حذف کلاتر قوی دریا با استفاده از الگوریتم DUET BSS

حمزه قهرمانی[۱] **مرتضی براری**[۲]

۱- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی مرکز بندر خمیر- هرمزگان- ایران
hamze.ghahramani@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران
barari@mut.ac.ir

چکیده: حذف کلاتر یکی از مسائل بسیار مهم در پردازش سیگنال های راداری است. همچنین الگوریتم های BSS از جمله روش های جدید و بسیار مهم در پردازش سیگنال است که کارآمدی خود را برای جداسازی سیگنال در بسیاری از زمینه ها نشان داده است. DUET نیز یکی از الگوریتم های BSS نامعین است که هر تعداد منبعی را فقط با دو مخلوط جداسازی می نماید. در این مقاله ما این الگوریتم را برای حذف کلاتر و جداسازی هدف استفاده نموده ایم. جهت انجام آزمایش شبیه سازی شده، هدف و کلاتری که به صورت مصنوعی تولید شده اند را با SCR مشخص به هم اضافه نموده ایم. سپس، کلاتر را در این مخلوط سیگنال راداری از طریق روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم DUET BSS حذف نموده ایم. در نهایت، کارآمدی روش با مقایسه آن با حذف کننده خط تاخیر نشان داده شده است. شبیه سازی و مقایسه انجام شده به خوبی نشان می دهد که الگوریتم استفاده شده قادر به حذف کلاتر و آشکارسازی هدف است.

کلمات کلیدی: BSS، DUET، جداسازی منابع کور، رادار، کلاتر.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۶/۲۶
تاریخ پذیرش مشروط : ۱۳۹۲/۱۲/۲
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۹/۱۷
نام نویسنده‌ی مسئول : حمزه قهرمانی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – هرمزگان –بندر خمیر– دانشگاه آزاد اسلامی مرکز بندر خمیر – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

۱- مقدمه

حذف کلاتر در رادار از مهمترین قسمت های پردازش سیگنال آن به حساب می آید. کلاتر، به خصوص کلاتر دریا، در بسیاری از موارد مانع از آشکار سازی صحیح هدف می گردد. این موضوع زمانی که هدف با سرعت بسیار کم و نزدیک به صفر حرکت می کند و یا ساکن است بسیار مشکل تر می گردد. زیرا که کلاتر و هدف در یک سلول داپلر ظاهر می گردند و امکان فیلتر کردن کلاتر سخت و بعضا غیر ممکن است[۱]. حال اگر هدف ضعیف باشد این موضوع باز هم مشکل تر می گردد. در این شرایط، راه حل آشکارسازی، مدل کردن PDF هدف و کلاتر و آشکارسازی مبتنی بر آن است. آشکار سازهای Bayesian Direct Filter و Bayesian Smoother [۱-۴] از جمله این آشکار سازها هستند. ضعف این نوع روش ها مشکل بودن مدل کردن PDF کلاتر دریا و همچنین هدف است. در این خصوص، مدل دقیقی از PDF هدف در دست نیست [۵-۶] و معمول نسخه تغییر مقیاس داده شده PDF کلاتر را به عنوان PDF هدف در نظر می گیرند که نتایج قابل قبولی به دست می دهد[۲]. سعی ما بر این است روشی را ابداع کنیم که نیازی به مدل کردن PDF هدف و کلاتر نداشته باشد و بدون نیاز به اطلاعات قبلی و به صورت آنلاین قابل پیاده سازی باشد. در این راستا، با توجه به الگوریتم های موجود در BSS و ICA، و با توجه به موفقیت های این روش ها در جداسازی سیگنال های صوتی، سیگنال های بیولوژیکی (مثل ECG، EMG، EEG و ...)، سیگنال های تصویری و ... و همچنین پیشرفت و موفقیت این روش در موارد عملی به کار گرفته شده [۷-۱۱]، سعی کرده ایم مناسب ترین آن ها را برای سیگنال های راداری انتخاب نموده و آن را برای حذف کلاتر و آشکار سازی هدف استفاده کنیم. اضافه می شود که در رادار زمانی که هدف در حال حرکت است معمولا با استفاده از روش های طیفی مثل MTI یا فیلتر بانک داپلر (در رادارهای پالس داپلر) جداسازی هدف از کلاتر انجام می شود. همچنین، در صورت ساکن بودن یا سرعت کند هدف این روش ها دیگر کارامد نیستند زیرا که هدف در سلول داپلر کلاتر جای می گیرد [۱۲-۱۴].

الگوریتم های BSS خطی به دو دسته آنی و کانولوتیو تقسیم می شوند [۸]. در مخلوط های آنی، m منبع سیگنال ناشناخته $s_i(k)$ ، $1<i<m$ برای به دست آمدن n سیگنال مخلوط اندازه گیری شده $x_j(k)$، $1<j<n$ به صورت زیر با هم ترکیب شده اند:

$$x_j(k)=\sum_{i=1}^{m} a_{ij}s_i(k)+v_j(k) \qquad (۱)$$

که a_{ij} ضرایب سیستم مخلوط کننده نامتغیّر با زمان خطی است که به وسیله ماتریس A که $m\times n$ است نمایش داده شده است و $v_j(k)$ نویز تجمعی در j امین سنسور است.

هدف BSS برای مخلوط های آنی این است که ضرایب یک ماتریس جداساز $(m\times n)B$ را به گونه ای تنظیم کند که:

$$y_i(k)=\sum_{j=1}^{n} b_{ij}(k)x_j(k) \qquad (۲)$$

یک تخمین از یک منبع اصلی سیگنال مثل $s_{i'}(k)$ برای تعدادی از تخصیص های $i\rightarrow i'$ بدون تکرار باشد.

در حالی که بسیاری از الگوریتم ها برای حالت مخلوط های آنی توسعه یافته اند، ولی سیستم های عملی بایستی بیشتر از مخلوط های کانولوتیو استفاده کنند [۸-۹]. مخلوط های کانولوتیو در اثر تأخیر ناشی از انتشار سیگنال در محیط و یا در اثر اکوهای سیگنال از اشیاء مختلف به وجود می آیند. در زیر m منبع به صورت یک سیستم چند کاناله متفرق کننده زمان با هم مخلوط شده اند:

$$x_j(k)=\sum_{l=-\infty}^{+\infty}\sum_{i=1}^{m} a_{jil}s_i(k-l)+v_j(k) \qquad (۳)$$

که $x_j(k)$، $1<j<n$ سیگنال های دریافتی از n منبع می باشد و a_{jil} ضرایب سیستم مخلوط کننده تغییر ناپذیر با زمان خطی زمان گسسته $\{A_l\}_{l=-\infty}^{+\infty}$ است که هر ماتریس A_l دارای ابعاد $m\times n$ است. بدون هیچ قید اضافه ای، یک سیستم BSS کانولوتیو، سیگنال مخلوط $x_j(k)$ را به گونه ای پردازش می کند که:

$$y_j(k)=\sum_{l=-\infty}^{+\infty}\sum_{i=1}^{m} b_{ijl}x_j(k-l) \qquad (۴)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

یک تخمین فیلتر شده از منبع $s_{i'}(k)$ باشد به طوری که با $i \to i'$ هیچ تکراری ایجاد نشود.

بیشتر الگوریتم هایی که تا کنون ارائه شده اند برای زمانی کاربرد دارند که تعداد عناصر X و s با هم برابرند، یعنی زمانی که تعداد منابع و تعداد سیگنال های مشاهده شده (سیگنال های مخلوط یا سیگنال های ضبط شده توسط سنسورها) با هم برابرند. در این حالت مسأله به کلاسی خاص بر می گردد که تحت عنوان BSS چند سنسوره شناخته[1] می شود[۸]. در حالتی که تعداد مخلوط از تعداد منابع کمتر باشد، در اصطلاح مسأله را BSS نامعیّن[2] یا جداسازی مؤلفه های تنک[3] (SCA) می گویند[۸]، و در حالتی که تنها یک سنسور برای برداشت سیگنال داریم، یا در واقع فقط یک مخلوط داریم و تعداد سیگنال های منبع بیش از یکی است مسأله را تحت عنوان BSS تک سنسوره[4] می شناسیم. با توجه به ماهیت سیگنال رادار و اینکه سیگنال رادار مجموعه ای از اکوهای دارای دامنه و تاخیر متفاوت است می توان سیگنال رادار را مخلوط کانولوتیو درنظرگرفت. در این مقاله سعی ما بر این بوده است که کلاتر را با استفاده از تنها دو مخلوط حذف نماییم (دو مخلوط که از هدف و کلاتر ساخته شده اند). برای این کار از الگوریتم Degenerate Unmixing Estimation Technique (DUET) که جز دسته BSS نامعین طبقه بندی می شود استفاده نموده ایم [۷]. در الگوریتم DUET فقط با استفاده از دو سنسور اقدام به سیگنال گیری می کنیم و سپس جدا سازی را انجام می دهیم [۷-۸]. بدیهی است که در اکثر رادارها به دلیل اینکه ما فقط یک سنسور (آنتن) داریم از روش های BSS چند سنسوره نمی توان به راحتی استفاده نمود. ما در این مقاله فرض نموده ایم که حداقل دو مخلوط داریم تا بتوانیم از الگوریتم DUET استفاده نماییم. ولی به هر ترتیب در استفاده از الگوریتم DUET در موارد عملی باز هم مخلوط دوم را در اختیار نداریم. برای رفع این مشکل ما در بخش ۳-۴ این مقاله پیشنهاد نموده ایم که از یکی از سلول های فاصله کناری که فقط شامل کلاتر است استفاده نماییم که در واقع ایده کلیدی این مقاله نیز از همین جا نشات می گیرد.

