

ساختاری با پیچیدگی کم برای تشخیص جهت ورود سیگنال‌های همدوس منابع نامشخص در زوایای کناری آنتن

شهریار شیروانی مقدم^{۱*}، اکبر کشاورز نسب^۲

۱- دانشیار، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(دریافت: ۹۴/۰۳/۱۷؛ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۲)

چکیده

تخمین جهت ورود سیگنال‌های دریافتی در حضور منابع همدوس یا ناهمدوس که خود شامل سیگنال‌های همدوس هستند پیچیده است. به‌تازگی روشی مبتنی بر آرایه خطی یکنواخت پیشنهاد شده است که ابتدا تعداد منابع ناهمدوس را تعیین کرده و سپس جهت زوایای ورود سیگنال‌های همدوس را تخمین می‌زند. اگر چه آرایه خطی یکنواخت برای تخمین جهت ورود سیگنال رایج است اما زمانی که سیگنال‌ها در زوایای کناری آنتن دریافت می‌شوند در تشخیص منابع کارایی مناسبی حاصل نمی‌شود و ممکن است سیگنال‌ها از دست بروند. آرایه صلیبی یکی از راه حل‌های این مشکل است اما این ساختار نیز در تخمین سیگنال‌هایی که در زوایای میانی آنتن دریافت می‌شوند کارایی بالایی ندارد و پیچیدگی محاسباتی نیز افزایش می‌یابد. هدف اصلی این مقاله، ارائه روشی جدید با استفاده از الگوریتم JADE-MUSIC مبتنی بر مقدار آستانه است که شامل دو قسمت است. برای زوایایی که در محدوده $[60^\circ \text{ تا } -60^\circ]$ هستند، عناصر افقی آرایه صلیبی و برای زوایای نزدیک به کناره‌های آرایه، زوایایی که در محدوده $[60^\circ \text{ تا } -90^\circ]$ و $[90^\circ \text{ تا } 60^\circ]$ هستند، از مقادیر حاصل از عناصر عمودی آرایه صلیبی برای تخمین جهت ورود استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این روش جدید، در تخمین جهت ورود سیگنال‌های باند باریک نسبت به آرایه‌های خطی یکنواخت و صلیبی، در کلیه زوایا، کارایی بالاتری دارد ضمناً بار محاسباتی آن مشابه حالتی است که از آرایه خطی یکنواخت استفاده می‌شود.

واژگان کلیدی

آرایه خطی یکنواخت، آرایه صلیبی، تخمین جهت ورود، روش تفاضل مقادیر ویژه، هموارسازی فضائی پیشرو-پسرو، الگوریتم JADE-MUSIC

۱. مقدمه

و مولفه‌های چندمسیره آنها در سامانه‌هایی که از آرایه‌های آنتنی تطبیقی برای استخراج سیگنال‌ها در محیط‌های تداخلی استفاده می‌کنند، مهم است. سامانه‌های آرایه آنتنی تطبیقی قابلیت شکل‌دهی الگوی تشعشعی در جهت سیگنال مورد نظر و نیز قابلیت صفر کردن الگو در جهت تداخل را به طور خودکار دارند. همچنین روش‌های تخمین DOA می‌توانند برای تشخیص و تعقیب منابع متحرک سیگنال و سیگنال‌های تداخلی و آن‌هایی که می‌توانند با استفاده از روش‌های فیلترسازی فضایی مناسب جدا شوند، استفاده شوند. همچنین در طبقه‌بندی و مدل کردن کانال‌های فضایی/زمانی و ارائه سرویس‌های شبکه‌های سیار مبتنی بر مکان قابل استفاده هستند [۱ و ۴-۳]. تخمین DOA منابع همدوس ناشی از پدیده چندمسیری و نیز تخمین DOA چند بعدی از موضوعات مهم دیگر در زمینه مخابرات بی‌سیم هستند [۵]. در بسیاری موارد، به خاطر پایین بودن کارایی روش‌های تخمین سیگنال‌های دریافتی از زوایای کناری آنتن با ULA^۲ تک

