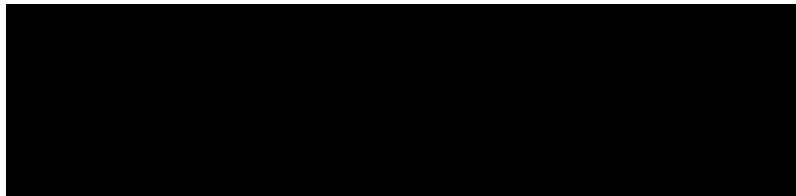


## تخمین زاویه ورود سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته



چکیده - در این مقاله روشی دقیق برای تخمین زاویه ورود (DOA) سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته پیشنهاد شده است. در روش ارائه شده پس از حذف نویز داده‌ها با تبدیل ویولت، زاویه ورود سیگنال‌های ناهمبسته، با روش آنالیز مولفه مستقل (ICA) تخمین زده می‌شود. پس از تخمین زاویه و توان سیگنال‌های ناهمبسته، اثر این سیگنال‌ها از ماتریس داده‌های اصلی حذف می‌شود. سپس از روی ماتریس جدید به دست آمده که تنها اطلاعات سیگنال‌های همبسته را دارا است، یک ساختار توپلیتز (Toeplitz) ساخته می‌شود. در نهایت از روش زیرفضا (Subspace) جهت تخمین زاویه سیگنال‌های همبسته، استفاده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی دقت بسیار بالایی برای تخمین زاویه سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته در شبیه‌سازی‌ها از خود نشان داده است.

کلید واژه- تبدیل ویولت، روش زیرفضا، سیگنال همبسته، DOA, JADE, ICA

برای غلبه بر مسئله همبستگی در تخمین DOA، روش‌های ناهمبسته کننده متعددی پیشنهاد شده است. روش‌های هموارسازی فضایی در [۲] و [۳] با تقسیم بندی آرایه سنسورها به چندین زیر آرایه که دارای هم‌پوشانی هستند به حل مسئله همبستگی می‌پردازند. به طوری که میانگین اطلاعات زیر آرایه‌ها ملاک عمل قرار می‌گیرند. ولی این تقسیم بندی موجب کاهش تعداد زاویه‌های تخمین می‌شود. از طرفی زاویه سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته هم‌زمان تخمین زده می‌شود. در [۴] از یک روش هموارسازی فضایی تفاضلی (SDS) استفاده شده است. به طوری که DOA سیگنال‌های ناهمبسته با روش MUSIC محاسبه می‌شود. سپس با فرض اینکه ماتریس کوواریانس اطلاعات ناهمبسته به صورت Toeplitz است، با ارائه یک روش تفاضلی، اطلاعات سیگنال‌های همبسته جداسازی می‌شوند و در نهایت با روش هموارسازی فضایی DOA سیگنال‌های همبسته تخمین زده می‌شود. در [۵] الگوریتمی بر مبنای روش تفاضلی و هموارسازی فضایی تکراری (ISS) ارائه شده است. اگر چه این روش زمان انجام محاسبات را کاهش می‌دهد، ولی نیازمند محاسبه دقیق ماتریس کوواریانس اطلاعات ناهمبسته است. در [۶] با استفاده از تقارن آرایه سنسورها، یک ماتریس Toeplitz جدید و مستقل تعریف می‌شود که فقط اطلاعات سیگنال‌های همبسته را در بر دارد. ولی به جهت استفاده از این خاصیت

### ۱- مقدمه

تخمین زاویه ورود سیگنال‌های باریک باند (Narrowband) از دیرباز یکی مسائل اساسی در حوزه رادار، سونار و مخابرات سیار بوده است. هدف، استخراج زاویه از مشاهدات دسته‌ای از سنسورها است که آرایش مشخصی نسبت به هم دارند. در این میان روش‌های زیرفضا از محبوبیت بالایی برخوردار می‌باشند. معروفترین روش زیرفضا، دسته‌بندی چندین سیگنال (MUSIC) است که برای تخمین DOA سیگنال‌های ناهمبسته پیشنهاد شده است [۱]. روش‌های زیرفضا در حضور سیگنال‌های ناهمبسته عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. اما زمانی که سیگنال‌ها، همبستگی بسیار بالایی دارند، به ویژه در محیط‌های چند مسیری (Multipath)، این روش‌ها در تخمین DOA دچار مشکل می‌شوند. منظور از همبستگی بالا همان Coherent بودن سیگنال‌ها است که از این پس برای سادگی همان اصطلاح همبسته را برای آن به کار می‌بریم. علت اینکه روش‌های زیرفضا در حضور سیگنال‌های همبسته دچار مشکل می‌شوند این است که ماتریس کوواریانس تشکیل شده از داده‌های سنسورها از درجه کامل (Full Rank) نیست. بنابراین پردازش مستقیم روی این داده‌ها به تخمین صحیحی منجر نمی‌شود.