در الگوریتم DUET، هر تعداد منبعی را فقط با استفاده از دو مخلوط جدا سازی می کنیم. این روش زمانی معتبر است که منابع دارای تعامد w-disjoint هستند، که این موضوع زمانی اتفاق می افتد که تبدیل فوریه پنجره بندی شده سیگنال ها در مخلوط disjoint هستند. برای سیگنال های بی پژواک منابع تأخیر یافته و تضعیف شده، این روش اجازه می دهد که پارامترهای مخلوط کننده به وسیله جفت های تأخیر – تضعیف نسبی استخراج شده از نسبت نمایش زمان – فرکانس مخلوط ها تخمین زده شود. سپس پارامترهای تخمین زده شده مخلوط برای پارتیشن - بندی نمایش زمان – فرکانس یکی از مخلوط ها برای بازیابی منابع اصلی استفاده می شود. این تکنیک حتی زمانی که تعداد منابع بیشتر از تعداد مخلوط ها باشد معتبر است. الگوریتم DUET مسأله Degenerate Demixing را به روشی موثر و قوی حل می کند. روش DUET یاد شده را می توان در یک جمله خلاصه کرد [۸]:

این امکان وجود دارد که یک تعداد دلخواه از منابع را با در دست داشتن فقط دو مخلوط بدون پژواک و با فراهم آوردن نمایش زمان – فرکانس منابع که خیلی زیاد با هم همپوشانی نداشته باشند کورکورانه جدا کرد.

فرض ما در این مقاله این است که اکوهای ناخواسته از همه جا را به عنوان یک سیگنال جداگانه در نظر بگیریم و اکوی ناشی از هدف را یک سیگنال دیگر، که این دو سیگنال به طور آنی با هم مخلوط شده اند.

ما در این مقاله، پس از تشریح الگوریتم DUET و جزییات آن، اقدام به توصیف و توجیه روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم DUET نموده ایم. برای توصیف روش پیشنهادی، ابتدا ساختار داده رادار مرور شده است و سپس بلوک دیاگرام روش پیشنهادی ارایه شده است. سپس سعی کرده ایم سیگنال رادار (کلاتر و هدف) را شبیه سازی نموده و سپس اقدام به ساختن یک سری سیگنال راداری (مخلوط شبیه سازی شده) بنمائیم. سیگنال های شبیه سازی شده به عنوان دو مخلوط با روش پیشنهادی ارایه شده بر اساس الگوریتم DUET مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج آن به خوبی نشان از کارآمدی روش پیشنهادی دارد. در نهایت برای نشان دادن هر چه بیشتر اعتبار روش، نتیجه به دست آمده با خروجی فیلتر MTI مقایسه شده است که در این مقایسه برتری روش به وضوح دیده می شود.

۲- الگوریتم DUET

همه الگوریتم های BSS بر اساس یک سری فرض اولیه کار می کنند. از جمله مهمترین این فرض ها مستقل بودن منابع، غیر گوسی بودن منابع، غیر ایستان بودن سیگنال ها و ... می باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

در الگوریتم DUET فرض هایی مهم و اساسی وجود دارد که عملکرد صحیح الگوریتم به آنها وابسته است.

۲-۱- فرضیات لازم برای DUET

برای اینکه الگوریتم DUET قابل استفاده باشد سیگنال های منابع باید دارای شرایط زیر باشد که طبق چند فرض ارائه شده است. این فرض ها به صورت زیر هستند:

۱- مخلوطی بدون پژواک[۵] از سیگنال ها داشته باشیم.

۲- تعامد w-disjoint[۶] در سیگنال های مخلوط وجود داشته باشد.

۳- ایستایی محلی[۷] در سیگنال وجود داشته باشد.

۴- سنسورهای گیرنده سیگنال به هم نزدیک باشد.

چگونگی این فرضیات با جزئیات کامل در مراجع [۷] و [۸] آمده است.

سوالی که می بایست در اینجا پاسخ داده شود این است که آیا فرضیات فوق در مورد سیگنال های راداری نیز صدق میکند یا خیر؟ در مورد فرض اول بایستی اشاره کنیم که هیچ سیگنال راداری بدون پژواکی وجود ندارد همانگونه که هیچ سیگنال صوتی بدون پژواکی وجود ندارد. در [۷]، نویسنگان در نهایت به این نتیجه می رسند که الگوریتم DUET در حالتی که سیگنال صوتی دارای پژواک نیز هست در نهایت پاسخ خوبی برای جداسازی حاصل می شود. بنابراین میتوانیم این نتیجه را به سیگنال های راداری نیز تعمیم دهیم که نتایج شبیه سازی های موجود در این مقاله نیز موید این نظر است. در واقع فرض شماره ۱ جهت پایه ریزی پایه تئوری الگوریتم انجام شده است که در موارد عملی قابل اصلاح است. تعامد w-disjoint به وضوح در مورد سیگنال های راداری صدق می کند. همچنین با توجه به مطالب گفته شده در [۱]، می توانیم بگوییم که ایستایی محلی در سیگنال های راداری وجود دارد. در نهایت، سنسورهای گیرنده را نیز می توانیم با توجه به شرایط عملی نزدیک به هم قرار دهیم تا شرط چهارم نیز ارضا شود.

۲-۲- نکات مهم و گام های اساسی DUET

دو فرض بدون پژواک بودن مخلوط ها و ایستایی محلی آن ها به ما اجازه می دهد که معادلات مخلوط ها را به صورت زیر بنویسیم [۸]:

$$\begin{bmatrix}\hat{x}_1(\tau,w)\\ \hat{x}_2(\tau,w)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & \dots & 1\\ a_1e^{-i\omega\delta_1} & \dots & a_Ne^{-i\omega\delta_N}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\hat{s}_1(\tau,w)\\ \cdot\\ \cdot\\ \cdot\\ \hat{s}_N(\tau,w)\end{bmatrix} \quad (۵)$$

و با توجه به فرض تعامد w-disjoint، در نهایت یکی از منابع در هر (τ,w) فعال است و فرآیند مخلوط کننده را می توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\begin{bmatrix}\hat{x}_1(\tau,w)\\ \hat{x}_2(\tau,w)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\\ a_je^{-i\omega\delta_j}\end{bmatrix}\hat{s}_j(\tau,w) \quad (۶)$$

برای هر (τ,w) و برای هر j

در معادله فوق، j به (τ,w) بستگی دارد که در آن j شاخص منبع فعال در (τ,w) است.

مهم ترین نکته که DUET از آن استفاده می کند تا جداسازی را فقط با دو مخلوط انجام دهد استفاده از نسبت نمایش های زمان– فرکانس مخلوط هاست. این نسبت به مؤلفه های همه منابع بستگی ندارد و فقط به پارامترهای مخلوط کننده مرتبط با مؤلفه های منبع فعال بستگی دارد. یعنی:

$$\forall(\tau,w)\in\Omega_j,\ \frac{\hat{x}_2(\tau,w)}{\hat{x}_1(\tau,w)}=a_je^{-i\omega\delta_j} \quad (۷)$$

$$\Omega_j=\{(\tau,w):\ \hat{s}_j(\tau,w)\neq 0\}$$

پارامترهای مخلوط کننده مرتبط با هر نقطه زمان- فرکانس را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\tilde{\alpha}\left((\tau,w)\right):=\left|\hat{x}_2(\tau,w)/\hat{x}_1(\tau,w)\right| \quad (۸)$$

$$\tilde{\delta}\left((\tau,w)\right):=\left(-1/\omega\right)\angle\hat{x}_2(\tau,w)/\hat{x}_1(\tau,w) \quad (۹)$$

با توجه به این فرض که سنسورها به اندازه کافی به هم نزدیک هستند و تحت شرایطی که تخمین تأخیر به سبب پیچش های اطراف صحیح نباشد، تخمین زننده تضعیف محلی $\tilde{\alpha}\left((\tau,w)\right)$ و تخمین زننده تأخیر محلی $\tilde{\delta}\left((\tau,w)\right)$ می توانند فقط روی مقادیر پارامترهای واقعی مخلوط کننده عمل کنند. بنابرای اجتماع جفت های $(\tilde{\alpha}\left((\tau,w)\right),\tilde{\delta}\left((\tau,w)\right))$ که روی همه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

(τ,w) ها گرفته شده اند مجموعه پارامترهای مخلوط کننده (α_i,δ_j) را به صورت زیر به دست می دهد:

$$\bigcup_{(\tau,w)}\left\{\left(\tilde{\alpha}\left((\tau,\mathrm{w})\right),\tilde{\delta}\left((\tau,\mathrm{w})\right)\right)\right\}=\left\{\left(\alpha_j,\delta_j\right):\mathrm{j}=1,\ldots,\mathrm{N}\right\} \quad (۱۰)$$

اکنون مجموعه جفت های پارامتر مخلوط کننده را می دانیم. اگر تابع نماینده هر منبع را تعیین کنیم می توانیم در قالب ماسک کردن دو دویی جداسازی را انجام دهیم. تابع نماینده را به صورت زیر تعیین می کنیم:

$$\mathcal{M}_j(\tau,\mathrm{w})=\begin{cases}1 & \left(\tilde{\alpha}\left((\tau,\mathrm{w})\right),\tilde{\delta}\left((\tau,\mathrm{w})\right)\right)=\left(\alpha_j,\delta_j\right)\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۱۱)$$

و سپس با استفاده از ماسک، جدا سازی را انجام می دهیم.

به طور خلاصه ضروریات روش DUET به صورت زیر است:

۱- نمایش زمان– فرکانس هر دو مخلوط را می سازیم.

۲- نسبت دو مخلوط را به دست می آوریم و تخمین پارامترهای مخلوط کننده محلی را استخراج می کنیم.

۳- مجموعه تخمین پارامترهای مخلوط کننده محلی را به جفت های متناظر با جفت های پارامتر مخلوط کننده حقیقی ترکیب می کنیم.

۴- برای هر جفت پارامتر مخلوط کننده تعیین شده متناظر با نقاط زمان- فرکانس (که آن را جفت پارامتر مخلوط کننده خاص به دست می دهد) یک ماسک دودویی تولید می کنیم.

