}، مهدی چهل امیرانی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار و ۳- دانشیار گروه مهندسی برق مخابرات، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹)

چکیده

استفاده از حسگری فشرده در سامانه‌های راداری باعث حذف فیلتر منطبق از گیرنده و کاهش پهنای باند مورد نیاز مبدل آنالوگ به دیجیتال در گیرنده می‌شود. بنابراین در گیرنده به نرخ اطلاعات کمتری از نرخ نایکوئیست نیاز است. یکی از پارامترهای حسگری فشرده ماتریس اندازه‌گیری است. ماتریس اندازه‌گیری حسگری فشرده برای سیگنال‌های راداری معمولاً ماتریس تصادفی انتخاب می‌شود. گرچه بازبازی دقیق سیگنال با استفاده از ماتریس تصادفی با احتمال بالایی ممکن است و این ماتریس ناهمدوسی بالایی با هر ماتریس پایه‌ای دارد ولی پیاده‌سازی آن در عمل تقریباً غیرممکن است. بنابراین بهتر آن است که از ماتریس‌های معین به‌عنوان ماتریس اندازه‌گیری استفاده شود. ماتریس Alltop یکی از این ماتریس‌های معین است که از دنباله Alltop به‌دست می‌آید. استفاده از این ماتریس در حسگری فشرده دارای محدودیت‌هایی است. در این مقاله ضمن برطرف کردن محدودیت‌های آن، یک جایگزین مناسب‌تر برای بلوک فیلتر منطبق بر مبنای حسگری فشرده ارائه خواهد شد که در مقایسه با فیلتر منطبق کارایی بهتری دارد و هدف‌های راداری را با متوسط خطای کمتری نسبت به فیلتر منطبق بازسازی می‌نماید.

کلید واژه‌ها: حسگری فشرده، رادار، ماتریس اندازه‌گیری، فیلتر منطبق، ماتریس Alltop

۱- مقدمه

روش حسگری فشرده را می‌توان به انواع مختلف رادار اعمال نمود [۶]. از جمله این رادارها می‌توان به رادار OFDM^۳ [۷]، رادار MIMO^۴ [۱ و ۸-۱۱]، رادار دهانه مصنوعی^۵ [۱۲-۱۶] و رادار مشاهده‌گر از پشت دیوار^۶ [۱۷] اشاره کرد.

در [۵] تصویربرداری رادار با استفاده از حسگری فشرده معرفی شده و در آن ثابت شده که حسگری فشرده پتانسیل ایجاد دو بهبود مشخص حذف فیلتر منطبق از رادار و کاهش پهنای باند مورد نیاز برای تبدیل آنالوگ به دیجیتال در گیرنده و بهبود حساسیت رادار را دارد. در [۶] پردازش سیگنال OFDM تنگ با استفاده از روش حسگری فشرده پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی باعث می‌شود رادار OFDM با پهنای باند کمتری به تفکیک‌پذیری دقیق‌تری دست یابد. در [۷] سامانه MIMO زیرنایکوئیست^۷ پیشنهاد شده که یک روش نمونه‌برداری و بازبازی در سامانه راداری MIMO است. با استفاده از این روش ارتباط بین نرخ نمونه‌برداری با تفکیک‌پذیری^۸ زمانی و ارتباط بین تعداد آنتن‌ها با تفکیک‌پذیری فضایی^۹ از بین می‌رود. در [۸] رادار CS^۹ چند ورودی چند خروجی که از شکل موج پله‌ای فرکانسی برای آشکارسازی اهداف راداری استفاده می‌کند،

آشکارسازی، تعیین محل هدف و ردیابی اهداف، وظایف اولیه رادار هستند. [۱]. به‌عبارت دیگر، هدف در رادار تعیین موقعیت و سرعت اهداف است [۲]. در گیرنده رادار روش‌های تخمین مستقل از اطلاعات مانند روش فیلتر منطبق^۱ استفاده می‌شوند. این روش‌ها بار محاسباتی کمی دارند و باعث بهبود نسبت سیگنال به نویز می‌گردند [۳].

آشکارسازی و طبقه‌بندی اهداف راداری با دقت بالا، نیازمند ارسال یک شکل موج پهن‌بند در یک بازه زمانی کوتاه است. پهنای باند عریض، نیاز به یک گیرنده پهن‌بند را ضروری می‌سازد. در نتیجه هزینه سامانه بالا می‌رود. برای حل این مشکل می‌توان از روش حسگری فشرده^۲ بهره جست [۴].

با استفاده از نظریه حسگری فشرده برای بازسازی صحیح سیگنال به تعداد کمتری از نمونه‌های سیگنال راداری نیاز است. حسگری فشرده می‌تواند باعث حذف فیلتر منطبق از گیرنده رادار شود و پهنای باند مورد نیاز برای مبدل آنالوگ به دیجیتال را در گیرنده کاهش دهد، و در نتیجه با نرخ اطلاعات کمتری از نرخ نایکوئیست، سیگنال دریافتی را بازسازی نماید [۵].

* رایانامه نویسنده مسئول: mo.valizadeh@urmia.ac.ir

^۱ Matched filter

^۲ Compressive sensing

^۳ Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

^۴ Multiple Input Multiple Output

^۵ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۶ Through the wall radar imaging

^۷ Sub Nyquist

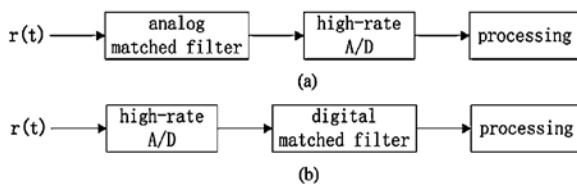
^۸ Resolution

^۹ Compressed Sensing

گردید. بخش پنجم به طراحی ماتریس اندازه‌گیری اختصاص دارد و نحوه تولید ماتریس Alltop را شرح می‌دهد. در بخش ششم روش پیشنهادی معرفی خواهد شد و دلیل استفاده از آن به جای ماتریس Alltop شرح داده می‌شود. بخش هفتم نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و در بخش پایانی، نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- فیلتر منطبق در رادار

سامانه‌های راداری، پالس عریض مدوله شده مانند شکل موج LFM^۴ را به سمت هدف ارسال می‌کنند [۱۴] و در گیرنده سیگنال‌های دریافتی از هدف را برای تخمین اطلاعات موقعیت و سرعت هدف، پردازش می‌نمایند [۱۵]. گیرنده رادار کلاسیک یا شامل یک سامانه فیلترینگ منطبق آنالوگ و یک مبدل آنالوگ به دیجیتال با نرخ بالا در یک رایانه دیجیتال است یا شامل مبدل آنالوگ به دیجیتال با نرخ بالا و یک سامانه فیلترینگ منطبق دیجیتال است. هر دو روش پیچیده و گران‌قیمت هستند که نمایش بلوک آن‌ها در شکل (۱) آمده است [۵].



شکل (۱): گیرنده راداری با فیلتر منطبق در (a) حوزه آنالوگ و (b) حوزه دیجیتال.