تخمین و تشخیص جهت ورود (DOA^۱) سیگنال‌های دریافتی جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای نظامی و مدنی دارد و از دیرباز روش‌های تخمین جهت ورود در کاربردهایی نظیر: رادار، سونار، پایش الکترونیک و لرزه‌نگاری استفاده شده است. در کاربردهای راداری، برای کنترل ترافیک هوایی و ردیابی هدف، این روش‌ها بسیار مفید هستند. سازمان‌های جاسوسی از این روش‌ها برای پنهان کردن مکان فرستنده‌ها و جلوگیری از ورود سیگنال‌های مزاحم استفاده می‌کنند. همچنین تخمین جهت ورود سیگنال، کاربردهایی را نیز در مکان‌یابی و تعقیب اهداف متحرک دارد و در ضمن به فرآیند شکل‌دهی الگوی تشعشعی و فیلترسازی فضایی که تأثیرات تداخل و چندمسیری را کاهش می‌دهد، کمک فراوانی می‌کند [۲-۱]. تخمین جهت ورود سیگنال‌های چندگانه

*رایانامه نویسنده پاسخگو: sh_shirvani@srttu.edu

^۱ Direction of Arrival

^۲ Uniform Linear Array

سیگنال‌های همدوس هستند، قابل دست‌یابی نیست. همچنین تعداد سیگنال‌های همدوس در هر گروه باید مشخص باشد. برای این کار، شیروانی‌مقدم و کشاورز نسب الگوریتم JADE-MUSIC^۸ مبتنی بر مقدار آستانه را پیشنهاد کردند [۲۶] که ابتدا تعداد منابع ناهمدوس را با استفاده از الگوریتم EGM تخمین می‌زند. الگوریتم JADE-MUSIC روش قطری‌سازی همزمان ماتریس مقادیر ویژه (JADE) و روش طبقه‌بند سیگنال‌های چندگانه (MUSIC) را ترکیب می‌کند تا DOA منابع ناهمدوس را که خود شامل سیگنال‌های همدوس هستند تخمین بزند. با دانستن تعداد منابع ناهمدوس، الگوریتم JADE بردارهای هدایت دسته سیگنال‌های مختلف را با استفاده از کومولان‌های مرتبه چهار (FOC^۹) از یکدیگر جدا می‌کند و با استفاده از الگوریتم MUSIC، DOA سیگنال‌ها را تخمین می‌زند. الگوریتم JADE، کوواریانس را محاسبه می‌کند و ماتریس سفیدساز و ماتریس FOC فرآیند سفیدسازی را انجام می‌دهند. سپس از تجزیه ویژه برای ماتریس مورد نظر استفاده می‌کند و تعدادی از زوج‌های مقادیر ویژه را به‌عنوان تعداد گروه‌های سیگنال غیر همدوس در نظر می‌گیرد. بعد از آن، این الگوریتم با استفاده از ماتریس یک‌ساز، زوج مقادیر ویژه را قطری می‌کند [۲۶]. الگوریتم MUSIC، توان طیفی آرایه آنتن را ردیابی می‌کند و سیگنال‌هایی را که نسبت به زیرفضای نویز متعام هستند انتخاب می‌کند [۲۹].

این تحقیق از نسخه تغییر یافته الگوریتم JADE-MUSIC (که توسط شیروانی مقدم - کشاورز نسب معرفی شده است [۲۶]) برای تخمین DOA گروه‌های سیگنال نامعلوم استفاده می‌کند. به‌علاوه، برخی از تغییرات برای افزایش کارایی تخمین DOA اعمال شده است. در ابتدا، EGM برای تخمین تعداد منابع استفاده شده است. سپس سیگنال‌های دریافتی با استفاده از روش هموارسازی فضایی پیشرو-پسرو (FBSS^{۱۰}) هموار شده‌اند. در آخر DOA سیگنال‌ها توسط هر دو ساختار آرایه خطی یکنواخت (ULA) و آرایه صلیبی (CA^{۱۱}) تخمین زده می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بر اساس معیار ریشه میانگین مربع خطا (RMSE^{۱۲}) کلی نشان می‌دهد که ULA و CA به‌ترتیب برای تخمین زاویه ورود منابعی که در زوایای کناری و میانی آنتن دریافت می‌شوند، آرایه‌های مناسبی نیستند. در این تحقیق، روش جدیدی ارائه شده است که جستجوی زاویه‌ای را به دو قسمت

بعدی، لازم است از آرایه دو بعدی استفاده شود که ضمن بهبود تخمین، باعث بالا رفتن پیچیدگی محاسباتی می‌شود.