۵- منابع را به وسیله ضرب هر ماسک با یکی از مخلوط ها جدا سازی می کنیم.

۶- هر نمایش زمان– فرکانس را به دامنه زمان بر می گردانیم.

۲-۳- هیستوگرام وزن داده شده هموار شده دو بعدی[۸]

چون فرضیات ما در مورد سیگنال های به کار رفته در DUET به طور اکید بر آورده نمی شود، ما نیاز به یک مکانیسم جهت دسته بندی تخمین های تضعیف- تأخیر داریم. در مرجع [۷-۸]، تخمین زننده های Maximum-Likelihood(ML) برای δ_j و α_j در مدل مخلوط کننده ارائه شده است. به جای تخمین a_j، α_j را به صورت زیر تخمین می زنیم:

$$\alpha_j:=a_j-\frac{1}{a_j} \quad (۱۲)$$

که ما آن را تضعیف متقارن می گوییم. این بدان خاطر است که α_j دارای این خاصیت است که اگر سیگنال های سنسورها معاوضه شوند، تضعیف به طور متقارن به حول یک نقطه مرکزی (a=0) منعکس می گردد، یعنی a_j به $-a_j$ تبدیل می گردد. تضعیف متقارن محلی نیز به صورت زیر تعیین می گردد

$$\tilde{\alpha}\left((\tau,\mathrm{w})\right)=\left|\frac{\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})}{\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})}\right|-\left|\frac{\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})}{\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})}\right| \quad (۱۳)$$

مشابه به فرم تخمین زننده ML [۸] داریم:

$$\tilde{\alpha}_j=\frac{\iint_{(\tau,w)\in\Omega_j}\left|\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})\right|^p\omega^q\tilde{\alpha}\left((\tau,\mathrm{w})\right)d\tau d\omega}{\iint_{(\tau,w)\in\Omega_j}\left|\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})\right|^p\omega^q d\tau d\omega} \quad (۱۴)$$

و

$$\tilde{\delta}_j=\frac{\iint_{(\tau,w)\in\Omega_j}\left|\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})\right|^p\omega^q\tilde{\delta}\left((\tau,\mathrm{w})\right)d\tau d\omega}{\iint_{(\tau,w)\in\Omega_j}\left|\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})\right|^p\omega^q d\tau d\omega} \quad (۱۵)$$

که به وسیله پارامتر q و p مشخص است. برای انتخاب q و p حالت های متفاوتی با توجه به شرایط عملی، نوع سیگنال و . . . وجود دارد.

معادلات (۱۴) و (۱۵) یک هیستوگرام دو بعدی وزن داده شده را برای تعیین خوشه ها و تخمین پارامتر های مخلوط کننده (α_i,δ_j) پیشنهاد می دهند. این هیستوگرام ساختار کلیدی استفاده شده جهت مکان یابی و جدا سازی است. با استفاده از جفت های $\left(\tilde{\alpha}\left((\tau,\mathrm{w})\right),\tilde{\delta}\left((\tau,\mathrm{w})\right)\right)$ برای نشان دادن شاخص ها در هیستوگرام، و استفاده از $\left|\hat{x}_1(\tau,\mathrm{w})\hat{x}_2(\tau,\mathrm{w})\right|^p\omega^q$ برای وزن، خوشه های وزن روی جفت پارامتر های مخلوط کننده واقعی (α_i,δ_j) به طور مرکزی پدیدار خواهند شد. فرض کنید که جفت های (α_i,δ_j)، به طور مدلل از یکدیگر جدا شده باشند. هموار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

کردن هیستوگرام با یک پنجره که به اندازه کافی بزرگ انجام میشود. این کار به گونه ای صورت می گیرد که همه سهم یک منبع را بدون هم پوشانی کردن سهام منابع دیگر پوشش دهد. در نهایت N پیک متفاوت با مراکز (α_i,δ_j) که $j=1,...,N$ نتیجه خواهد شد. بنابراین، هیستوگرام وزن داده شده تخمین پارامترهای هر منبع را جدا سازی و خوشه بندی می کند. تعداد پیک ها، تعداد منابع را معلوم می کند، و مکان هر پیک پارامتر های مخلوط کننده بدون پژواک منبع مرتبط را معلوم می کند.

اکنون می توانیم به طور رسمی هیستوگرام وزن داده شده دو بعدی را با کمک تعیین مجموعه نقاطی که در یک محل داده شده در هیستوگرام شرکت دارند تعیین کنیم:

$$I(\alpha,\delta)=\left\{\begin{array}{c}(\tau,w)\ ;\left|\tilde{\alpha}\left((\tau,w)\right)-\alpha\right|<\Delta_\alpha\ ,\\ \left|\tilde{\delta}\left((\tau,w)\right)-\delta\right|<\Delta_\delta\end{array}\right\} \qquad (۱۶)$$

که Δ_α و Δ_δ پهناهای هموار سازی هستند. اکنون، هیستوگرام وزن داده شده هموار شده دو بعدی ساخته شده است:

$$H\left((\alpha,\delta)\right)=\iint\limits_{(\tau,w)\in I(\alpha,\delta)}\left|\hat{s}_j(\tau,w)\right|^{2p}\omega^q d\tau d\omega \qquad (۱۷)$$

همه وزن های مرتبط با نقاط زمان – فرکانس (که تخمین های (Δ_α,Δ_g) از $(\tilde{\alpha}\left((\tau,w)\right),\tilde{\delta}\left((\tau,w)\right))$ را در محلی مشارکت می (α,δ) می دهد) در هیستوگرام در (α,δ) کند. اگر همه فرضیات ارضا شوند، هیستوگرام دارای فرم زیر است:

$$H\left((\alpha,\delta)\right)=\left\{\begin{array}{cc}\iint\left|\hat{s}_j(\tau,w)\right|^{2p}\omega^q d\tau d\omega & \left|\alpha_j-\alpha\right|<\Delta_\alpha\ \&\left|\delta_j-\delta\right|<\Delta_\delta\\ 0 & \text{otherwise}\end{array}\right. \qquad (۱۸)$$

که N پیک متناظر و N منبع به طور واضح قابل مشاهده خواهند بود.

۲-۴- جدا سازی منابع

پارامترهای مخلوط کننده را می توان با مکان یابی پیک ها در هیستوگرام به دست آورد. روش های بسیاری از جمله peak model – base ، tracking و weighted k-means [۱۵] پیشنهاد شده است، منتهی تکنیک یگانه ای که کاملاً برای این کار مناسب باشد هنوز گزارش نشده است و اغلب این پیک ها را به صورت دستی تعیین می کنند. هر گاه که پیک ها تعیین شدند، هدف ما تعیین ماسک های فرکانس-زمان است که هر منبع را از مخلوط جدا خواهد کرد. چگونگی تعیین این ماسک ها در مراجع [۷] و [۱۶-۱۷] آمده است که مطالعه آن به خواننده واگذار می شود.

۲-۵- خلاصه الگوریتم BSS به روش DUET

۱- نمایش زمان– فرکانس $\hat{x}_1(\tau,w)$ و $\hat{x}_2(\tau,w)$ را از مخلوط های $x_1(k)$ و $x_2(k)$ می سازیم.

۲- زوج رابطه

$$\left|\frac{\hat{x}_2(\tau,w)}{\hat{x}_1(\tau,w)}\right|-\left|\frac{\hat{x}_1(\tau,w)}{\hat{x}_2(\tau,w)}\right|,-\frac{1}{w}\angle\left(\frac{\hat{x}_1(\tau,w)}{\hat{x}_2(\tau,w)}\right)$$

را محاسبه می کنیم.

۳- هیستوگرام وزن داده شده دو بعدی هموار شده $H\left((\alpha,\delta)\right)$ رابطه (۱۷) را می سازیم.

۴- پیک ها و مراکز آن ها (که تخمین زننده پارامترهای مخلوط کننده را تعیین می کنند) را در هیستوگرام مکان یابی می کنیم.

۵- برای هر مرکز پیک $(\tilde{\alpha}_j,\tilde{\delta}_j)$ یک ماسک های دودویی زمان– فرکانس می سازیم.

۶- هر کدام از ماسک ها را به مخلوط هایی که به طور مناسب مرتب شده اند، اعمال می کنیم.

۷- هر کدام از نمایش های زمان– فرکانس منابع تخمین زده شده را به دامنه زمانی بر می گردانیم.

۲-۶- تقریب متعامد بودن w-disjoint

به منظور این که بتوانیم روش DUET را اعمال کنیم بایستی فرض متعامد بودن w-disjoint را در مورد های سیگنال های راداری بررسی نماییم. در مراجع [۷]، [۸]، [۱۶] و [۱۷] روش هایی برای اندازه گیری و کمی سازی متعامد بودن w-disjoint ارائه شده است که می بایست قبل از اعمال این روش به سیگنال های راداری، این کمیّت محاسبه شود تا برقرار بودن فرض مشخص شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

۳- روش پیشنهادی

برای درک هر چه بیشتر روش پیشنهادی و توجیه دلیل استفاده از روش های Convolutive BSS، لازم است که رفتار و تلاطم امواج دریا و متعاقب آن رفتار کلاتر برگشتی از آن را مورد بررسی قرار دهیم. در این راستا، ایده کلیدی حذف کلاتر با استفاده از Convolutive BSS ارایه شده است.