همه مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال از نظریه شانون - نایکوئیست تبعیت می‌کنند. طبق این نظریه، نرخ نمونه‌برداری حداقل باید به اندازه دو برابر پهنای باند باشد تا بتوان بدون هم‌پوشانی^۵ از سیگنال نمونه‌برداری کرد. این اصل اساسی، پایه بسیاری از سامانه‌های پردازش سیگنال دیجیتال مانند سامانه‌های صوتی و تصویری، گیرنده‌های رادیویی، سامانه‌های راداری، وسایل پزشکی و... است [۲].

ساختارهای کلاسیک رادار (بدون حسگری فشرده) از الگوریتم‌ها و طرح‌های آشکارسازی پردازش سیگنال ثابت شده، مانند پردازشگرهای فیلترینگ منطبق^۶ استفاده می‌کنند [۴]. فیلتر منطبق در گیرنده میزان همبستگی سیگنال دریافتی از هدف با شکل موج ارسالی را به دست می‌آورد [۱۴]. خروجی فیلتر منطبق شامل دو تابع همبستگی، یکی تابع همبستگی سیگنال با خودش و دیگری تابع همبستگی سیگنال با نویز است [۱۶]. فیلتر منطبق علاوه بر نشان دادن SNR لحظه‌ای بیشینه در

پیشنهاد شده و نشان داده شده که به تفکیک‌پذیری بالایی دست می‌یابد. در [۹] یک روش بر پایه حسگری فشرده برای رسیدن به تفکیک‌پذیری بالا در سامانه^۱ ISAR پیشنهاد شده و عملکرد آن با دیگر روش‌های نوین مرسوم در بهبود تفکیک‌پذیری تصاویر راداری مورد مقایسه قرار گرفته است. در [۱۰] با استفاده از ایده‌های حسگری فشرده، روشی جدید برای استخراج بُرد و سرعت اهداف در رادارهای فرکانس پهنای ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش ارائه شده مشکل انتقال و گستردگی بُرد را ندارد و همچنین کارایی آن از روش‌های دیگر مبتنی بر حسگری فشرده بهتر است [۱۰].

شرط استفاده از حسگری فشرده در سامانه‌های مختلف مانند سامانه‌های راداری، تُنک^۲ بودن سیگنال دریافتی در سامانه و ناهمدوسی^۳ بودن ماتریس اندازه‌گیری در روش حسگری فشرده است [۱۱].

با فرض این‌که اهداف راداری در فاصله دوری از هم قرار دارند، می‌توان آن‌ها را به صورت نقطه‌ای نشان داد و با این فرض سیگنال دریافتی را تنک در نظر گرفت [۱۲].

برای برآورده کردن شرط دوم می‌توان از ماتریس‌های تصادفی بهره جست. این ماتریس‌ها گرچه ناهمدوسی بالایی با هر ماتریس پایه‌ای دارند، ولی استفاده از آن‌ها هزینه‌های سامانه از قبیل، بار محاسباتی و حافظه مورد نیاز برای تولید مولفه‌های ماتریس اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد [۲]. بنابراین بهتر آن است که، از ماتریس‌های معین مانند ماتریس Alltop [۱۳] به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های حسگری فشرده استفاده کرد.

در این مقاله به طراحی یک ماتریس اندازه‌گیری مناسب پرداخته و نشان داد می‌شود که ماتریس پیشنهادی به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف، تعداد اندازه‌گیری‌های مختلف و تعداد نقاط تُنک مختلف بهتر از ماتریس Alltop عمل کرده و کار بازسازی سیگنال را با خطای کمتری در مقایسه با ماتریس Alltop انجام می‌دهد. علاوه بر این از این ماتریس می‌توان در سامانه راداری به منظور آشکارسازی اهداف راداری استفاده کرد و اهداف نزدیک به هم را با خطای کمتری آشکارسازی نمود.

ساختار مقاله در ادامه از این قرار است. در بخش دوم کاربرد فیلتر منطبق در سامانه‌های راداری بررسی می‌شود. در بخش سوم به تعریف حسگری فشرده و معرفی الگوریتم‌های مختلف به کار رفته در آن خواهیم پرداخت. در بخش چهارم سامانه راداری که برای آشکارسازی اهداف از حسگری فشرده استفاده می‌کند، معرفی خواهد شد و مزایای استفاده از آن بیان خواهد

^۴ linear frequency modulation

^۵ aliasing

^۶ Matched filtering

^۱ Inverse Synthetic Aperture Radar

^۲ Sparse

^۳ Incoherent

به‌طوری که برای مسایل در ابعاد بزرگ کاربردی‌تر به نظر می‌رسند [۲۲]. روش‌های حریص برای تعیین جواب بهینه کلی، یک دنباله از انتخاب‌های محلی بهینه را تولید می‌کنند. روش تعقیب MP^f و روش تعقیب OMP در گروه روش‌های حریص قرار می‌گیرند [۲۱]. تعقیب MP و تعقیب OMP، ستون‌هایی از ماتریس اندازه‌گیری را انتخاب می‌کنند که شباهت بیشتری با باقیمانده سیگنال داشته باشد. باقیمانده سیگنال با کسر کردن بردار تخمینی از بردار اندازه‌گیری به دست می‌آید [۲].

روش‌های آرامش محدب مساله تقریب تنک را با مساله محدب مرتبط جایگزین می‌کنند [۲۱]. فرض کنید Ψ ماتریس پایه‌ای است که حوزه تنک را پوشش می‌دهد و Φ نیز ماتریس اندازه‌گیری است. مساله آرامش محدب برای حسگری فشرده به فرم رابطه (۲) خواهد بود که در آن s یک بردار تنک با K مولفه غیر صفر است و از بقیه مولفه‌های آن می‌توان چشم‌پوشی کرد. $\| \cdot \|_1$ نیز به نورم یک اشاره دارد [۸، ۲۳].

$$\min \|s\|_1 \quad s.t. \quad y = \Phi x = \Phi \Psi s \quad (2)$$

از جمله روش‌های آرامش محدب می‌توان به تعقیب پایه (BP)، تعقیب پایه با بازه‌های نابرابر (BPIC^y)، کاهش نویز تعقیب پایه (BPDN^h) و انتخابگر دانزیگ^۹ اشاره کرد [۲]. متأسفانه، حل مساله‌های آرامش محدب نیازمند یک جستجوی جامع بین همه ترکیب‌های مولفه‌های غیر صفر سیگنال است. در نتیجه پیچیدگی محاسباتی آن به صورت نمایی افزایش می‌یابد [۱].

۴- رادار و حسگری فشرده

حفاظت محدود از اطلاعات و نسبت سیگنال به نویز پایین، چالش‌های پیش روی سامانه‌های راداری است. از آنجایی که آشکارسازی اهداف نزدیک به هم بسیار سخت است، چالش دیگر وجود اهداف نزدیک به هم، چه از نظر فرکانسی و چه از نظر مکانی، است [۱]. استفاده از رادار مبتنی بر حسگری فشرده معمولاً منجر به بهبود تفکیک‌پذیری بدون نیاز به افزایش در اندازه، وزن و قدرت (SWAP^{۱۰}) سامانه می‌شود [۲۴].