تقارن، حداکثر DOA های تخمینی، نصف آرایه سنسورها است. در [7] ابتدا توان سیگنال‌های ناهمبسته تخمین زده می‌شود، سپس با استفاده از این توان، اطلاعات همبسته و ناهمبسته جدا می‌شوند. پس از آن از روش هموارسازی فضایی زاویه سیگنال‌های همبسته تخمین زده می‌شود. در [8] روشی بر مبنای ماتریس مجازی و بردار متعامد (OVSS-VM) پیشنهاد شده است. بدین صورت که از روی اطلاعات ورودی و اطلاعات مزدوج شده آن‌ها چند ماتریس مجازی ساخته می‌شود. سپس از میانگین اطلاعات این ماتریس‌ها و با استفاده از ساختار فضای ویژه، یک ماتریس مستقل تشکیل می‌شود، که در تخمین DOA سیگنال‌های همبسته از آن استفاده می‌شود. در [9] الگوریتمی بر پایه درست‌نمایی بیشینه (Maximum Likelihood) پیشنهاد شده است. این روش در حضور منابع همبسته بدون نیاز به هموارسازی فضایی، DOA منابع سیگنال را تخمین می‌زند. ولی پیچیدگی محاسباتی این روش بالا بوده و زمان پردازش را افزایش می‌دهد.

ساختار این مقاله به صورت زیر است:

ابتدا در بخش ۲ شرح مختصری بر مدل داده و ساختار فضای ویژه سیگنال‌ها، حذف نویز با تبدیل ویولت و جداسازی سیگنال‌ها با روش ICA داده می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳ شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در بخش ۴ و در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

## ۲- اصول کار

در این قسمت مدل داده و ساختار فضای ویژه سیگنال‌ها، حذف نویز با تبدیل ویولت و جداسازی سیگنال‌ها با استفاده از روش ICA معرفی شده‌اند.

### ۲-۱- مدل داده و ساختار فضای ویژه سیگنال‌ها

فرض می‌شود تعداد  $r$  سیگنال با زاویه‌های متفاوت به  $N$  سنسور که آرایش خطی یکنواخت (ULA) دارند، برخورد می‌کند. فاصله بین سنسورها نصف طول موج است. بردار هدایت (steering vector) معادل هر زاویه، مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [1, e^{-j(2\pi/\lambda)d \sin \theta_i}, \dots, e^{-j(2\pi/\lambda)(N-1)d \sin \theta_i}] \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, r$

در واقع بردار هدایت، پاسخ آرایه سنسورها به جهت دریافتی سیگنال را دربر دارد. طبق این بردارهای هدایت، داده دریافت شده از  $N$  سنسور به صورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود.

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

که  $\mathbf{X}(t)$  یک بردار  $N \times 1$  است،  $\mathbf{S}(t)$  یک بردار  $r \times 1$  که سیگنال منابع را در خود دارد،  $\mathbf{N}(t)$  یک بردار  $N \times 1$  است که بیانگر نویز آرایه‌ها است و ماتریس  $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_r)]$  ماتریس هدایت نامیده می‌شود. نویز آرایه‌ها یک فرآیند گوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  است. ماتریس کوواریانس مشاهدات سنسورها به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(t)^H] \\ &= \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}_N \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن ماتریس  $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}(t)^H]$  ماتریس کوواریانس منابع بوده و  $\sigma^2\mathbf{I}_N$  ماتریس کوواریانس نویز است. علامت  $H$  بیانگر مزدوج و ترانپوز شده است. در عمل ماتریس کوواریانس داده‌های ورودی در دست نیست و می‌باید از روی نمونه‌های خروجی سنسورها، تخمین زده شود.