رفتار کلاتر دریا با توجه به ناهمواری های سطح آن تعیین می شود [۱-۳]. این موضوع معمولا با تعریف دو نوع موج مشخص می گردد. اولین نوع از این امواج، امواج مویی (capillary waves) نامیده می شود که طول موج آنها (λ) در حد چند سانتی متر یا کمتر است. دومین نوع از این امواج که طول موجشان از کمتر از یک متر تا چند صد متر است Longer Gravity Waves (Sea or Swell) هستند [۲]. ما فرض می کنیم که شکل این دو نوع موج مشابه با شکل (۱پ) است و موج نشان داده شده در این شکل را Basic Arbitrary Wave (BAW) می نامیم. همچنین فرض می کنیم که ارتفاع و پهنای BAW مقداری ثابت است و هر نوع موجی را که در نظر بگیریم نسخه ای تغییر مقیاس یافته از این BAW می باشد. بنابراین می توانیم بگوییم که سیگنال برگشتی از هر موج نیز، نسخه ای تاخیر یافته و تضعیف شده از سیگنال برگشتی از BAW می باشد. شکل (۱الف) نمایش سمبلیکی از یک قسمت فرضی از دریا را نشان می دهد که از مجموعه ای از انواع امواج تشکیل شده است. تفاوت بین شکل های (۱الف) و (۱ب) نشان دهنده اثر امواج بلند و متوسط در سطح دریا می باشد.

برای توجیه روش پیشنهادی، ما دو حالت در نظر می گیریم: (۱) زمانی که فقط امواج مویی در سطح دریا وجود دارد و (۲) زمانی که علاوه بر امواج مویی امواج بلند و متوسط نیز در سطح دریا وجود داشته باشد. در مدل پیشنهادی ما، امواج بلند و متوسط در شکل (۱ب) نشان داده شده است. همان طوری که دیده می شود امواج بلند و متوسط فقط جهت گیری تکه بازتاب دهنده امواج رادار را نسبت به رادار و Line Of Sight (LOS) تغییر می دهد. بنابراین می توانیم بگوییم که امواج بلند فقط زاویه β نشان داده شده در شکل (۱ب) و (۱پ) را تغییر می دهد. سایر تغییرات در سطح دریا تنها زاویه β را در مدل ما تغییر می دهد. از آنجایی که در روش ما بازگشتی های حاصل از همه امواج دریا که به صورت یک نسخه تغییر تاخیر یافته و تضعیف شده از بازگشتی های حاصل از موج پایه دلخواه (BAW) هستند با هم جمع می شوند (مخلوط کانولوتیو) تا سیگنال بازگشتی به رادرا را بسازند بنابراین می توانیم بگوییم که چون تغییرات β فقط باعث تاخیر و تضعیف می شود پس مدل پیشنهادی ما را رد نمی کند و اتفاقا منطبق با آن است. در نهایت می توانیم بگوییم که تغییرات β (یا در واقع تغییرات در سطح دریا) خیلی نمی تواند مدل و فرضیات ما را تحت تاثیر قرار دهد که این موضوع در واقع در حذف سیگنال کلاتر دریا بسیار مهم است.

زمانی که در میدان دید رادار هدف وجود دارد می توان قسمتی از دریا که هدف در آن قرار دارد (سلول فاصله ای که توسط رادار روشن شده است) را به طور سمبلیک به صورت شکل (۱ت) نشان داد. در این حالت، بازگشتی های ناشی از هدف به صورت یک مولفه مستقل به مخلوط حاصل از امواج دریا اضافه می شود.

با توجه به مطالب گفته شده و شکل های (۱الف) و (۱ب) میتوانیم سیگنال برگشتی به رادار از یک سلول فاصله بدون حضور هدف زمانی که رادار یک تکه از دریا را روشن کرده است را به صورت زیر نوشت:

$$X_{r2}(k)=\sum_{l=1}^{L}a_{21l}\xi_1(k-l)=C_2(k) \qquad (۱۹)$$

که نمونه ای از یک سیگنال شامل کلاتر خالص و بدون هدف است. در این معادله، $\xi_1(k)$ سیگنال برگشتی از BAW است. زمانی که هدف وجود داشته باشد، با توجه به شکل (۱ت)، می توانیم سیگنال برگشتی از سلول فاصله شامل هدف را به صورت زیر بنویسیم:

$$X_{r1}(k)=\sum_{l=1}^{L}a_{11l}\xi_1(k-l)+\sum_{l=1}^{L}a_{12l}\xi_2(k-l) \qquad (۲۰)$$

$$X_{r1}(k)=C_1(k)+T(k) \qquad (۲۱)$$

یا به طور معادل:

$$X_{r1}(k)=\sum_{i=1}^{2}\sum_{l=1}^{L}a_{1il}\xi_1(k-l) \qquad (۲۲)$$

و در حالت کلی:

$$X_{rj}(k)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{L}a_{jil}\xi_j(k-l) \qquad (۲۳)$$

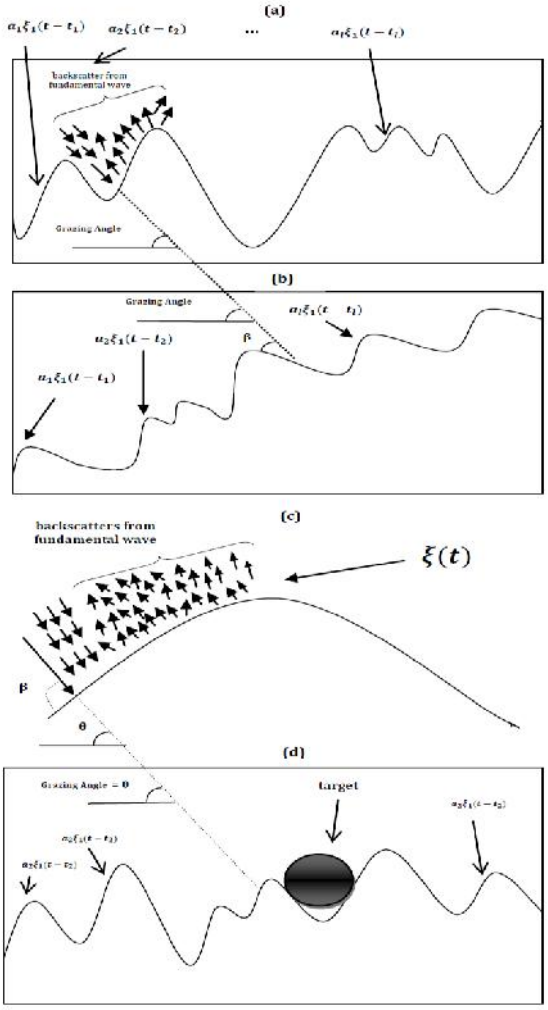
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

که $j = 1, \ldots\ldots, n$ و n تعداد منابع است. در این روابط، $\xi_1(k)$ سیگنال برگشتی از BAW است و $\xi_2(k)$ سیگنال برگشتی ناشی از هدف است. با توجه به مطالب گفته شده می توانیم نتیجه بگیریم که سیگنال برگشتی از رادار یک سیگنال کانولوتیو است که دارای دو منبع اصلی است. روش DUET با کمک تنها دو مخلوط می تواند هر تعداد منبعی که به صورت کانولوتیو مخلوط شده اند را جداسازی نماید. بنابراین استفاده از روش های BSS کانولوتیوی مثل DUET در اینجا منطقی به نظر می رسد.

برای توصیف روش پیشنهادی بایستی ساختار داده های رادار را نیز مرور کنیم. به طور خلاصه داده های رادار در یک مکعب داده مانند شکل (۲) ذخیره می گردند. این مکعب دارای سه بعد است: بعد زمان-آرام، بعد زمان-تند و بعد فاز. بعد فاز فقط در رادارهای آرایه فازی موجود است.

چون ما در این مقاله فقط روی رادارهای دریایی منواستاتیک غیر متحرک کار کرده ایم بعد سوم نداریم و ساختار داده رادار یک ماتریس به صورت شکل (۳) است. پردازش سیگنال رادار، برای حذف کلاتر و آشکار سازی هدف روی بعد زمان-آرام انجام می گیرد. مثلا در رادارهای MTI عملیات حذف کننده خط تاخیر (کنسلر) روی این بعد انجام می شود. یا در رادراهای پالس داپلر، این بعد را از فیلتر بانک داپلر عبور داده می شود. بنابراین با این بعد کار خواهیم داشت که در واقع همان سیگنال برگشتی از یک سلول فاصله رادار است.

فرض کنید که یک سری ماتریس داده داریم که همگی $M \times L$ هستند. سطرهای این ماتریس سلول های فاصله متوالی رادار هستند که در واقع همان بعد زمان آرام هستند. هدف در یک یا چند سلول فاصله موجود است که در یکی از این سلول ها دارای بیشترین توان است و بهتر آشکار سازی می شود (مثلا سلول r ام که تحت عنوان Cell Under Test یا CUT شناخته می شود). می خواهیم هدف موجود در CUT را آشکار سازی کنیم. در رادار MTI بایستی سلول های فاصله ۰ تا M-1 از حذف کننده خط تاخیر(کنسلر) عبور داده شوند. اگر اختلاف سرعت هدف و کلاتر کافی باشد یا به عبارتی در طیف داپلر سیگنال رادار (در صورتی که از بعد زمان-آرام فوریه بگیریم طیف داپلر سیگنال رادار به دست می آید) هدف به اندازه کافی از کلاتر تفکیک شده باشد پس از عبور از کنسلر، کلاتر حذف خواهد شد و هدف باقی می ماند که به راحتی قابل آشکار سازی خواهد بود.