در پردازش سیگنال راداری، سیگنال دریافتی را می‌توان به صورت $r(t) = \alpha \psi(t - \tau) + n(t)$ نشان داد، که در آن دامنه سیگنال دریافتی، $\psi(t - \tau)$ شکل موج راداری با تاخیر زمانی معلوم τ و $n(t)$ نویز گوسی جمع‌شونده است. سیگنال تاخیر یافته را می‌توان با تعریف یک پایه شاخصه‌ای شده با تاخیر زمانی، به صورت تنک نمایش داد [۲۴]. در بسیاری از سامانه‌های

خروجی، خصوصیات تفکیک‌پذیری فاصله را نیز حفظ می‌کند [۱۷].

۳- حسگری فشرده

حسگری فشرده فرآیند بازسازی سیگنال با تعداد نمونه‌های کمتر نسبت به نرخ نایکوئیست با استفاده از رابطه $y = \Phi x$ است. y در این رابطه بردار اندازه‌گیری، Φ ماتریس اندازه‌گیری و x بردار سیگنال است [۱۸].

شرط استفاده از حسگری فشرده در سامانه‌های مختلف مانند سامانه‌های راداری، تنک بودن سیگنال دریافتی در سامانه و ناهمدوس بودن ماتریس اندازه‌گیری در روش حسگری فشرده است [۱۱].

سیگنال x که N مولفه دارد، در پایه دلخواه Ψ ، K -تنک^۱ است اگر بردار $s \in \mathbb{R}^N$ با تعداد $K \ll N$ مقدار غیر صفر وجود داشته باشد به طوری که رابطه $x = \Psi s$ برقرار باشد [۲].

همدوسی، همبستگی بین ستون‌های مجزای ماتریس $M \times N$ بعدی را محاسبه می‌نماید [۱۲]. همدوسی را می‌توان با $\mu(\Phi)$ نشان داد. همدوسی $\mu(\Phi)$ برای ماتریس Φ بزرگترین اندازه ضرب داخلی بین دو ستون φ_i و φ_j از ماتریس Φ است و به زبان ریاضی به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۲]. مقدار $\mu(\Phi)$ هر چه کمتر باشد میزان ناهمدوسی ماتریس نیز بیشتر خواهد بود [۱۲].

$$\mu(\Phi) = \max_{1 \leq i \neq j \leq N} \frac{|\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|}{\|\varphi_i\|_2 \|\varphi_j\|_2} \quad (1)$$

اگر بردار سیگنال دارای نمایش تنک در یک حوزه مانند حوزه فوریه باشد می‌توان با انتخاب یک ماتریس اندازه‌گیری مناسب که شرط ناهمدوسی [۱۱] را برآورده می‌کند، و استفاده از آن در الگوریتم‌های حسگری فشرده مانند BP^۲ [۱۹]، Dantzig selector [۲۰]، OMP^۳ [۲۱] و ... سیگنال را با دقت بالایی بازسازی کرد [۱۲].

الگوریتم‌های حسگری فشرده به دو نوع تعقیب حریص^۴ و آرامش محدب^۵ تقسیم می‌شوند [۲۱]. تعقیب حریص به حل مسائلی تمایل دارد که جواب آن فوق‌العاده تنک است. در سایر موقعیت‌ها، روش‌های محدب معمولاً قدرتمند است. از طرف دیگر، روش‌های حریص پیچیدگی محاسباتی قابل قبولی دارند.

^۶ Matching Pursuit

^۷ Basis Pursuit with Inequality Constraints

^۸ Basis pursuit denoising

^۹ Dantzig selector

^{۱۰} Size, Weight, and Power

^۱ K-sparse

^۲ Basis Pursuit

^۳ Orthogonal Matching Pursuit

^۴ Greedy pursuit

^۵ Convex relaxation

رابطه (۳-۱) تعریف می‌شود که M در آن یک عدد اول بزرگتر یا مساوی ۵ است. f_n در این عبارت برابر رابطه (۳-۲) است [۲۴].

$$f_A = (f_n)_{n=0}^{M-1} \quad (۱-۳)$$

$$f_n = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{2\pi i n^3 / M} \quad (۲-۳)$$

ماتریس Alltop با استفاده از روابط (۴-۱) تا (۴-۴) به‌دست می‌آید. در این روابط $\Phi^{(k)}$ ، D_k و W_M ماتریس‌های $M \times M$ بُعدی هستند. به هر کدام از $\Phi^{(k)}$ ‌ها در رابطه (۴-۱) یک بلوک گفته می‌شود. D_k در رابطه (۴-۳) عمل شیفت زمانی و W_M در رابطه (۴-۴) نیز کار شیفت فرکانسی را انجام می‌دهد. مقدار ω_M در رابطه (۴-۴) برابر $\omega_M = e^{2\pi i / M}$ می‌باشد.

$$\Phi = (\Phi^{(0)} | \Phi^{(1)} | \dots | \Phi^{(M-1)}) \quad (۱-۴)$$

$$\Phi^{(k)} = D_k \cdot W_M, \quad 0 \leq k \leq M-1 \quad (۲-۴)$$

$$D_k = \text{diag}\{f_k, \dots, f_{M-1}, f_0, \dots, f_{k-1}\} \quad (۳-۴)$$

$$W_M = (\omega_M^{pq})_{p,q=0}^{M-1} \quad (۴-۴)$$

ستون اول $\Phi^{(k)}$ شامل بردار f شیفت یافته به اندازه k واحد در زمان است. مابقی ستون‌های ماتریس $\Phi^{(k)}$ شامل $M-1$ شیفت فرکانسی ممکن از ستون اول آن است. چون M شیفت فرکانسی ممکن برای هر شیفت زمانی وجود دارد، M^2 ترکیب از شیفت‌های زمانی-فرکانسی خواهیم داشت [۱۲].

از جمله ویژگی‌های ماتریس Alltop این است که میزان هم‌دوسی هر ستون در هر بلوک $\Phi^{(k)}$ از ماتریس Φ با خودش برابر یک و با هر ستون دیگر از همان بلوک برابر صفر است. علاوه بر این میزان هم‌دوسی دو ستون مجزا از دو بلوک مختلف $\Phi^{(k)}$ و $\Phi^{(k')}$ ، $k \neq k'$ ، در ماتریس $M \times M^2$ بُعدی Alltop برابر $1/\sqrt{(M+1)}$ است [۱۲].

برای ماتریس $M \times M^2$ بُعدی Alltop با M اندازه‌گیری، تنها می‌توان انتظار بازسازی سیگنال‌هایی را داشت که تعداد نقاط غیر صفر آن‌ها در حوزه تنک کمتر از M باشد. در واقع، برای بازسازی هر سیگنال K -تنکی باید رابطه (۵) برقرار باشد. C در این رابطه یک مقدار بزرگتر از صفر است [۱۲].

$$K \leq C \cdot M / \log(M) \quad (۵)$$

یکی از محدودیت‌های استفاده از ماتریس Alltop این است که اگر M شرط اول بودن را نداشته باشد ماتریس ناهم‌دوس نخواهد بود و در نتیجه کاربردی در حسگری فشرده نخواهد داشت. استفاده از Alltop محدودیت دیگری نیز دارد و آن این است که ماتریس اندازه‌گیری در این روش باید برابر $M \times M^2$ باشد. به عبارت دیگر بردار سیگنال در رابطه $y = \Phi x$ باید تعداد M^2 مولفه داشته باشد [۱۲]. تلاش ما بر این است که بر این محدودیت‌ها غلبه نماییم.