اگر ماتریس کوواریانس را به ساختار فضای ویژه‌اش تجزیه کنیم، رابطه (۴) را خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x &= \mathbf{Q}_s\mathbf{D}_s\mathbf{Q}_s^H + \mathbf{Q}_n\mathbf{D}_n\mathbf{Q}_n^H \\ \mathbf{D}_s &= \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r) \\ \mathbf{D}_n &= \text{diag}(\lambda_{r+1}, \dots, \lambda_N) \end{aligned} \quad (4)$$

که  $\mathbf{Q}_s$  زیرفضای سیگنال و  $\mathbf{Q}_n$  زیرفضای نویز است.  $\mathbf{Q}_s$  شامل  $r$  بردار ویژه، معادل  $r$  مقدار ویژه بزرگتر است و  $\mathbf{Q}_n$  شامل  $N-r$  بردار ویژه معادل مقادیر ویژه کوچکتر است.  $\mathbf{D}_s$  ماتریس قطری مقادیر ویژه سیگنال و  $\mathbf{D}_n$  ماتریس قطری مقادیر ویژه نویز است. روش MUSIC از اصل تعامد زیرفضای سیگنال به نویز استفاده می‌کند و تابع طیفی این روش طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود.

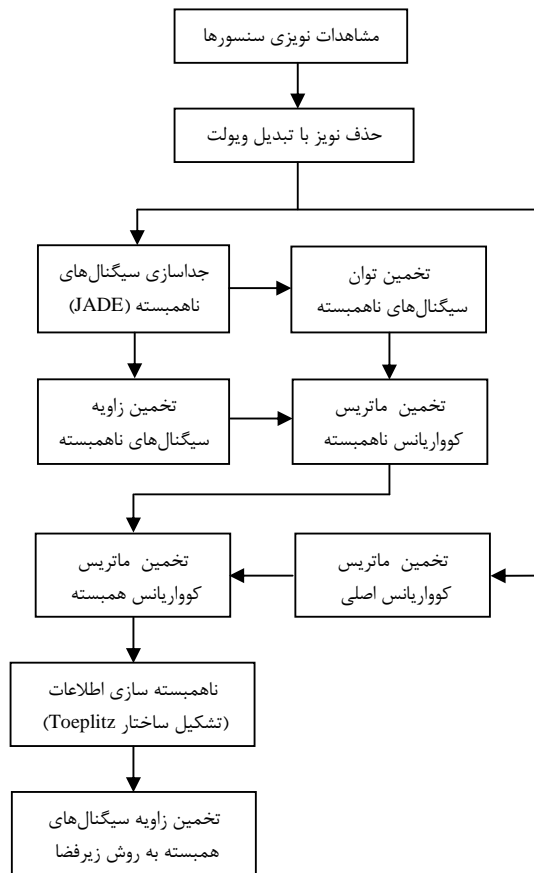
$$\mathbf{P}_{MUSIC} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{Q}_n\mathbf{Q}_n^H\mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

در مقادیر بیشینه این طیف زاویه ورود منابع به دست می‌آید.

### ۲-۲- حذف نویز با تبدیل ویولت

تبدیل ویولت (Wavelet Transform) سیگنال ورودی را به دو بخش فرکانس بالا (جزئیات) و فرکانس پایین (تقریب) تقسیم می‌کند. به این ترتیب امکان دسترسی به باندهای فرکانسی مختلف سیگنال را میسر می‌سازد. از آنجا که نویز معمولاً مولفه‌های فرکانس بالا را در بر دارد، با آستانه‌گیری (thresholding) باندهای فرکانسی بالا، تا حد زیادی اثر نویز از داده اصلی کاسته می‌شود. رابطه‌ای که برای آستانه‌گیری جزئیات استفاده می‌شود طبق رابطه (۶) است که از [۱۰] انتخاب شده است.

شکل (۱) ارائه شده است. این دیاگرام چهارچوب کلی اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی طی دو مرحله، زاویه سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته را تخمین می‌زند. قبل از اینکه از مشاهدات سنسورها جهت پردازش استفاده شود، توسط تبدیل ویولت داده تک تک سنسورها حذف نویز می‌شود. حال روی داده‌های جدید  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{AS}$  پردازش‌ها انجام می‌شود. در ادامه مراحل مختلف اجرای الگوریتم شرح داده می‌شود.