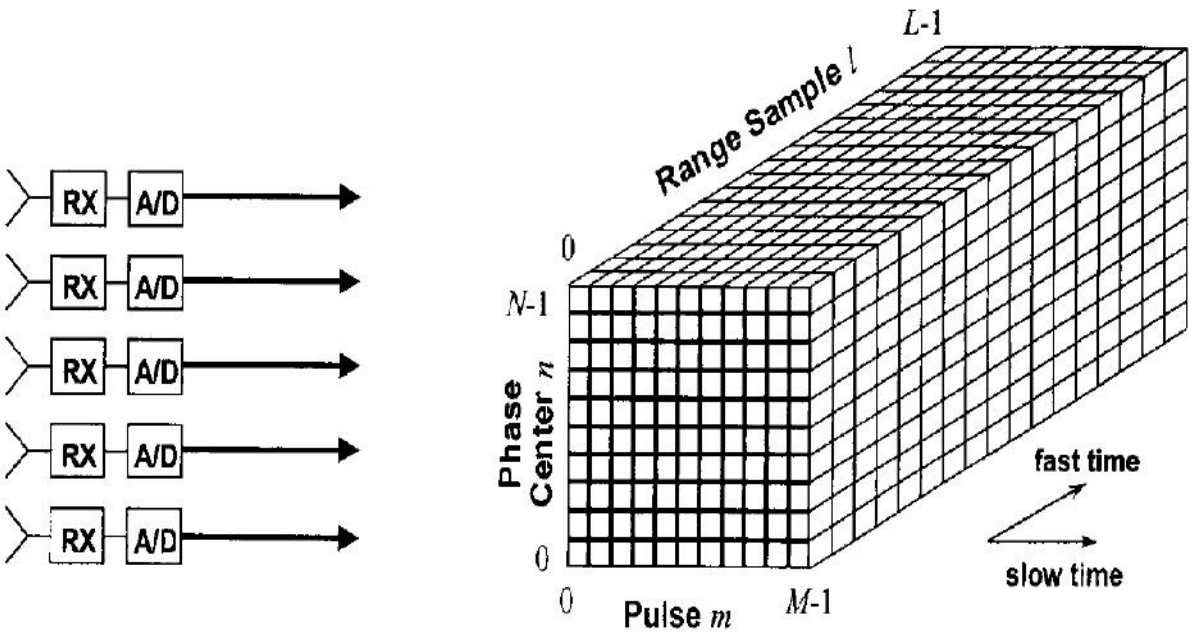
شکل (۱): الف) ترسیم نمادین قسمتی از سطح دریا ب) ترسیم نمادین تکه ای از سطح دریا که اثر امواج بلند را در بر دارد. ج) موج پایه دلخواه Basic Arbitrary Wave (BAW) د) ترسیم نمادین قسمتی از سطح دریا به همراه شی معلق در آن

در رادار پالس-داپلر نیز بعد زمان-آرام را از فیلتر بانک داپلر عبور می دهیم. یعنی سلول های فاصله ۰ تا M-1 را یکی یکی از فیلتر بانک داپلر عبور داده، تا اینکه هدف پس از عبورCUT از فیلتر بانک داپلر، استخراج شود. در صورتی این هدف استخراج می شود و کلاتر حذف می شود که فیلتر بانک داپلر به اندازه کافی بتواند بین سرعت های مختلف با فرکانس های داپلر متفاوت تفکیک فرکانسی ایجاد نماید. به هر ترتیب، میزان این تفکیک فرکانسی، با توجه به محدودیت های عملی رادار و ساخت فیلتر تا حدی است که نمی تواند هدف با سرعت کم و

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

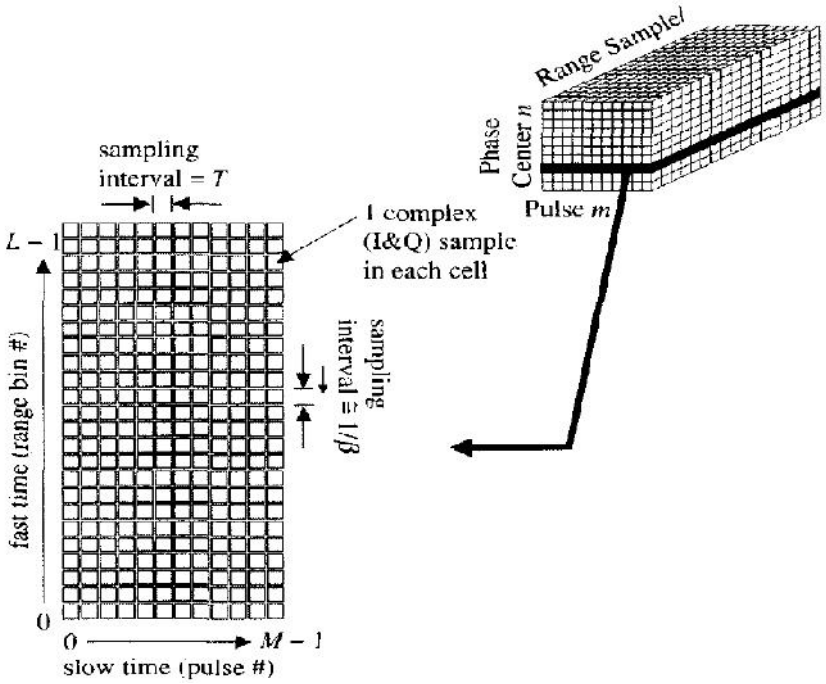
نزدیک به صفر را آشکار سازی نماید (این مشکل در کنسلر نیز وجود دارد). در هر صورت اهدافی که در سلول داپلر کلاتر جای گرفته اند قابل آشکار سازی نخواهند بود. در حالت دیگری ممکن است دامنه هدف اینقدر کوچک باشد که حتی پس از عبور از فیلتر بانک داپلر قابل اشکار سازی نباشد و از آستانه انتخاب شده برای اشکار سازی رادار، دامنه کوچک تری داشته باشد و باعث شود که رادار نتواند هدف را آشکار سازی نماید. پس حالت دامنه کوچک هدف یا هدف ضعیف و همچنین هدف موجود در سلول داپلر کلاتر، از مشکل ترین اهداف برای آشکار سازی هستند. در این حالت، با استفاده از روش های آماری PDF کلاتر و هدف را مدل کرده و سپس با استفاده از روش هایی مثل آشکار ساز Bayesian آن را آشکار سازی می نمایند. مشکل این روش نیز دسترس نبودن مدل مناسبی برای هدف و بعضا کلاتر است که ممکن است در بسیاری از مواقع مانع از آشکار سازی هدف شود. با این همه، ممکن است اهداف مختلف دارای PDF های مختلفی باشند و همین کار را مشکل تر می سازد. در برخورد و مواجهه با چند هدف نیز مشکل دو چندان می گردد. با این توضیحات، پیدا کردن روشی که به اطلاعات قبلی سیگنال رادار مثل PDF آن وابسته نباشد و وابستگی کمتری به دامنه هدف داشته باشد و همچنین در مواجهه با هدف موجود در سلول داپلر کلاتر قوی به درستی عمل کند و به تفکیک فرکانسی نیز وابسته نباشد، ضروری به نظر می رسد.

همان گونه که در قسمت های قبلی اشاره شد روش BSS استفاده شده در این مقاله یعنی DUET فقط نیاز به چند پیش شرط دارد. به علاوه با توجه به این پیش شرط ها این روش وابستگی ای به تفکیک داپلر هدف و کلاتر و همچنین PDF پیشنهادی برای آنها ندارد و به نسبت قدرت سیگنال هدف و کلاتر (TCR) نیز کمتر وابسته خواهد بود. همچنین چون الگوریتم DUET قادر است با دو مخلوط هر تعداد منبعی را بازیابی کند بنابراین در مواجهه با چندین هدف نیز به مشکل نخواهد خورد. این موضوع از دیگر مزایای الگوریتم DUET در مقایسه با سایر الگوریتم های BSS است. به عنوان مثال ممکن است استفاده از روش های BSS معین و چند سنسوره در زمان داشتن تنها یک هدف بهتر از DUET عمل کنند ولی در مواجهه با چند هدف قطعا اینگونه نخواهد بود. در نهایت تنها مساله حل پیش شرط شماره یک یعنی داشتن دو مخلوط است. در عمل چنین فرضی فقط در رادارهای Multistatic، آرایه فازی و یا هایبرید برآورده می شود. در رادار منو استاتیک یا بای استاتیک، فقط یک آنتن برای دریافت و در نتیجه فقط یک مخلوط داریم. با این تفاسیر باید این مساله را به گونه ای حل نماییم که در ادامه آمده است.