تعیین تعداد نامشخص منابع از روی سیگنال دریافتی، یک مسأله اساسی در پردازش سیگنال‌های آرایه‌ای است و این کار سبب بهبود کارایی روش تخمین DOA می‌شود. در این رابطه چندین روش برای تخمین تعداد منابع سیگنال ارائه شده است. بعضی روش‌ها تعداد منابع سیگنال را بر اساس ماتریس‌های آمارگان مرتبه بالاتر (HOS^{۱۳}) تعیین می‌کنند [۶]. روش‌های دیگر نیز بر اساس معیار تئوری اطلاعات (ITC^{۱۴})، مانند معیار اطلاعات آکایک (AIC^{۱۵})، معیار اطلاعات بیزین (BIC^{۱۶}) و یا معادل آن، کمینه طول تفصیلی (MDL^{۱۷}) [۸-۱۰]، گسترش یافته‌اند. این روش‌ها معیار انتخابی را استفاده می‌کنند که توابع مبتنی بر بیشترین شبیه‌نمایی و برخی توابع دیگر را با هم ترکیب می‌کنند. فرمول کلی در [۱۱] آمده است و مقادیر ویژه معیارهای AIC را می‌سازند و MDL نیز در [۱۲] به‌دست آمده است. این روش‌ها همچون تکنیک‌های تقویت وضوح، که بر تجزیه ویژه ماتریس داده‌ها استوار است، بسیار مفید هستند [۱۳]. چندویژگی دیگر برای تخمین‌گر MDL در [۱۴-۱۹] آمده است.

روش آستانه افزایشی ویژه (EIT^{۱۸}) در مقایسه با روش‌های سنتی AIC و MDL برتری دارد زیرا کارایی بالاتری در تعیین تعداد منابع دارد. این درحالی است که وقتی توان منابع متفاوت است روش EIT با مشکل کاهش احتمال تشخیص مواجه می‌شود [۲۰]. برخی روش‌های دیگر مبتنی بر آمارگان، مراتب دو و چهار هستند [۳ و ۲۱-۲۵]. در این روش‌ها، تعداد منابع برابر تعداد درایه‌های ویژه مقادیر غیر صفر ماتریس خودبستگی آرایه آنتن است. اما در کاربردهای عملی، تمامی مقادیر ویژه غیر صفر هستند. جهت حل این مشکل، برای مقادیر ویژه، باید مقدار آستانه‌ای در نظر گرفت که این موضوع ایده اصلی روش تفاضل مقادیر ویژه (EGM^{۱۹}) است [۲۶-۲۷]. در ابتدا، این روش تفاضل تمامی مقادیر ویژه ماتریس خودبستگی آرایه آنتن را با همسایگی‌هایشان پیدا می‌کند و سپس میانگین تفاضل‌ها را به‌عنوان مقدار آستانه در نظر می‌گیرد. سپس تفاضل‌ها با مقدار آستانه مقایسه می‌شوند و در آخر، تعداد منابع ناهمدوس، یکی کمتر از تعداد مقادیر ویژه همسایه است که اختلاف آن‌ها از مقدار آستانه بزرگ‌تر هستند [۲۶ و ۲۸].

در کاربردهای واقعی، مقادیر ویژه صفر که نشان دهنده

^۸ Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices

^۹ Multiple Signal Classification

^{۱۰} Forth Order Cumulant

^{۱۱} Forward-Backward Spatial Smoothing

^{۱۲} Cross Array

^{۱۳} Root Mean Square Error

^۱ Higher Order Statistics

^۲ Information Theoretic Criterion

^۳ Akaike Information Criterion

^۴ Bayesian Information Criterion

^۵ Minimum Description Length

^۶ Eigen Increment Threshold

^۷ Eigenvalue Gradient Method

فرض $\tau_0 = 0$ می‌توان تأخیر را به صورت زیر حذف نمود:

$$\tau_n = -(d_n/c)\sin\theta \quad (3)$$

عبارت τ_0 در $e^{j\omega_c\tau_0}$ عبارت فازی تصادفی را ایجاد می‌کند که برای تمامی اجزای گیرنده مشترک است. بعد از جای‌گذاری رابطه (۳) در رابطه (۱) داریم:

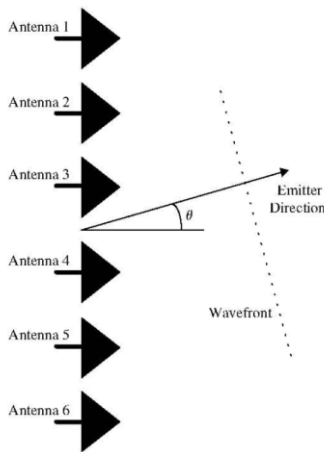
$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} s(t - \tau_1)e^{j\omega_c\tau_1} \\ \vdots \\ s(t - \tau_N)e^{j\omega_c\tau_N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که $\mathbf{x}(t)$ بردار سیگنال‌های دریافتی واقع در فرکانس مرکزی است. اگر پهناى باند نسبی سیگنال (نسبت پهناى باند سیگنال، B ، به فرکانس مرکزی، f_c)، خیلی بزرگتر از عکس طول آرایه باشد (طول آرایه ULA (شکل ۱) برحسب طول موج) باشد، $s(t) \approx s(t - \tau_n)$ در این حالت به روابط زیر می‌رسیم:

$$\mathbf{x}(t) = s(t) \begin{bmatrix} e^{j\omega_c\tau_1} \\ \vdots \\ e^{j\omega_c\tau_M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} \exp\left\{\frac{j2\pi d_1 \sin\theta}{\lambda}\right\} \\ \vdots \\ \exp\left\{\frac{j2\pi d_N \sin\theta}{\lambda}\right\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که $\mathbf{a}(\theta)$ بردار هدایت آرایه است.



شکل ۱. نمونه‌ای از یک آرایه شش عنصری ($N=6$)

در این تحقیق، تعداد کل سیگنال‌ها K است و از D منبع مستقل و باند باریک غیرگوسی $S_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, D$ ناشی شده‌اند. به عبارت واضح‌تر، D گروه وجود دارد که به یک ULA دارای N عنصر برخورد می‌کنند.

میان‌ی و کناری تقسیم می‌کند. برای زوایای میان‌ی، گیرنده‌های افقی و برای زوایای کناری، گیرنده‌های عمودی آرایه آنتنی CA در نظر گرفته می‌شوند.

در ادامه، در بخش ۲، مدل سیگنال‌های همدوس بیان می‌شود. بخش ۳، روش EGM را برای تعیین تعداد منابع با جزئیات بیشتر بیان می‌کند. در بخش ۴، الگوریتم JADE، که با استفاده از آن بردار هدایت تعمیم یافته هر گروه تخمین زده می‌شود، شرح داده می‌شود. در بخش ۵، هموارسازی فضایی پیشروپسرو (FBSS) و الگوریتم MUSIC، که برای تخمین زوایای ورود سیگنال‌های همدوس هر گروه استفاده شده، توضیح داده می‌شوند. معیار استفاده شده برای مقایسه دقت تخمین در حالات مختلف، RMSE، در بخش ۶ معرفی می‌شود. در ادامه، در بخش ۷، نتایج اولین شبیه‌سازی آنتن ULA با استفاده از الگوریتم JADE-MUSIC در نرم افزار MATLAB^۱ ارائه می‌شود که کارایی خوبی را برای زوایای میان‌ی آنتن نشان می‌دهد اما برای زوایای کناری آنتن نتیجه قابل قبول نیست. روش پیشنهادی، که به تخمین دقیق‌تر زوایای ورود می‌انجامد، در بخش ۸ ارائه می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی دوم و مقایسه کارایی روش پیشنهادی با حالات قبل، در این بخش ارائه می‌شود. در پایان، بخش ۹ نتیجه‌گیری نهائی و نکات برجسته این تحقیق را ارائه می‌دهد.