شکل (۱): بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی

### ۳-۱- تخمین زاویه و توان سیگنال‌های ناهمبسته

روش‌های ICA اصولاً برای جداسازی سیگنال‌های ناهمبسته و مستقل استفاده می‌شوند. یعنی در حضور منابع همبسته این روش‌ها دچار اشکال هستند. ولی در روش JADE به جهت استفاده از ساختار فضای ویژه، در حضور منابع همبسته و ناهمبسته، می‌توان تخمینی از سیگنال‌های ناهمبسته و بردارهای هدایت معادل آن به دست آورد، اگرچه همچنان تخمین سیگنال‌های همبسته دچار اشکال است. از روی تخمین ماتریس

$$T_{quad}(Y, \lambda) = \begin{cases} 0 & |Y| < \lambda \\ \text{sign}(Y) \left| |Y| - \frac{\lambda^2}{|Y|} \right| & |Y| \geq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

که در آن  $\lambda = \sqrt{\sigma^2 \times 2 \log(K)}$ ،  $K$  تعداد نمونه‌های سیگنال و  $\sigma^2$  واریانس نویز است که از میانگین مقادیر ویژه زیرفضای نویز به دست می‌آید. در نهایت با عکس تبدیل ویولت داده حذف نویز شده به دست می‌آید.

### ۳-۲- جداسازی سیگنال‌ها با استفاده از روش ICA

روش‌های ICA از جمله روش‌هایی هستند که برای جداسازی سیگنال‌های مستقل و ناهمبسته توسعه یافته‌اند. در این میان روش قطری‌سازی توأم ماتریس ویژه (JADE) از جمله معروفترین روش‌های ICA است. این روش توسط کاردوسو [۱۱] ارائه شده است. اگر مدل سیگنال‌ها به صورت  $\mathbf{X} = \mathbf{AS}$  باشد، هدف رسیدن به تخمینی از ماتریس مخلوط  $\mathbf{A}$  و ماتریس منابع  $\mathbf{S}$  است. روش JADE به صورت زیر خلاصه می‌شود.

۱- ماتریس کوواریانس داده‌های مخلوط ورودی تشکیل می‌شود. با توجه به ساختار فضای ویژه این ماتریس، ماتریس سفیدساز  $\mathbf{W}$  محاسبه می‌شود.

۲- با ضرب ماتریس سفیدساز در داده‌های ورودی، فرآیند سفید شده به صورت  $\mathbf{Z} = \mathbf{WX}$  به دست می‌آید.

۳- از روی ماتریس آمارگان‌های درجه چهار فرآیند سفید شده،  $r$  زوج فضای ویژه بزرگتر  $\{\lambda_i, \mathbf{M}_i \mid 1 \leq i \leq r\}$  انتخاب می‌شود.

۴- بطور توأم ترکیب  $\{\lambda_i, \mathbf{M}_i \mid 1 \leq i \leq r\}$  توسط ماتریس یکه  $\mathbf{V}$  قطری می‌شود.

۵- تخمینی از ماتریس مخلوط به صورت  $\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{V}$  حاصل می‌شود.

۶- ماتریس سیگنال‌های جداسازی شده از رابطه  $\mathbf{S} = \mathbf{V}^H \mathbf{Z}$  به دست می‌آید.

جزئیات بیشتر در مورد روش JADE در [۹] ارائه شده است.

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

با توجه به اصول تعریف شده در بخش ۲، در این قسمت الگوریتم جدیدی برای تخمین زاویه ورود سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته ارائه می‌شود. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی در

هدایت  $\mathbf{A}$ ، بردارهای هدایت معادل منابع ناهمبسته به صورت رابطه (۷) به دست می آید.

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{Ni}]^T \quad (7)$$

از نسبت عناصر بردار هدایت و مدل معرفی شده در رابطه (۱) برای تخمین DOA استفاده می شود. در رابطه (۸) از نسبت درایه اول و دوم  $\mathbf{a}(\theta_i)$  جهت به دست آوردن زاویه سیگنال  $i$ -ام استفاده شده است.

$$a_{2i}/a_{1i} = e^{-j(2\pi/\lambda)d \sin \theta_i} \quad (8)$$

$$\text{DOA}_i = \theta_i = -\arcsin \left[ \frac{\arg(a_{2i}/a_{1i})}{((2\pi/\lambda)d)} \right]$$

عملگر  $\arg(\cdot)$  زاویه یک عدد مختلط یا همان آرگومان آن را نتیجه می دهد. جهت افزایش رزولوشن تخمین نیز می توان از نسبت درایه های دیگر بردار هدایت استفاده نمود و از میانگین آن ها تخمین نهایی را آورد.