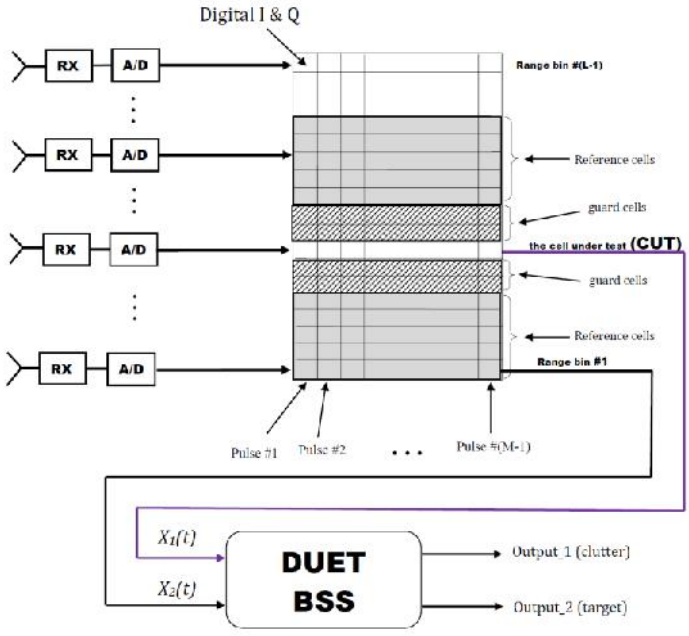


شکل (۲): مکعب داده رادار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

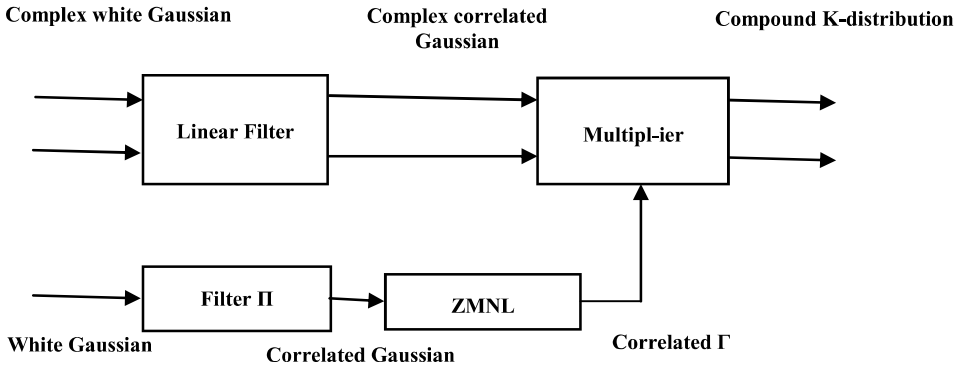


شکل (۳): ماتریس داده رادار

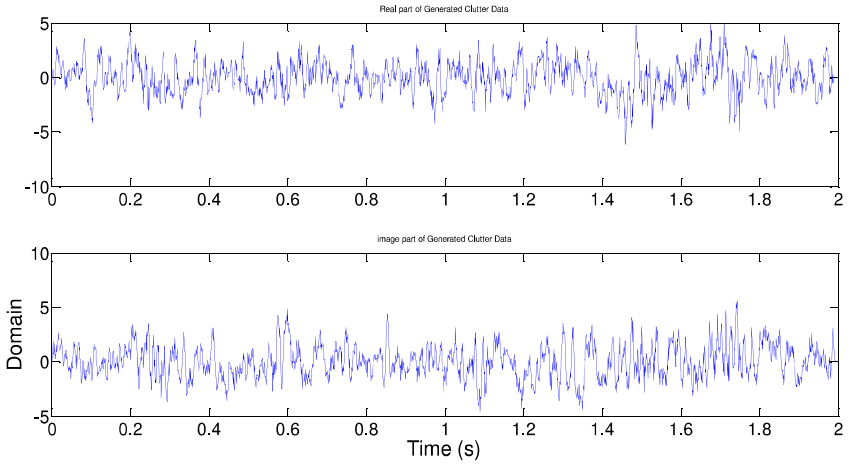


شکل (۴): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی بر اساس الگوریتم DUET

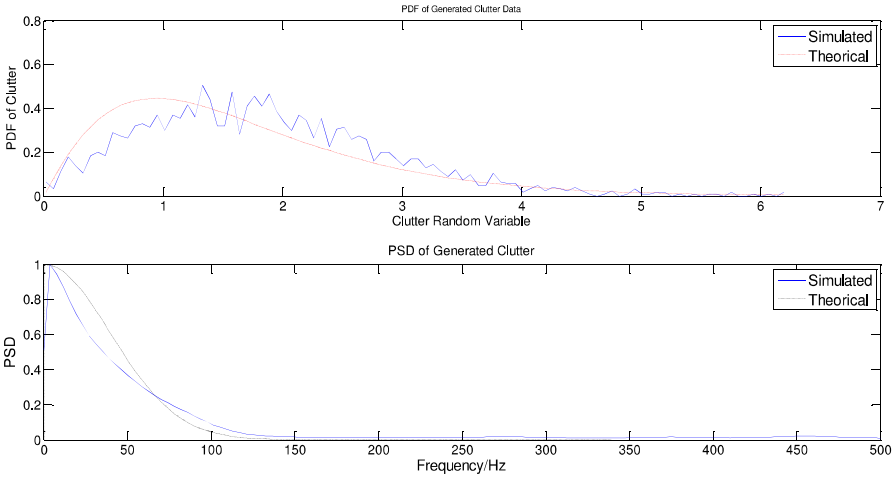
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]



شکل (۵): شمای شبیه سازی سیگنال کلاتر

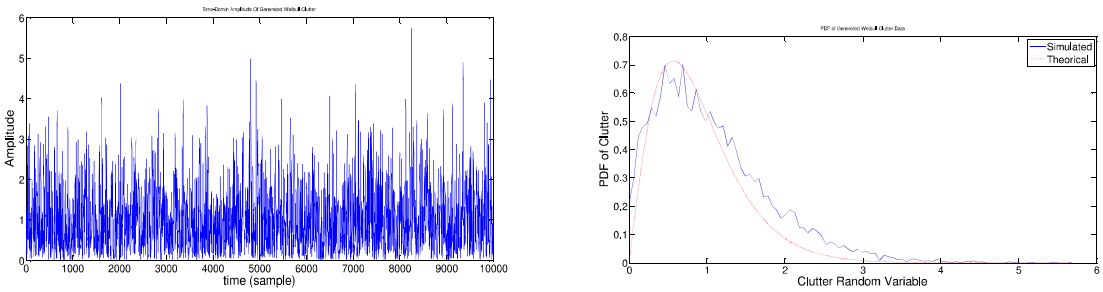


شکل (۶): مولفه های حقیقی و موهومی سیگنال کلاتر تولید شده با توزیع K

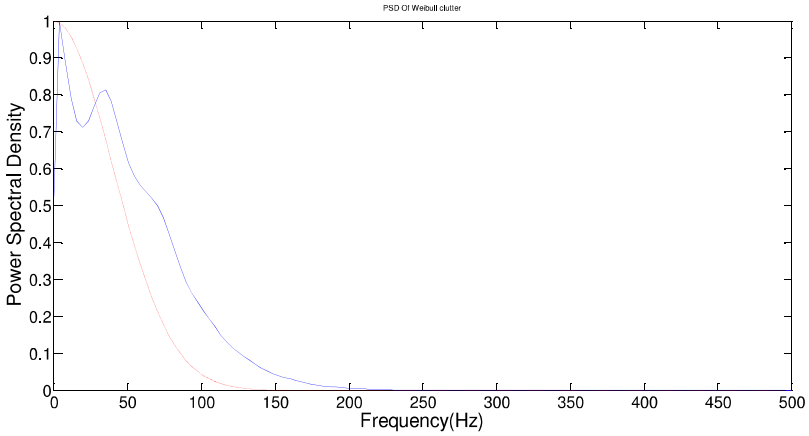


شکل (۷): PDF و PSD با توزیع K. مطابقت سیگنال تولیدی و تئوری مشهود است (رنگ قرمز مشخصه تئوریک و رنگ آبی مشخصه سیگنال تولید شده در شبیه سازی است).

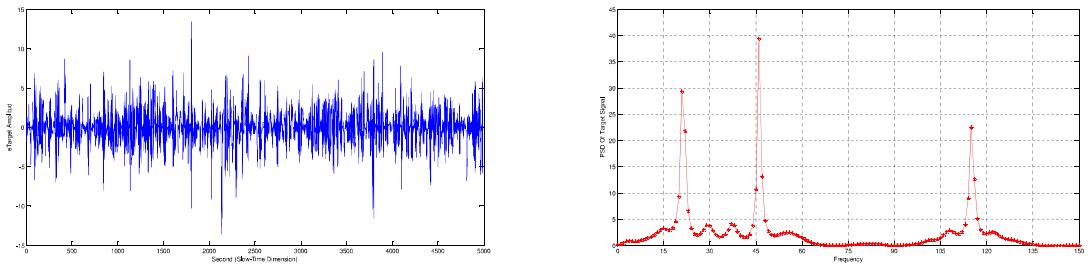
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]



شکل (۸): سیگنال زمانی و PDF کلاتر تولیدی با توزیع ویبول (رنگ قرمز مشخصه تئوریک و رنگ آبی مشخصه سیگنال تولید شده در شبیه سازی است).

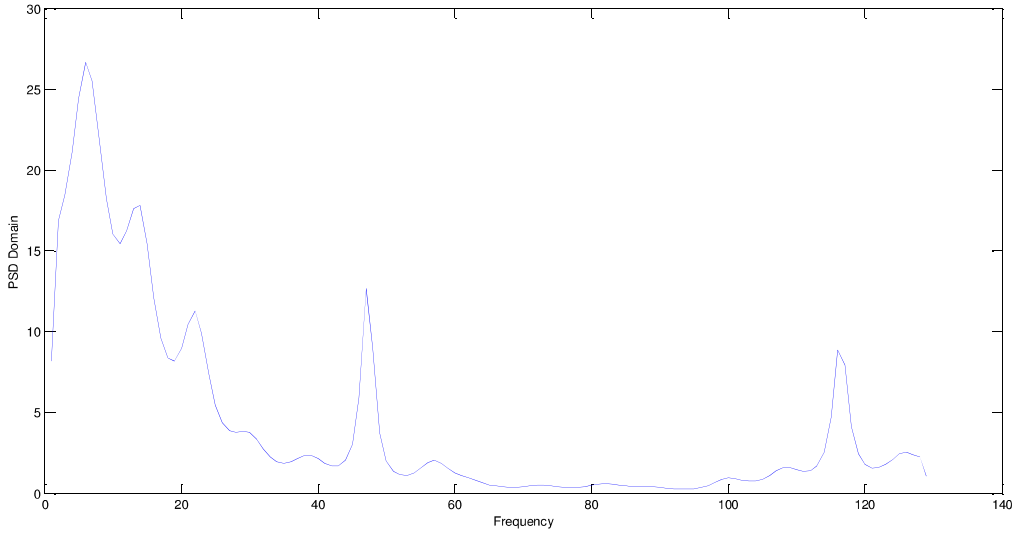


شکل (۹): PSD کلاتر تولیدی با توزیع ویبول (رنگ قرمز مشخصه تئوریک و رنگ آبی مشخصه سیگنال تولید شده در شبیه سازی است).