راداری، میزان تنکی سیگنال غالباً برابر با تعداد اهداف راداری است [۴]. بر اساس نظریه حسگری فشرده، این سیگنال تنک را می‌توان با نرخ نمونه‌برداری بسیار کمتر از نرخ نایکوئیست و با دقتی بهتر از فیلتر منطبق بازبازی کرد [۲۴].

روش حسگری فشرده تصویر راداری را با کیفیت بالا و با تعداد نمونه‌های کمتر در مقایسه با دیگر روش‌ها ارائه می‌دهد [۸] و علاوه بر آن می‌تواند تعداد پالس‌های مورد نیاز برای دستیابی به تفکیک پذیری بهتر را کاهش دهد و در نتیجه از میزان پیچیدگی محاسباتی هنگام پردازش سیگنال راداری بکاهد [۲۵].

۵- طراحی ماتریس اندازه‌گیری

هدف از طراحی ماتریس اندازه‌گیری یافتن مجموعه‌ای از سیگنال‌های مجزا از هم است که در معادله $y = \Phi x$ صدق کنند و قرار دادن هر بردار سیگنال مجزا در رابطه $y = \Phi x$ ، یک بردار اندازه‌گیری مجزا را نتیجه دهد. به عبارت دیگر ماتریس اندازه‌گیری باید طوری طراحی شود که اگر دو سیگنال باهم برابر نباشند بردارهای اندازه‌گیری به‌دست آمده از ضرب ماتریس اندازه‌گیری با بردارهای سیگنال هم برابر نباشند [۲].

ماتریس اندازه‌گیری برای سیگنال‌های راداری معمولاً ماتریس تصادفی انتخاب می‌شود. گرچه بازبازی دقیق سیگنال با استفاده از ماتریس تصادفی با احتمال بالایی ممکن است و این ماتریس ناهم‌دوسی بالایی با هر ماتریس پایه‌ای دارد. با این حال ماتریس‌های تصادفی به پیچیدگی محاسباتی بالایی نیاز دارند و به بافر کردن حافظه بزرگی به خاطر ماهیت کاملاً بدون ساختارشان محتاج هستند. به همین دلیل به کارگیری این ماتریس‌ها در سامانه‌های سنجش، از نظر پیچیدگی محاسباتی و حافظه مورد نیاز، عملی هزینه‌بر است. بنابراین بهتر است به جای استفاده از ماتریس‌های تصادفی از ماتریس‌های معین به‌عنوان ماتریس اندازه‌گیری استفاده شود [۲، ۲۶].

نوع دیگری از ماتریس‌های اندازه‌گیری، یک زیرمجموعه تصادفی یکنواخت از ماتریس اورتونرمال است. ماتریس فوریه جزیبی^۱ یک نمونه از این ماتریس‌ها است. گرچه ماتریس فوریه جزیبی برای پیاده‌سازی سریع و موثر شناخته شده است فقط در حوزه تبدیل یا در حالتی که ماتریس پایه یک ماتریس یکنواخت^۲ است به خوبی عمل می‌کند [۲۶].

یکی از انواع ماتریس‌های معین ماتریس Alltop است که از دنباله^۳ Alltop به‌دست می‌آید [۱۲-۱۳]. دنباله Alltop به صورت

^۱ Partial Fourier

^۲ Unitary matrix

^۳ Sequence

۶- روش پیشنهادی

پیشنهادی و ماتریس Alltop به‌عنوان ورودی‌های الگوریتم OMP استفاده می‌شود و مقدار MSE در حالت‌های مختلف بررسی می‌گردد.

بعد از آن که ثابت شد می‌توان از ماتریس پیشنهادی در الگوریتم OMP استفاده کرد و به نتایج بهتری نسبت به ماتریس Alltop دست یافت نوبت استفاده از روش بیان شده، در سامانه‌های راداری می‌رسد. به همین منظور و در قسمت دوم از این بخش یک سامانه راداری با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و فیلتر منطبق و الگوریتم OMP با ورودی‌های ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop به سیگنال دریافتی جهت آشکارسازی اهداف راداری اعمال می‌شود و نتایج به‌دست آمده باهم مقایسه می‌گردد.

ذکر این نکته ضروری است که در تمام شبیه‌سازی‌ها، M تعداد اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد و در قسمت‌های مختلف شبیه‌سازی به تناسب موضوع مورد بررسی، مقدار متفاوتی به خود می‌گیرد. N نیز برابر با تعداد مولفه‌های بردار سیگنال است. بردار اندازه‌گیری حسگری فشرده یک بردار $M \times 1$ بُعدی است. M برای بردار اندازه‌گیری تعداد مولفه‌های آن بردار است و برای ماتریس اندازه‌گیری با ابعاد $M \times N$ تعداد سطرهاى ماتریس را نشان می‌دهد.

۷-۱- کارایی روش پیشنهادی در حسگری فشرده

بردار سیگنال اولیه، مجموع دو شکل موج سینوسی در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که یک شکل موج سینوسی در حوزه فوریه ۲ نقطه غیرصفر دارد لذا بردار سیگنال اولیه که مجموع دو شکل موج سینوسی است، ۴ نقطه تنک خواهد داشت.

برای بازیابی سیگنال در حضور نویز، از الگوریتم OMP استفاده کرده و ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop، به‌عنوان ورودی‌های الگوریتم در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه به ازای تعداد اندازه‌گیری‌های مختلف، نسبت سیگنال به نویزهای مختلف و تعداد نقاط تنک مختلف بردار سیگنال بازسازی خواهد شد. افزایش تعداد نقاط تنک به معنای افزایش تعداد سینوسی‌ها است. برای این که مشخص شود کدام ماتریس کارایی بهتری دارد متوسط مجذور خطای^۱ خروجی‌ها با استفاده از رابطه (۶) به دست خواهد آمد.

$$E\{\|s - s^*\|_2^2\} \quad (6)$$

$E\{\cdot\}$ در این رابطه نماد میانگین، $\|\cdot\|_2$ نورم دو، s بردار سیگنال و s^* سیگنال بازیابی شده است. هر کدام از روش‌ها که MSE کمتری داشته باشد کارایی بیشتری خواهد داشت و در نتیجه بازیابی دقیق‌تری خواهیم داشت.

بردار سیگنال K -تنک به طول N را در نظر بگیرید. قرار است با استفاده از دنباله Alltop به طول M تعریف شده با رابطه (۳-۱) و با استفاده از روابط (۴-۱) تا (۴-۴) یک ماتریس $M \times N$ بُعدی طراحی شود که در آن M لزوماً اول نیست و N نیز لزوماً برابر مجذور M نیست. به عبارت دیگر قرار است ماتریسی طراحی شود که محدودیت‌های روش پیشین را نداشته باشد.