جهت اطمینان از این که، کدام زاویه ها، مربوط به سیگنال های ناهمبسته است، می توان از مقادیر بیشینه طیف MUSIC استفاده نمود. ویژگی روش ارائه شده، این است که با جداسازی سیگنال های ناهمبسته علاوه بر زاویه، توان این سیگنال ها نیز در اختیار است و می توان در بازسازی ماتریس کوواریانس منابع ناهمبسته از آن استفاده کرد.

### ۳-۲- تخمین زاویه سیگنال های همبسته

در مرحله قبل مشاهده شد که توسط روش JADE زاویه و توان (واریانس) سیگنال های ناهمبسته تخمین زده شد. در این مرحله با تشکیل ماتریس کوواریانس سیگنال های ناهمبسته، اثر این ماتریس از ماتریس کوواریانس اصلی حذف می شود. ماتریس جدیدی که حاصل می شود تنها اطلاعات سیگنال های همبسته را دارا است و ماتریس کوواریانس همبسته نامیده می شود. اگر تعداد منابع ناهمبسته را  $N_u$  فرض کنیم رابطه ماتریس کوواریانس ناهمبسته با توجه به رابطه (۹) به دست می آید.

$$\mathbf{R}_{xu} = \mathbf{A}_u \text{diag} \{ \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_{N_u}^2 \} \mathbf{A}_u^H \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_u = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{N_u})]$$

توان منابع ناهمبسته یعنی  $\sigma_1^2, \dots, \sigma_{N_u}^2$  در مرحله قبل از روی تخمین سیگنال به دست آمده است.  $\mathbf{A}_u$  نیز از روی زاویه های به دست آمده در بخش ۳-۱ تشکیل می شود. ماتریس کوواریانس همبسته از روی ماتریس کوواریانس اصلی و ماتریس کوواریانس ناهمبسته با توجه به رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$\mathbf{R}_{xc} = \mathbf{R}_x - \mathbf{R}_{xu} \quad (10)$$

از طرفی چون داده های آرایه ها در مرحله اول حذف نویز شده اند، به جای  $\mathbf{R}_x$  از ماتریس  $\mathbf{R}'_x$  استفاده می شود. بدین ترتیب ماتریس مشاهدات حذف نویز شده به دست می آید. بدین ترتیب ماتریس کوواریانس همبسته جدید با توجه به رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$\mathbf{R}'_{xc} = \mathbf{R}'_x - \mathbf{R}_{xu} \quad (11)$$

معمولا از روش هموارسازی فضایی (FBSS) برای ناهمبسته کردن اطلاعات و تخمین DOA منابع همبسته استفاده می شود. ولی این روش ابعاد ماتریس کوواریانس را کاهش می دهد. به این جهت از روی ماتریس کوواریانس همبسته یک ماتریس Toeplitz و مستقل ساخته که علاوه بر اینکه ابعاد ماتریس اصلی را حفظ می کند، اطلاعات ماتریس کوواریانس منابع همبسته را ناهمبسته می کند. اگر فرض کنیم که ماتریس  $\mathbf{R}'_{xc}$  به صورت رابطه (۱۲) باشد.

$$\mathbf{R}'_{xc} = \begin{bmatrix} R_{11}^c & R_{12}^c & \dots & R_{1N}^c \\ R_{21}^c & R_{22}^c & & \vdots \\ \vdots & & & \\ R_{N1}^c & R_{N2}^c & \dots & R_{NN}^c \end{bmatrix} = \mathbf{A}_c \mathbf{R}_{sc} \mathbf{A}_c^H \quad (12)$$

ماتریس  $\mathbf{R}_{sc}$  اطلاعات منابع همبسته را در بر دارد و  $\mathbf{A}_c$  اطلاعات زاویه را در خود دارد. ولی ماتریس  $\mathbf{R}_{sc}$  به جهت همبسته بودن منابع، کمبود درجه دارد، پس ماتریس  $\mathbf{R}'_{xc}$  نیز دارای کمبود درجه است و نمی توان از روش های زیرفضا به طور مستقیم استفاده کرد. از روی ماتریس  $\mathbf{R}'_{xc}$ ، ماتریس  $\mathbf{R}^I$  با توجه به رابطه (۱۳) تشکیل می شود.