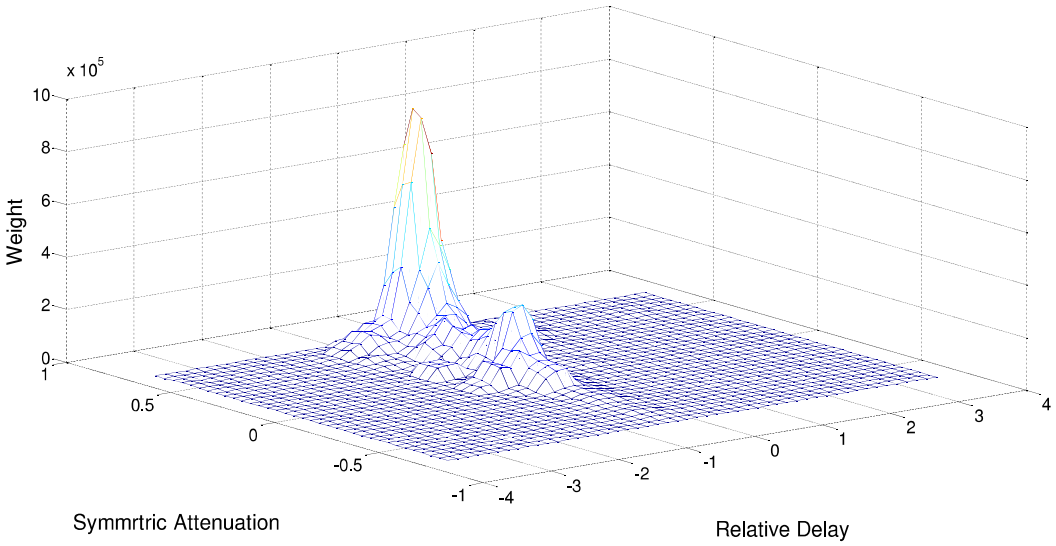


شکل (۱۰): سیگنال هدف تولید شده دارای داپلر

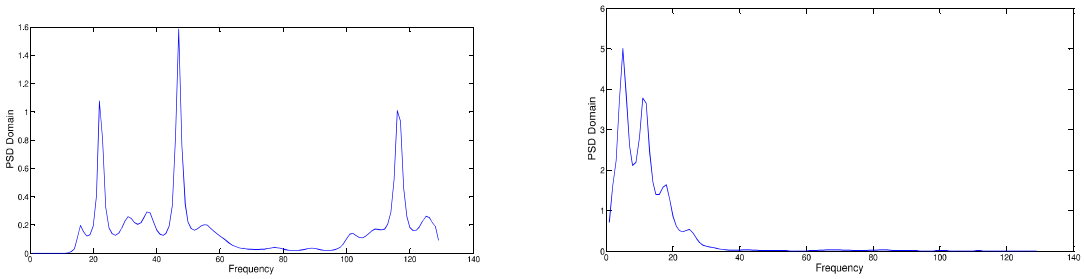
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]



شکل (۱۱): PSD سیگنال رادار (هدف + کلاتر) تولید شده بر اساس معادله (۲۶)

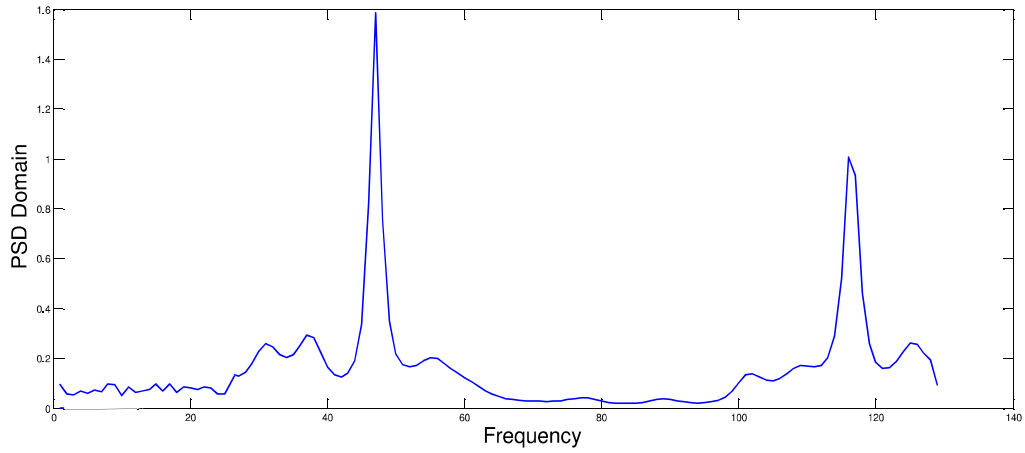


شکل (۱۲): هیستوگرام وزن داده شده دو بعدی برای مخلوط های معادله (۲۶). وجود دو قله نشانه وجود دو منبع (کلاتر و هدف) است.



شکل (۱۳): سیگنال های خروجی الگوریتم DUET (سیگنال بالایی هدف و پایینی کلاتر است که به خوبی با نمونه اصلی این سیگنال ها مطابقت دارد)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]



شکل (۱۴): سیگنال های خروجی حاصل از عبور سیگنال شکل (۱۱) از Double-delay Canceller

با توجه به سیگنال دریافتی رادار در سلول های متوالی فاصله، فقط در چند تا از این سلول ها هدف وجود دارد. در قسمت قبل، فرض کردیم هدف در سلول فاصله شماره r قرار دارد. این سلول را سلول تحت آزمایش (CUT) نامیدیم. سلول هایی که بلافاصله در کنار CUT هستند را Guard Cells می گویند. در Guard Cell ها در اثر اورسمپلینگ مقداری از انرژی هدف وجود دارد و نمی توان آن ها را سلول فاصله شامل کلاتر خالص دانست. معمولا یک یا دو سلول کناری CUT را به عنوان Guard Cell در نظر می گیرند. سلول های بعد از Guard Cell ها که فاقد هدف و شامل کلاتر خالص هستند را سلول های مرجع می خوانند. اگر رادار ما سطح دریا را روشن کرده باشد این سلول های فاصله مرجع، سیگنال های بسیار مشابهی مخصوصا در سلول های فاصله مجاور که به یک اندازه انرژی امواج الکترومغناطیسی به آنها می رسد، هستند (این موضوع در ابتدای این قسمت و در معادلات (۱۹) و (۲۰) توضیح داده شد). بنابراین می توانیم به سادگی فرض کنیم که سلول های فاصله مرجع نزدیک CUT دارای کلاتر بسیار مشابهی هستند و بنابراین کلاتر موجود در CUT که با سیگنال هدف مخلوط شده است همان کلاتر موجود در سلول های مرجع مجاور آن است. ما مخلوط سیگنال های رادار را به صورت معادلات ۱۸ – ۲۲ در نظر گرفتیم که $X_{r1}(k)$ و $X_{r2}(k)$ مخلوط های سیگنال رادار، $C_1(k)$ و $C_2(k)$ سیگنال کلاتر و $T(k)$ سیگنال هدف است. مخلوط اول $X_{r1}(k)$ را CUT فرض نمایید. $X_{r2}(k)$ را باید یکی از سلول های مرجع در نظر بگیریم. دلیل این انتخاب برای $X_{r2}(k)$ این است که فرض کرده ایم که در $X_{r2}(k)$ ضریب a_{221} برابر صفر است و $\xi_1(k)$ همان $\xi_1(k)$ موجود در $X_{r1}(k)$ است. در واقع این فرض به ما کمک می کند که مخلوط دوم را داشته باشیم. از محاسن این فرض این است که به طور آنلاین قابل اجرا می باشد. یعنی در هر زمان دو سلول فاصله مربوط به یک جستجوی رادار با هم مقایسه می شوند. دیگر آنکه با توجه به نتایج به دست آمده نیازی نیست که حتما $\xi_1(k)$ در هر دو سیگنال دقیقا یکی باشد. این بدان خاطر است که ما مخلوط ها را کانولوتیو درنظر گرفته ایم.

در نهایت با توجه به مطالب فوق روش پیشنهادی به صورت زیر ارایه می شود:

۱- انتخاب CUT به عنوان مخلوط اول $X_{r1}(k)$

۲- انتخاب یکی از سلول های مرجع به عنوان مخلوط دوم $X_{r2}(k)$

۳- اعمال روش جداسازی DUET به این دو مخلوط و پیدا نمودن دو منبع که یکی هدف و دیگری کلاتر است.

بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.

۴- شبیه سازی:

برای اینکه بتوانیم الگوریتم را روی سیگنال های راداری امتحان کنیم، بایستی سیگنال دریافتی رادار را که شامل هدف، کلاتر، نویز، جمینگ و ... است را شبیه سازی کنیم. در این مقاله ما فقط

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

هدف و کلاتر را در نظر می گیریم و با توجه به اینکه در رادار حذف نویز با فیلتر تطبیقی قبل از حذف کلاتر و سایر اغتشاشات مثل جمینگ انجام می شود فرض صحیحی به نظر می رسد. اضافه نکردن جمینگ از عمومیت روش نمی کاهد ضمن اینکه جمینگ همیشه در سیگنال رادار موجود نیست. کلاتر وهدف با مدل های آماری توصیف می شوند. برای کلاتر مدل های آماری بسیاری در مراجع معرفی شده است. یکی از مهمترین این مدل ها با استفاده از توزیع k، کلاتر دریا را توصیف می کند. تابع چگالی احتمال توزیع k به صورت زیر است[۱۸]:

$$p(x)=\frac{2b}{\Gamma(\nu)}\left(\frac{bx}{2}\right)^{\nu} K_{\nu-1}(bx) \qquad (۲۴)$$

b پارامتر اسکیل است که تنها به میانگین کلاتر یا σ^0 بستگی دارد. $\Gamma(\nu)$ تابع گاماست، ν پارامتر شکل (Shape) است که به ممان هایی بالاتر وابسته است و با میانگین در ارتباط است. K_ν تابع بسل تعمیم یافته نوع دوم است. توزیع مهم دیگری که برای مدل کردن کلاتر دشت استفاده می شود توزیع ویبول است. تابع چگالی احتمال ویبول به وسیله پارامتر انحراف ویبول یعنی a (اغلب هموار) و یک ضریب پراکنده سازی میانه $\bar{\sigma}_0$ تعیین می شود و به صورت زیر است:

$$f(x)=\frac{bx^{b-1}}{\bar{\sigma}_0}\exp\left(-\frac{x^b}{\bar{\sigma}_0}\right)\ ;\ \ x\geq 0 \qquad (۲۵)$$

که b به عنوان پارامتر شکل (shape) شناخته می شود. زمانی که $b=0$ باشد توزیع ویبول تبدیل به توزیع ریلی می شود. ما برای امتحان کارآیی الگوریتم هر دو نوع کلاتر را به صورت صادفی و بر اساس الگوریتم پیشنهادی مراجع [۱۸-۱۹] تولید کرده ایم. روش تولید کلاتر با توزیع k استفاده از ZMNL و تولید سیگنال مختلط کلاتر در دو کانال I و Q است که بلوک دیاگرام آن در شکل (۵) نمایش داده شده است.