نحوه عملکرد بدین صورت است که ابتدا دنباله با طول M با استفاده از رابطه (۳-۱) تولید می‌شود. مقدار M را می‌توان با استفاده از رابطه (۵) تعیین کرد. سپس، دنباله تولید شده در یک پنجره مناسب ضرب می‌شود. این پنجره می‌تواند پنجره همینگ یا هر پنجره دیگری به طول M باشد. این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که میزان همدوسی کاهش یابد. در ادامه پایه اورتونرمال دنباله ضرب شده در پنجره، به‌دست می‌آید و پس از آن با استفاده از روابط (۴-۱) تا (۴-۴) و با برابر قرار دادن f_0 در رابطه (۴-۳) با پایه اورتونرمال به‌دست آمده، ماتریس اندازه‌گیری Φ ساخته می‌شود. ماتریس ساخته شده ماتریسی در ابعاد $M \times M^2$ خواهد بود.

قرار است ماتریسی به طول $M \times N$ ساخته شود که N در آن طول بردار سیگنال است و لزوماً برابر M^2 نمی‌باشد ولی کوچکتر از آن است. برای این منظور تعداد N ستون از ستون‌های ماتریس ساخته شده به‌طور تصادفی انتخاب شده و به‌عنوان ستون‌های ماتریس جدید در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در بخش قبلی نیز بیان شد، از جمله ویژگی‌های ماتریس Alltop این است که میزان همدوسی هر ستون در هر بلوک $\Phi^{(k)}$ از ماتریس Φ با خودش برابر یک و با هر ستون دیگر از همان بلوک برابر صفر است. با انتخاب تصادفی ستون‌ها سعی می‌شود که تا حد امکان از همه بلوک‌های ماتریس ساخته شده یک به چند ستون انتخاب نمود. ماتریس جدید ماتریسی به طول $M \times N$ خواهد بود که از آن می‌توان در پیاده‌سازی الگوریتم‌های حسگری فشرده استفاده نمود.

۷- شبیه‌سازی

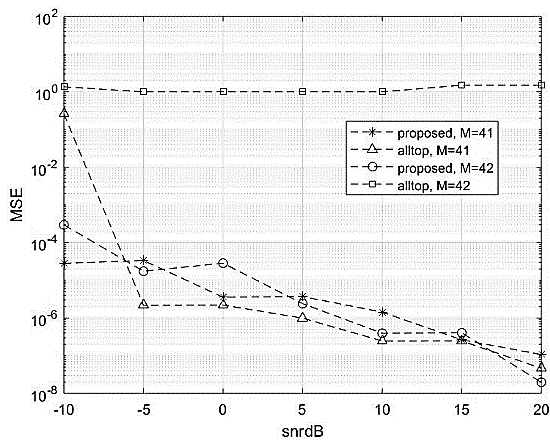
ابتدا باید ثابت شود که از ماتریس پیشنهادی می‌توان به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های حسگری فشرده استفاده کرد. بعد از اثبات این مساله می‌توان ادعا کرد که امکان استفاده از روش پیشنهادی در سامانه‌های راداری وجود دارد. بنابراین در قسمت اول این بخش، کارایی روش پیشنهادی در حسگری فشرده بررسی می‌شود. برای این منظور یک سیگنال نویزی تولید می‌شود و عملکرد روش پیشنهادی در حضور نویز بررسی می‌گردد. کاری که الگوریتم حسگری فشرده در این مورد انجام می‌دهد بازسازی سیگنال در حضور نویز است. برای بازیابی سیگنال، از ماتریس

^۱ Mean Square Error (MSE)

پیشنهادی با پنجره همینگ حتی در حالتی که تعداد اندازه‌گیری‌ها یک مقدار غیر اول است عملکرد قابل قبولی دارد.

جدول (۱) نشان می‌دهد که استفاده از پنجره در روش پیشنهادی ضروری است. به همین خاطر در ادامه شبیه‌سازی‌ها از پنجره همینگ برای تولید ماتریس پیشنهادی استفاده شده است.

شکل (۲)، MSE را به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف با $M = 41$ و $M = 42$ اندازه‌گیری جهت بازسازی سیگنال سینوسی با استفاده از الگوریتم OMP و در نظر گرفتن ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop به‌عنوان ورودی‌های الگوریتم OMP نشان می‌دهد.



شکل (۲) MSE به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف با $M = 41$ و $M = 42$ اندازه‌گیری برای بازسازی سیگنال سینوسی با استفاده از الگوریتم OMP.

تعداد مولفه‌های بردار سیگنال در این حالت برابر مجذور M انتخاب می‌شود. به‌عنوان مثال اگر $M = 41$ باشد تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر ۱۶۸۱ مولفه و اگر $M = 42$ باشد، تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر ۱۷۶۴ مولفه خواهد بود. با مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف در شکل (۲) می‌توان نتیجه گرفت در حالت اول یعنی در صورتی که M اول باشد ماتریس Alltop کارایی بهتری دارد. ولی این نکته را باید در نظر داشت که روش پیشنهادی نیز در این حالت عملکرد قابل قبولی دارد.

در حالت دوم یعنی در صورتی که M یک عدد غیر اول باشد ماتریس Alltop کارایی خود را از دست خواهد داد در حالی که اگر ماتریس پیشنهادی در این حالت به‌عنوان ورودی الگوریتم انتخاب شود سیگنال را با دقت بالایی بازسازی خواهد نمود.

شکل (۳)، MSE را به ازای تعداد نقاط تنک مختلف و اندازه‌گیری‌های برابر با $M = 37$ و $M = 38$ اندازه‌گیری و نسبت سیگنال به نویز برابر با ۱۰ dB جهت بازسازی سیگنال با استفاده از الگوریتم OMP نشان می‌دهد.

جدول (۱)، MSE را به ازای اندازه‌گیری‌های مختلف با ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop برای بازسازی سیگنال با استفاده از الگوریتم OMP نشان می‌دهد.

جدول (۱): MSE برای ماتریس Alltop و روش پیشنهادی با پنجره مستطیلی و پنجره همینگ به ازای اندازه‌گیری‌های مختلف با $SNR = 10 \text{ dB}$ جهت بازسازی سیگنال با استفاده از الگوریتم OMP.

ماتریس Alltop	روش پیشنهادی با پنجره مستطیلی	روش پیشنهادی با پنجره همینگ	روش
$M=40$	0.500057	$6.26 E^{-7}$	0.372526
$M=41$	$9.51 E^{-8}$	$2.95 E^{-6}$	$2.6 E^{-6}$
$M=42$	1.500021	$7.38 E^{-7}$	0.250911
$M=43$	$1.86 E^{-8}$	$4.52 E^{-7}$	$7.62 E^{-7}$
$M=44$	۱	$7.28 E^{-7}$	$1.61 E^{-6}$
$M=45$	1.24987	$8.44 E^{-7}$	0.504107
$M=46$	0.249962	$1.07 E^{-6}$	0.251403
$M=47$	$2.7 E^{-8}$	$2.62 E^{-7}$	$5.93 E^{-7}$
$M=48$	1.449335	$1.56 E^{-7}$	1.088112
$M=49$	$6.33 E^{-9}$	$8.65 E^{-7}$	$8.46 E^{-7}$
$M=50$	1.250018	$6.86 E^{-7}$	0.250855