$$\mathbf{R}^I = \begin{bmatrix} R_{11}^c & R_{12}^c & \dots & R_{1N}^c \\ R_{12}^{c*} & R_{11}^c & & \vdots \\ \vdots & & & \\ R_{1N}^{c*} & R_{1,N-1}^{c*} & \dots & R_{11}^c \end{bmatrix} = \mathbf{A}_c \mathbf{R}_{sc}^I \mathbf{A}_c^H \quad (13)$$

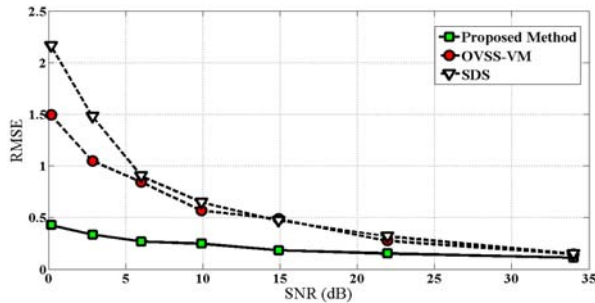
ماتریس جدید همان اطلاعات زاویه ماتریس  $\mathbf{A}_c$  را دربر دارد ولی ماتریس  $\mathbf{R}_{sc}^I$  برخلاف  $\mathbf{R}_{sc}$  مستقل و از درجه کامل است.

$$\mathbf{R}_{sc}^I = \text{diag} \{ \alpha_{N_u+1}, \dots, \alpha_r \} \quad (14)$$

$\mathbf{R}^I$  نیز یک ماتریس Toeplitz و از درجه کامل است. حال می توان از ساختار فضای ویژه ماتریس  $\mathbf{R}^I$  استفاده نمود و با استفاده از روش MUSIC طبق رابطه (۵) زاویه ورود منابع همبسته را تخمین زد.

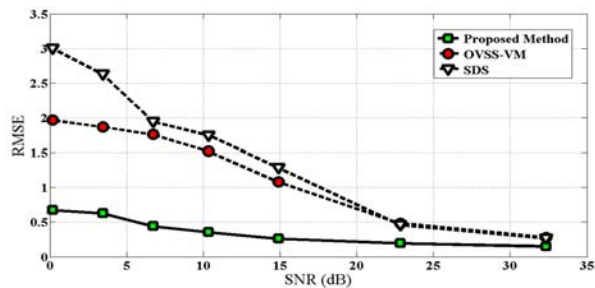
الگوریتم پیشنهادی که در این بخش برای تخمین DOA ارائه شد، بر پایه یک روش تفاضلی موثر می باشد. در این الگوریتم با استفاده از روش ICA جداسازی بسیار دقیق تری بین اطلاعات منابع همبسته و ناهمبسته صورت می گیرد. این جداسازی

در شکل (۳) زاویه سیگنال‌های همبسته ۳۰ و ۳۷ درجه است و نمودار RMSE بر حسب افزایش SNR رسم شده است.



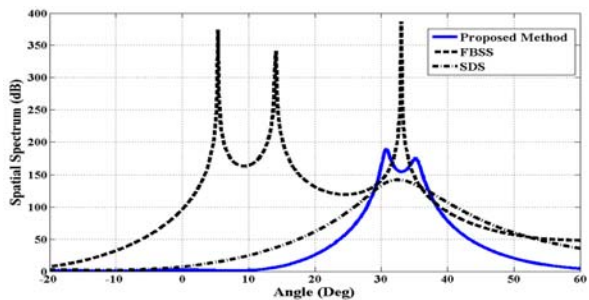
شکل (۳): خطای RMSE تخمین زاویه‌ها بر حسب SNR

در شکل (۴) زاویه سیگنال‌های همبسته ۳۰ و ۳۵ درجه است و نمودار RMSE بر حسب افزایش SNR رسم شده است. مشاهده می‌شود خطای تخمین الگوریتم پیشنهادی در هر سه نمودار کمتر از روش‌های SDS و OVSS-VM است.



شکل (۴): خطای RMSE تخمین زاویه‌ها بر حسب SNR

در شبیه‌سازی چهارم طیف خروجی الگوریتم پیشنهادی با روش‌های SDS و FBSS مقایسه می‌شود. در این شبیه‌سازی سیگنال‌های همبسته از زاویه‌های ۳۰ و ۳۵ درجه وارد آرایه سنسورها می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی دو مقدار بیشینه در ۳۰ و ۳۵ درجه روی طیف خروجی نشان داده است. الگوریتم‌های SDS و FBSS تخمین این دو زاویه در SNR=۰ dB ناتوان بوده‌اند.