این کلاتر برای یک رادار با فرکانس تکرار پالس ۱۰۰۰ هرتز، فرکانس عملیاتی ۶ گیگاهرتز، پهنای پالس ۶/۶۶ میکروثانیه و CPI برابر ۲ ثانیه تولید شده است. سیگنال زمانی، PDF و PSD آن در شکل (۷) نشان داده شده است:

با روشی مشابه کلاتر با توزیع ویبول[۹] تولید می شود که در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است:

حال نوبت به تولید سیگنال هدف می رسد. در مبحث آشکار سازی رادار، مدل های آماری مختلفی برای هدف در نظر می گیرند که از جمله مهمترین آنها مدل های Swerling است که ما به طور تصادفی آنها را تولید کرده ایم. در اینجا تفاوت عمده با کلاتر این است که همبستگی بین مولفه های سیگنال هدف وجود ندارد و بایستی به سیگنال هدف داپلر را اضافه نمود. سیگنال زمانی هدف تولید شده و PSD آن در شکل (۱۰) آمده است.

اکنون برای امتحان الگوریتم بایستی بایستی این دو سیگنال را با هم مخلوط کنیم تا سیگنالی مشابه با سیگنال واقعی دریافتی رادار داشته باشیم. با جمع کردن این دو سیگنال با ضرایب متفاوت و طبق ماتریس زیر داریم:

مشاهده می شود که دو قله در هیستوگرام وجود دارد که متناظر با دو منبع یعنی کلاتر و سیگنال است. قله ای که بلندتر است با احتمال بیشتری متعلق به کلاتر است. تعداد اهداف موجود در سیگنال برابر تعداد قله ها منهای یک است زیرا که به هر صورت یکی از قله ها متعلق به کلاتر است. طبق روش گفته شده در بخش ۲-۴ ابتدا مکان قله ها را می یابیم و سپس با تعیین ماسک های زمان فرکانس مربوط به هر قله و اعمال این ماسک ها به یکی از مخلوط ها دو منبع (سیگنال و کلاتر) به دست می آیند. سیگنال زمانی و PSD سیگنال های خروجی در شکل (۱۲) ترسیم شده اند. در نهایت، به منظور نشان دادن هر چه بیشتر اعتبار روش پیشنهادی، نتیجه به دست آمده را با خروجی حاصل از کنسلری که در روش MTI استفاده می شود مقایسه می کنیم. بدین منظور، سیگنال شبیه سازی شده رادار که در واقع همان سیگنال موجود در CUT است و طیف داپلر آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است را از یک Double-Delay Canceller عبور می دهیم. پس از این کار، سیگنالی به دست می آید که طیف داپلر آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود هدف موجود در فرکانس ۲۲ هرتز به همراه کلاتر حذف شده است. این در حالی است که روش پیشنهادی ما به طور دقیق و بدون خطا هدف را از کلاتر استخراج نمود. این موضوع به وضوح برتری روش ما را مخصوصا در مواجهه با اهداف موجود در سلول داپلر کلاتر نشان می دهد. هر چند تا کنون کار زیادی در زمینه استفاده از BSS در حذف کلاتر انجام نشده است [۲۰-۲۱] ولی نتایج نشان می دهد که پتانسیل زیادی در این زمینه وجود دارد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم DUET کلاتر موجود در سیگنال رادار را جهت آشکارسازی هدف حذف کرده ایم. الگوریتم DUET یکی از معروف ترین الگوریتم های BSS نامعین است که کارامدی خود را در جداسازی سیگنال های صحبت نشان داده

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

است ولی در سایر زمینه ها مورد استفاده قرار نگرفته است. ما این الگوریتم را به سیگنال شبیه سازی شده راداری شامل کلاتر و هدف مصنوعی تولید شده به صورت تصادفی اعمال کرده ایم و به طور موفقیت آمیز کلاتر را حذف نموده ایم.

نتایج نشان می دهند که الگوریتم های BSS نامعین توانایی حذف کلاتر را دارند. همچنین مقایسه روش پیشنهادی با فیلتر MTI نشان می دهد که در حالتی که هدف در سلول داپلر کلاتر قرار دارد روش پیشنهادی بهتر عمل می کند هر چند که در سایر حالات نیز عملکردی مناسب و مشابه این فیلتر دارد. با توجه به عدم دسترسی به سیگنال های عملی رادار، امکان آزمایش در این باره برای ما مقدور نبوده است ولی در مجموع سعی شده است روش پیشنهادی با توجه به موارد عملی ارایه شود به گونه ای که به طور آنلاین هم قابل اجرا باشد. در نهایت چون سیگنال های واقعی رادار پیچیده تر هستند باید در الگوریتم اصلاحاتی صورت گیرد که بایستی در تحقیقات آتی به طور دقیق تر مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] Haykin, S.: '*Adaptive Radar Signal Processing*' (Wiley, USA, 2007)

[2] Greco, M.V., Gini, F.: '*Sea-Clutter Nonstationarity: The Influence of Long Waves*', Haykin, S. (Ed.): 'Adaptive Radar Signal Processing' (Wiley, USA, 2007), Ch. 5, pp. 159-191

[3] Bakker, R., Currie, B., Haykin, S.: '*Two New Strategies for Target Detection in Sea Clutter*', Haykin, S. (Ed.): 'Adaptive Radar Signal Processing' (Wiley, USA, 2007), Ch. 6, pp. 193-219

[4] Gini, F., Greco, M.V, Diani, M., Verrazzani, L.: '*Performance Analysis of Two Adaptive Radar Detectors Against Non Gaussian Real Sea Clutter Data*', IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 2000, 36, (4), pp. 1429-1439

[5] Watts, S.: '*Radar detection prediction in sea clutter using the compound K-distribution model*', IEE Proc. F-Commun. Radar. Signal. Process., 1985, 132, (7), pp. 613–620

[6] Ward, K.D., Baker, C.J., Watts, S.: '*Maritime surveillance radar Part 1: Radar scattering from the ocean surface*', IEE Proce., 1990, 137, (2), pp. 51-62

[7] Yılmaz and Rickard, "*Blind Source Separation of Speech Mixtures via Time-Frequency Masking*," IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, vol. 52, no. 7, pp. 1830–1847, July 2004].

[8] Makino, S., Lee, T-W., Sawada, H., *Blind Speech Separation*, Published by Springer, 2007.

[9] Cichocki, A., Amari, S., *Adaptive Blind Signal and Image Processing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

[10] Mansour, A., Barros, A.K., Ohnishi, N.: "*Blind Separation of Sources: Methods, Assumptions and Applications*", IEICE. TRANS. FUNDAMENTALS. SURVEY PAPER., E83-A, (8), pp. 1498-1512

[11] Comon, P.: '*Independent component analysis, a new concept*', Signal Process., 1994, 36, pp. 287–314

[12] Mahafza, B.R.: '*Radar Signal Analysis And Processing Using Matlab*' (Chapman & Hall/ CRC. Taylor & Francis Group, 2009, 1st edn.)

[13] Richards, M.A: '*Fundamental Of Radar Signal Processing*' (McGraw-Hill, 2005, 1st edn.)

[14] Skolnik, M.I.: 'Introduction to Radar Systems' (McGraw-Hill, 2005, 4st edn.)

[15] Rickard S., Yilmaz, O., "*On the approximate W-disjoint orthogonality of speech,*" in IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Orlando, Florida, USA, May 2002, pp. 529–532.

[16] Rickard, S., "*Sparse sources are separated sources*," in 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Sept. 2006.

[17] Aoki, M., Okamoto, M., Aoki, S., Matsui, H., Sakurai, T., Kaneda, Y., "*Sound source segregation based on estimating incident angle of each frequency component of input signals acquired by multiple microphones*," Acoustical Science and Technology, vol. 22, no. 2, pp. 149–157, 2001.21. J.-K. Lin, D. G. Grier, and J. D. Cowan, "Feature extraction

[18] Chanjuan, Y., Wei, Y., Wanhai, Y., "Simulation of Compound k - distribution Sea *Clutter*", Xidian University, Xian, 710071, IEEE 0-7803-2914-7, 1991.

[19] Rangswamy, M., Weiner, D., Ozturk, A., "*Computer Generation of Correlated Non -Gaussian Radar Clutter*", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 31, No. 1 January 1995.

[20] Ghahramani, H., Barari, M., Bastani, M.H., "*Maritime Radar Target Detection in Presence of Strong Sea Clutter Based on Blind Source Separation*", TIJR IETE Journal of Research, Volume 60, Issue 5, September 2014, pages 331-344

[21] Ghahramani, H., Barari, M., Bastani, M.H., "*Suppressing Sea Clutter In Maritime Radar Based On Complex-Valued Spatio-Temporal FastICA*", IET Radar Sonar Navigation, Accepted for Publication.

[1] Multiple Sensor Blind Source Separation
[2] Underdetermined Blind Source Separation
[3] Sparse Component Analysis
[4] Single Sensor Blind Source Separation

[5] Anechoic Mixing
[6] w-disjion
[7] Local stationarity
[8] Two-Dimensional Smoothed Weighted Histogram
[9] Weibull

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]