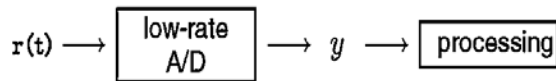
نسبت سیگنال به نویز در این حالت ۱۰ dB انتخاب شده است. تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر به مجذور M است. به‌عنوان مثال در حالتی که $M = 40$ می‌باشد، بردار سیگنال، برداری در ابعاد 1600×1 خواهد بود. این کار به این دلیل صورت می‌گیرد که بتوان از ماتریس Alltop جهت مقایسه با ماتریس پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها استفاده کرد. بنابراین و با توجه به رابطه $y = \Phi x$ ، بردار سیگنال یک بردار $M^2 \times 1$ بُعدی، ماتریس اندازه‌گیری یک ماتریس $M \times M^2$ بُعدی و بردار اندازه‌گیری یک بردار $M \times 1$ بُعدی خواهد بود. برای به‌دست آوردن داده‌های مربوط به جدول (۱)، علاوه بر مقایسه روش پیشنهادی با ماتریس Alltop، تاثیر استفاده از پنجره در روش پیشنهادی نیز بررسی شده است. برای تولید ماتریس پیشنهادی از دو پنجره یکی پنجره همینگ به طول M و دیگری پنجره مستطیلی به طول M استفاده شده است. استفاده از پنجره مستطیلی به طول M به این معنی است که از هیچ پنجره‌ای در روش پیشنهادی استفاده نمی‌شود.

ماتریس Alltop تنها در شرایطی خوب عمل می‌کند که تعداد اندازه‌گیری‌ها یک عدد اول باشد. نکته دیگری که از این جدول نتیجه می‌شود تاثیر استفاده از پنجره در روش پیشنهادی است. زمانی که اصلاً از پنجره استفاده نمی‌شود، نتایج به‌دست آمده فرق چندانی با ماتریس Alltop ندارد. در حالی که ماتریس

می‌توان استفاده کرد که تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر مجذور M باشد و M یک عدد اول باشد. در غیر این صورت ماتریس Alltop کارایی نخواهد داشت.

۲-۷- مقایسه مولفه‌های راداری

یک سامانه راداری که از نوع استقراری و ثابت است و چند هدف ثابت یا متحرک را آشکارسازی می‌کند در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و فیلتر منطبق و الگوریتم حسگری فشرده در گیرنده به سیگنال دریافتی اعمال می‌شود (شکل ۱). برای استفاده از الگوریتم حسگری فشرده، کفایت آن را جایگزین فیلتر منطبق دیجیتال در گیرنده کرد (شکل ۵). در ادامه متوسط مجذور خطای خروجی‌های به‌دست آمده از سیگنال اصلی باهم مقایسه خواهد شد. هر کدام از خروجی‌ها که MSE کمتری داشته باشد کارایی بهتری دارد.



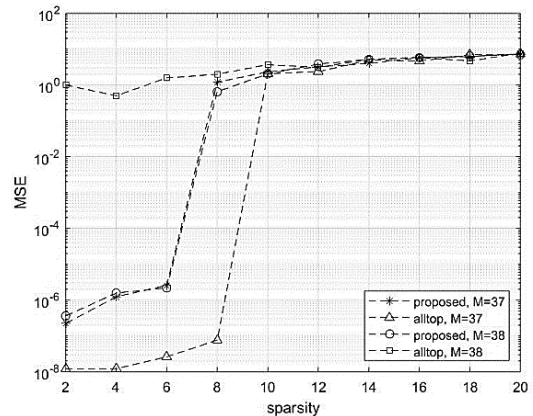
شکل (۵): استفاده از حسگری فشرده در پردازش سیگنال راداری، $r(t)$ برابر با سیگنال دریافتی از هدف و y برابر با بردار اندازه‌گیری است.

تفکیک‌پذیری رادار 20m است. تعداد هدف‌های قرار گرفته در محدوده تحت پوشش رادار سه هدف و در فواصل دور از هم در نظر گرفته می‌شود. اگر موقعیت رادار در مختصات کارتیزین برابر $[0, 0, 0]$ در نظر گرفته شود هدف اول به طور فرضی در مختصات $[1000, 0, 0]$ ، هدف دوم در $[2000, 0, 0]$ و هدف سوم در $[3000, 0, 0]$ خواهد بود. اهداف ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته می‌شوند. جدول (۲)، مولفه‌های رادار مونواستاتیک مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مولفه‌های راداری مورد استفاده در شبیه‌سازی.

فرکانس کاری رادار	۲ GHz
شکل موج ارسالی رادار	سیگنال LFM
تعداد پالس ارسالی	۲۰ پالس
پهنای باند	۷/۵ MHz
نرخ نمونه‌برداری نایکوئیست	۱۵ MHz

سیگنال دریافتی یک بردار با تعداد نمونه $N = 600$ می‌باشد. تعداد اندازه‌گیری‌ها برابر $M = 30$ اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ماتریس اندازه‌گیری یک ماتریس 30×600 بُعدی خواهد بود. ماتریس ورودی الگوریتم OMP، ماتریس پیشنهادی انتخاب شده و نتیجه به‌دست آمده با فیلتر منطبق مقایسه می‌شود. جدول (۳)، MSE را برای رادار ثابت و اهداف بدون حرکت به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف و $M = 30$ اندازه‌گیری با ماتریس پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل (۳): MSE به ازای تعداد نقاط تنک مختلف و $SNR = 10\text{ dB}$ با $M = 38$ و $M = 37$ اندازه‌گیری برای بازسازی سیگنال با استفاده از الگوریتم OMP.

در این حالت‌ها نیز تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر مجذور M انتخاب می‌شود. بنابراین اگر $M = 37$ باشد تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر ۱۳۹۶ مولفه و زمانی که $M = 38$ باشد، تعداد مولفه‌های بردار سیگنال برابر ۱۷۶۴ مولفه خواهد بود.

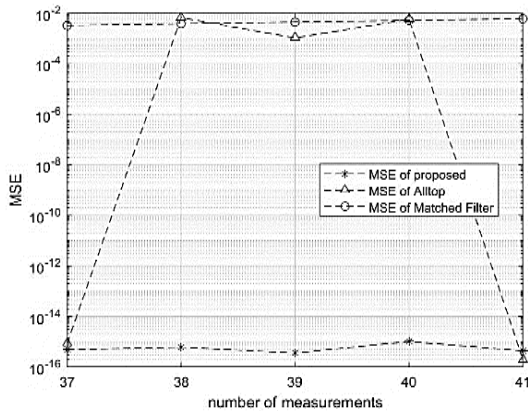
در شکل (۳) هر چه بر تعداد نقاط تنک افزوده می‌شود میزان خطا افزایش یافته و در نتیجه از میزان دقت در بازسازی سیگنال کاسته می‌شود. در مواردی که سیگنال میزان تنکی کمتری دارد ماتریس پیشنهادی توان بازیابی سیگنال را دارد ولی همانطور که از شکل (۳) نیز پیداست ماتریس Alltop در حالت $M = 37$ ، بهتر عمل می‌کند.