شکل (۵): مقایسه طیف خروجی الگوریتم‌ها برای اختلاف زاویه کم

دقیق‌تر، خطای تخمین DOA سیگنال‌های همبسته را در مرحله دوم الگوریتم پیشنهادی کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های بخش ۴ برتری روش تفاضلی فوق را نسبت به دیگر روش‌های تفاضلی نظیر SDS نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی‌ها

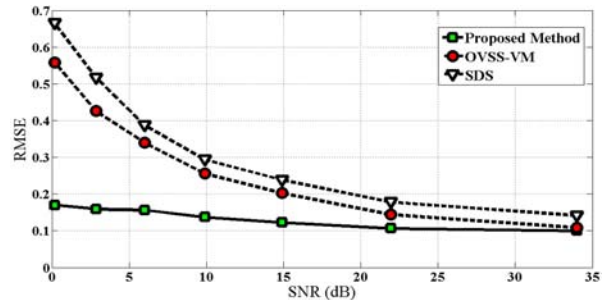
در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی نشان داده می‌شود. در تمام شبیه‌سازی‌های ارائه شده، تعداد سنسورها برابر  $N=7$  در نظر گرفته شده است. سنسورها در تمام جهات سیگنال‌ها را با بهره یکسان دریافت می‌کنند. فاصله سنسورها از هم برابر نصف طول موج می‌باشد. تعداد  $P=1000$  نمونه از خروجی هر سنسور جهت پردازش در نظر گرفته شده است. نویز هر سنسور به صورت گوسی سفید و با میانگین صفر فرض می‌شود.

فرض کنید تعداد  $r=4$  سیگنال با زاویه‌های متفاوت به آرایه سنسورها وارد می‌شوند. دو تا از سیگنال‌ها ناهمبسته بوده و دارای زاویه‌های ۵ و ۱۳ درجه می‌باشند. در شبیه‌سازی اول سیگنال‌های همبسته از جهات ۳۰ و ۴۰ درجه، در شبیه‌سازی دوم از جهات ۳۰ و ۳۷ درجه و در شبیه‌سازی سوم از جهات ۳۰ و ۳۵ درجه وارد آرایه سنسورها می‌شوند. جذر میانگین مربعات خطای اندازه‌گیری (RMSE) زاویه‌ها از رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{200r} \sum_{n=1}^{100} \sum_{k=1}^r (\hat{\theta}_k(n) - \theta_k)^2} \quad (15)$$

که در آن  $\hat{\theta}_k(n)$  تخمینی از زاویه  $\theta_k$  در  $n$ -امین آزمایش مونت کارلو (Monte Carlo) است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با روش‌های ارائه شده در [۴] (SDS) و در [۷] (OVSS-VM) مقایسه می‌شوند.

در شکل (۲) زاویه سیگنال‌های همبسته ۳۰ و ۴۰ درجه است و نمودار RMSE بر حسب افزایش SNR رسم شده است.



شکل (۲): خطای RMSE تخمین زاویه‌ها بر حسب SNR

سیگنال‌های ناهمبسته ابتدا با روش JADE محاسبه می‌شود. سپس زاویه سیگنال‌های همبسته با بازسازی یک ماتریس جدید به دست می‌آید. از ویژگی‌های روش ارائه شده، محاسبه DOAها در اختلاف زاویه کم و SNR پایین است. شبیه‌سازی‌ها عملکرد دقیق‌تر روش مذکور را نسبت به روش‌های FBSS، SDS و OVSS-VM نشان داده‌اند. مزایای الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

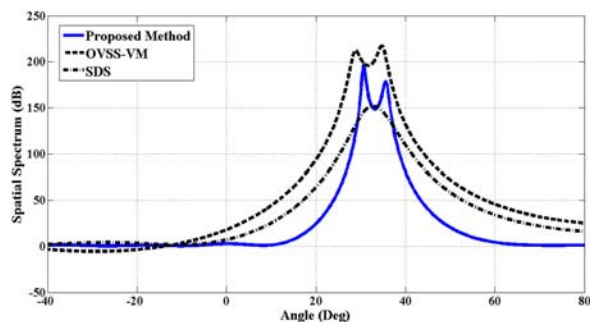
۱- جداسازی سیگنال‌های همبسته از ناهمبسته موجب

افزایش تعداد زاویه منابعی می‌شود که می‌خواهیم تخمین بزنیم.