در حالتی که $M = 38$ است، ماتریس پیشنهادی میزان خطای کمتری در مقایسه با ماتریس Alltop دارد. گرچه با افزایش نقاط تنک میزان خطا نیز افزایش می‌یابد ولی میزان خطای ماتریس پیشنهادی به مراتب کمتر از ماتریس Alltop است. امکان استفاده از ماتریس Alltop در این حالت ($M = 38$) ممکن نیست.

همانطور که از جدول (۱) و شکل‌های (۲) و (۳) نیز مشخص است، در حالتی که تعداد اندازه‌گیری‌ها یک مقدار اول است ماتریس Alltop میزان خطای کمتری نسبت به ماتریس پیشنهادی دارد و در نتیجه بازیابی دقیق‌تری از سیگنال انجام می‌دهد. تحت این شرایط و وقتی که تعداد نقاط تنک کمتری وجود دارد می‌توان از ماتریس پیشنهادی نیز برای بازیابی سیگنال استفاده کرد ولی ماتریس Alltop ارجحیت دارد. اما وقتی تعداد اندازه‌گیری‌ها یک مقدار غیر اول انتخاب می‌شود ماتریس پیشنهادی موفق‌تر عمل کرده و با MSE بسیار کمتر از ماتریس Alltop کار تخمین و بازسازی سیگنال را انجام می‌دهد. بنابراین در این حالت بر ماتریس Alltop ارجحیت دارد. یادآوری این نکته ضروری است که از ماتریس Alltop تنها در زمانی

زمانی که تعداد اندازه‌گیری‌ها یک عدد اول است هر دو ماتریس کار آشکارسازی اهداف راداری را به خوبی انجام می‌دهند، ولی اگر این شرط برقرار نباشد ماتریس پیشنهادی بهتر عمل کرده و با میزان خطای بسیار کمتر نسبت به ماتریس Alltop، کار آشکارسازی را با دقت بالایی انجام می‌دهد.

برای این‌که مشخص شود کدام روش، روش فیلتر منطبق یا حسگری فشرده، تفکیک‌پذیری بالاتری دارد محل قرارگیری اهداف راداری نسبت به رادار، نزدیک هم و در فواصل ۱۳۰۲ m، ۱۳۰۸ m و ۱۳۱۴ m از رادار فرض می‌شود. نتیجه شبیه‌سازی به ازای نسبت سیگنال به نویز برابر ۲۰ dB و اندازه‌گیری‌های مختلف ماتریس‌های اندازه‌گیری، به صورت شکل (۷) خواهد بود.



شکل (۷): MSE برای اهداف نزدیک هم و $SNR = 20$ dB برای رادار ثابت و اهداف بدون حرکت.

شکل (۷) به وضوح نشان می‌دهد که فیلتر منطبق در این حالت کارایی خود را از دست می‌دهد و توانایی آشکارسازی اهداف نزدیک هم را ندارد. در صورتی که حسگری فشرده این قابلیت را دارد که این اهداف را با دقت بالایی آشکارسازی نماید. در این حالت نیز ماتریس پیشنهادی بهتر از ماتریس Alltop عمل می‌کند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که اهداف راداری را می‌توان با استفاده از حسگری فشرده با دقت بالایی آشکارسازی کرد. با استفاده از حسگری فشرده در سامانه‌های راداری برای آشکارسازی اهداف، دیگر نیازی به استفاده از فیلتر منطبق نیست و با تعداد نمونه‌های کمتر نسبت به بقیه روش‌ها میزان خطا را می‌توان کاهش داد. این کار باعث بهبود در حساسیت سامانه می‌گردد.

انتخاب ماتریس اندازه‌گیری برای بازیابی سیگنال با استفاده از حسگری فشرده مساله بسیار مهمی است. لذا مقالات علمی

جدول (۳): MSE برای رادار ثابت و اهداف بدون حرکت به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف و $M = 30$ اندازه‌گیری با ماتریس پیشنهادی.

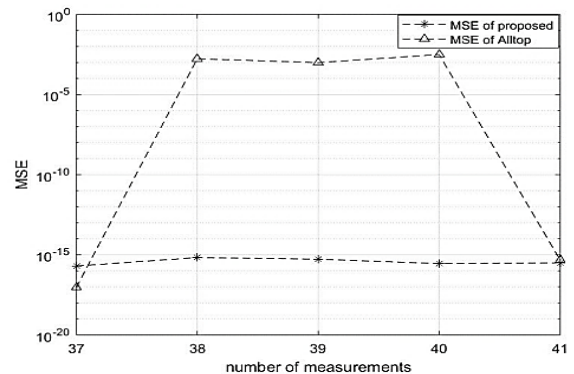
	Matched filter	OMP
$SNR = 0$ dB	1.2352×10^{-13}	1.4561×10^{-14}
$SNR = 5$ dB	2.0317×10^{-13}	1.5853×10^{-14}
$SNR = 10$ dB	9.8028×10^{-13}	2.3287×10^{-14}
$SNR = 15$ dB	1.4235×10^{-11}	4.0887×10^{-16}
$SNR = 20$ dB	9.7962×10^{-4}	4.0887×10^{-16}

حسگری فشرده سیگنال دریافتی را با تعداد نمونه‌های کمتر (۳۰ نمونه در این شبیه‌سازی) بازسازی می‌نماید. در حالی که فیلتر منطبق این کار با ۶۰۰ نمونه انجام می‌دهد. بنابراین حسگری فشرده در مقایسه با فیلتر منطبق حافظه کمتری را اشغال می‌کند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ازای نسبت سیگنال به نویزهای مختلف، روش پیشنهادی میزان خطای کمتری در مقایسه با فیلتر منطبق دارد و نسبت به آن کاربردی‌تر است.

در صورتی که تعداد اندازه‌گیری‌ها درست انتخاب گردد الگوریتم OMP با ماتریس پیشنهادی موفق‌تر از فیلتر منطبق عمل خواهد کرد و چون از تعداد نمونه‌های کمتری استفاده می‌شود باعث بالا رفتن سرعت پردازش و تصمیم‌گیری می‌گردد و علاوه بر این منجر به کاهش خطا در سامانه می‌شود.

در ادامه برای مقایسه کارایی ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop در سامانه‌های راداری با در نظر گرفتن شرایط قبلی، اهداف به ازای اندازه‌گیری‌های مختلف و با استفاده از الگوریتم OMP آشکارسازی می‌شود. شکل (۶) MSE را به ازای اندازه‌گیری‌های مختلف برای ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop به عنوان ورودی‌های الگوریتم OMP برای رادار ثابت و اهداف بدون حرکت نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز برابر ۲۰ dB فرض می‌شود. تفکیک‌پذیری سامانه راداری در این حالت برابر ۱۰ m انتخاب شده است.



شکل (۶): MSE به ازای اندازه‌گیری‌های مختلف برای ماتریس پیشنهادی و ماتریس Alltop با الگوریتم OMP برای رادار ثابت و اهداف بدون حرکت.

- [7] D. Cohen, Y. C. Eldar, and A. M. Haimovich, "SUMMER: Sub-Nyquist MIMO Radar," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 16, p. 4315–4330, Aug 2018.
- [8] Y. Yu, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, "CSSF MIMO radar: Compressive-sensing and stepfrequency based MIMO radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48, no. 2, p. 1490–1504, 2012.
- [9] E. Giusti, D. Cataldo, A. Bacci, S. Tomei, and M. Martorella, "ISAR image resolution enhancement: Compressive sensing versus state-of-the-art super-resolution techniques," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 54, no. 4, p. 1983–1997, Aug 2018.
- [10] M. H. Aghababae, M. F. Sabahi, A. R. Forouzan, "Moving Target Detection in Stepped Frequency Radars using Compressive Sensing," *Journal of Radar*, vol. 4, no. 3, pp. 15-31, 2016 (In Persian).
- [11] E. J. Candès, J. Romberg, T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Transactions on information theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, 2006.
- [12] M. A. Herman, T. Strohmer, "High-resolution radar via compressed sensing," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 57, no. 6, pp. 2275-2284, 2009.
- [13] W. Alltop, "Complex sequences with low periodic correlations (Corresp.)," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 26, no. 3, pp. 350 - 354, May 1980.
- [14] Y. Gu, N. A. Goodman and A. Ashok, "Radar Target Profiling and Recognition Based on TSI-Optimized Compressive Sensing Kernel," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 12, pp. 3194-3207, June 2014.
- [15] L. C. Potter, E. Ertin, J. T. Parker, and M. Çetin, "Sparsity and compressed sensing in radar imaging," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 6, p. 1006–1020, 2010.
- [16] S. Kingsley and Sh. Quegan, *Understanding radar systems*, SciTech Publishing, 1999.
- [17] B. R. Mahafza, *Radar signal analysis and processing using MATLAB*, Chapman and Hall CRC, 2009.
- [18] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289 - 1306, April 2006.
- [19] S. Chen, D. L. Donoho, and M. A. Saunders, "Atomic Decomposition by Basis Pursuit," *SIAM J. Sci Comp.*, vol. 20, no. 1, pp. 33-61, 1999.
- [20] E. Candès and T. Tao, "The Dantzig selector: Statistical estimation when p is much larger than n ," *Ann. Statist.*, vol. 35, no. 6, pp. 2313-2351, 2007.
- [21] J. A. Tropp, "Greed is good: Algorithmic results for sparse approximation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 10, p. 2231–2242, Oct. 2004.
- [22] J. A. Tropp, J. N. Laska, M. F. Duarte, J. K. Romberg, and R. G. Baraniuk, "Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 1, p. 520– 544, Jan. 2010.
- [23] Y. Yu, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, "MIMO radar using compressive sampling," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 4, no. 1, p. 146–163, Feb. 2010.
- [24] Y. Gu, N. A. Goodman, "Information-Theoretic Compressive Sensing Kernel Optimization and Bayesian Cramér–Rao Bound for Time Delay Estimation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 17, pp. 4525 - 4537, Sept. 2017.
- [25] Y. Yu, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, "Measurement matrix design for compressive sensing based MIMO radar," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 11, p. 5338–5352, Nov 2011.

بسیاری به این موضوع پرداخته و آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مقاله نیز یک ماتریس معین بهینه شده برای بازیابی سیگنال معرفی شد و نشان داده شد در صورتی که تعداد اندازه‌گیری‌ها اول نباشد، این ماتریس نسبت به ماتریس Alltop عملکرد بهتری دارد و با میزان خطای کمتری بازیابی دقیق‌تری از سیگنال ارائه می‌دهد. چون ماتریس پیشنهادی یک ماتریس معین است پیاده‌سازی آن در سامانه‌های راداری امکان‌پذیر است. گرچه از پنجره همینگ برای کاهش هم‌دوسی ماتریس پیشنهادی استفاده شد ولی اگر بتوان پنجره‌ای طراحی کرد که میزان هم‌دوسی ماتریس پیشنهادی را بیشتر کاهش دهد، میزان خطا در بازیابی سیگنال کاهش یافته و احتمال بازیابی سیگنال نیز افزایش خواهد یافت.

عملکرد ماتریس پیشنهادی در سامانه‌های راداری که از روش حسگری فشرده برای آشکارسازی اهداف استفاده می‌کنند نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفت و برای مشخص کردن کارایی آن در این سامانه‌ها، فیلتر منطبق و الگوریتم OMP با ورودی ماتریس پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفتند و میزان خطای آن‌ها در آشکارسازی اهداف راداری توسط نرم‌افزار متلب استخراج گردید. همچنین نشان داده شد که روش حسگری فشرده با ماتریس پیشنهادی تفکیک‌پذیری بالاتری از فیلتر منطبق دارد و اهداف راداری نزدیک به هم را با دقتی بالاتر و میزان خطایی کمتر آشکارسازی می‌نماید. بنابراین استفاده از این روش در سامانه‌های راداری باعث کاهش میزان خطا و بهبود حساسیت سامانه می‌گردد.

۹- مراجع

- [1] M. Rossi, A. M. Haimovich, and Y. C. Eldar, "Spatial compressive sensing for MIMO radar," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 2, p. 419–430, Jan. 2014.
- [2] M. F. Duarte and Y. C. Eldar, "Structured compressed sensing: From theory to applications," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 9, p. 4053–4085, Sep. 2011.
- [3] X. Tan, W. Roberts, J. Li, and P. Stoica, "Sparse learning via iterative minimization with application to MIMO radar imaging," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 1088-1101, Mar. 2011.
- [4] L. Anitori, A. Maleki, M. Otten, R. G. Baraniuk, and P. Hooeboom, "Design and analysis of compressed sensing radar detectors," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 4, pp. 813-827, 2013.
- [5] R. Baraniuk and P. Steeghs, "Compressive radar imaging," in *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, pp. 128-133, 2007.
- [6] C. Knill, B. Schweizer, S. Sparrer, F. Roos, R. F. H. Fischer, and C. Waldschmidt, "High Range and Doppler Resolution by Application of Compressed Sensing Using Low Baseband Bandwidth OFDM Radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 7, pp. 3535-3546, Jun. 2018.

- [30] L. Zhang et al., "Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 10, p. 3824–3838, Oct. 2010.
- [31] J. Yang, J. Thompson, X. Huang, T. Jin, and Z. Zhou, "Random-frequency SAR imaging based on compressed sensing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 2, p. 983–994, 2013.
- [32] Q. Huang, L. Qu, B. Wu, and G. Fang, "UWB through-wall imaging based on compressive sensing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 3 PART2, pp. 1408–1415, 2010.
- [26] E. Candès and J. Romberg, "Sparsity and incoherence in compressive sampling," *Inverse Problems*, vol. 23, no. 3, 2007.
- [27] S. Foucart and H. Rauhut, *A mathematical introduction to compressive sensing*, Birkhäuser Basel, 2013.
- [28] S. Khwaja and J. Ma, "Applications of compressed sensing for sar moving-target velocity estimation and image compression," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 8, p. 2848–2860, 2011.
- [29] L. Zhao, L. Wang, G. Bi, and L. Yang, "An autofocus technique for high-resolution inverse synthetic aperture radar imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 10, p. 6392–6403, 2014.