۲- چون از تبدیل ویولت برای حذف نویز استفاده شده است، رزولوشن تخمین زاویه‌های منابع بالا می‌رود.

۳- این روش در مقایسه با دیگر روش‌های تفاضلی، چون از مقادیر تقریباً دقیق سیگنال‌های ناهمبسته استفاده می‌کند، دقت بالاتری دارد.

همان شرایط شبیه‌سازی قبل در نظر گرفته می‌شود. ولی این‌بار طیف الگوریتم پیشنهادی با روش OVSS-VM و روش SDS مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، روش OVSS-VM دو مقادیر بیشینه در طیف خروجی خود می‌دهد ولی خطای آن از الگوریتم پیشنهادی بیشتر است. روش OVSS-VM در حدود ۲ درجه خطای تخمین دارد. در حالی که خطای زاویه الگوریتم پیشنهادی کمتر از ۰/۵ درجه است.



شکل (۶) : مقایسه طیف خروجی الگوریتم‌ها برای اختلاف زاویه کم

## مراجع

- [1] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [2] T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing for estimation of coherent signals," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-33, pp. 806-811, 1985.
- [3] S. U. Pillai, B. H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification", IEEE Transactions Acoustics, Speech, and Signal Processing., vol. 37, pp. 8-15, Jan 1989.
- [4] C. Y. Qi, Y. L. Wang, Y. S. Zhang, and Y. Han, "Spatial difference smoothing for DOA estimation of coherent signals," IEEE Signal Process. Lett., vol. 12, pp. 800-802, Nov. 2005.
- [5] Al-Ardi E.M., Shubair R.M., Al-Mualla M.E. "Computationally efficient high-resolution DOA estimation in multipath environment," IEEE Electronic Lett., 2004, 40, (14), pp. 908-910.
- [6] X. Xu, Z. F. Ye, Y. F. Zhang, and C. Q. Chang, "A deflation approach to direction of arrival estimation for symmetric uniform linear array," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 5, pp. 486-489, 2006.
- [7] ZHANG Y.F., YE Z.F.: 'Efficient method of DOA estimation for uncorrelated and coherent signals', IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 2008, 7, pp. 799-802.
- [8] Kang Jun, Huang Dengshan, Cai Huifu, Wang Dajun, "A novel high resolution direction of arrival estimation algorithm," IEEE Conference (ICIA), pp. 2329-2332, 2010.
- [9] D. Rahamim, J. Tabrikian, and R. Shavit, "Source localization using vector sensor array in a multipath environment," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 53, no. 11, pp. 3096-3103, Nov. 2004.
- [10] Qingwu Li, Chunyuan He, "A New Thresholding Method in Wavelet Packet Analysis for Image De-noising," in proc. conf. Mechatronics and Automation, pp. 2074-2078, 2006.
- [11] J. F. Cardoso, High-order contrasts for independent component analysis, Neural Computation, vol. 11(1), 1999, pp. 157-192.

در جدول (۱) نرخ موفقیت الگوریتم‌های مختلف در تخمین صحیح دو زاویه همبسته نزدیک به هم گردآوری شده است. اختلاف زاویه‌ها در ستون اول، نرخ موفقیت تخمین زاویه‌ها در ستون‌های بعدی قرار گرفته است. SNR=۳dB برای این قسمت از شبیه‌سازی انتخاب شده است. نتایج جدول (۱) از میانگین ۱۰۰ آزمایش مستقل از هم به دست آمده است. عدد ۱ معادل موفقیت در تخمین دو زاویه است و عدد صفر معادل شکست در تخمین دو زاویه است.

جدول (۱) : نرخ موفقیت در تخمین دو زاویه نزدیک به هم در SNR=۳dB

اختلاف زاویه	روش SDS	روش FBSS	روش OVSS-VM	روش پیشنهادی
۱۰	۱	۱	۱	۱
۶	۰/۸۶	۰/۵۳	۰/۹۱	۱
۴	۰/۴۵	۰/۲	۰/۶۲	۰/۸۳

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بهینه برای تخمین زاویه ورود (DOA) سیگنال‌های همبسته و ناهمبسته ارائه شده است. زاویه و توان