۲. مدل سیگنال

در این تحقیق فرض شده است که منابع از نوع باند باریک هستند و از آنتن بسیار دور (فرض میدان دور) به آنتن آرایه‌ای گیرنده می‌رسند. مطابق رابطه (۱)، سیگنال‌های دریافتی ناشی از منابع نقطه‌ای (منابع بسیار دور) تأخیر یافته سیگنال ارسالی هستند که با تأخیر τ_i به آرایه می‌رسند ($1 \leq i \leq N$).

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} s(t - \tau_1)e^{j\omega_c(t-\tau_1)} \\ \vdots \\ s(t - \tau_N)e^{j\omega_c(t-\tau_N)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که $\mathbf{x}(t)$ بردار سیگنال دریافتی، τ_n ($1 \leq n \leq N$)، تأخیر انتشار مربوط به هر یک از گیرنده‌هاست و ω_c ، فرکانس زاویه‌ای حامل است.

$$\tau_n = \tau_0 - (d_n/c)\sin\theta \quad (2)$$

که τ_0 ، تأخیر انتشار از فرستنده تا گیرنده، d_n ، فاصله بین عناصر مجاور گیرنده و c ، سرعت نور است. θ جهت منبع سیگنال (فرستنده) نسبت به خط عمود بر محور آرایه گیرنده است. با

^۲ Steering Vector

^۱ MATrix LABORatory

MDL ارائه دادند. بر اساس این دو الگوریتم، تعداد منابع به عنوان مقداری که معیار MDL و AIC را کمینه می‌کند در نظر گرفته می‌شود [۲۷، ۳۰]. لو جینگ کینگ [۲۷] مجموعه‌ای از EGMها را که شبیه روش‌های AIC و MDL هستند، در تعیین تعداد منابع ناهمدوس ارائه نمود. نتایج شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، کارایی بالای الگوریتم EGM برای سیگنال‌های ناهمدوس را نشان می‌دهد. اما اگر اختلاف کمی بین منابع ناهمدوس وجود داشته باشد روش‌های AIC و MDL نسبت به EGM بسیار بهتر عمل می‌کنند. این روش‌ها تنها می‌توانند سیگنال‌های ناهمدوس را تخمین بزنند و کارایی آن‌ها در صورتی که سیگنال‌ها همدوس یا همبسته باشند به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، در ابتدا روش هموارسازی فضایی به عنوان مرحله پیش‌پردازش برای رفع همبستگی یا همدوسی استفاده می‌شود و سپس الگوریتم‌های MDL، AIC و EGM برای تخمین تعداد منابع استفاده می‌شوند. نتایج عددی نشان می‌دهند که اگر منابع همدوس یا همبسته باشند، EGM مبتنی بر FBSS احتمال تشخیص بالاتری نسبت به MDL و AIC مبتنی بر FBSS دارد [۳۰]. بنابراین، در این تحقیق تعداد منابع ناهمدوسی که شامل سیگنال‌های همدوس هستند بر اساس EGM ماتریس خودبستگی سیگنال تخمین زده می‌شوند که در [۶] آمده است. به طور خلاصه، فرآیند EGM استفاده شده در این تحقیق به صورت زیر است:

۱. با استفاده از داده‌های خروجی آرایه $\mathbf{x}(t)$ ماتریس خودبستگی فضایی؛ \mathbf{R}_x محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{R}_x = \frac{1}{\text{Snapshots}} \sum_{t=1}^{\text{Snapshots}} \mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t) \quad (10)$$

۲. مقادیر ویژه \mathbf{R}_x محاسبه و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. در حالت ایده‌آل، D منبع ناهمدوس، سبب ایجاد D مقدار ویژه غیرصفر می‌شود. دنباله این مقادیر ویژه به این صورت می‌شوند:

$$\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_D \geq \lambda_{D+1} = \dots = \lambda_N = \sigma_n^2 \quad (11)$$

۳. چون اختلاف چشمگیری بین λ_D و λ_{D+1} وجود دارد تعداد سیگنال‌ها؛ D می‌تواند با بررسی اختلاف بین همسایگی مقادیر ویژه مشخص شود.

۴. میانگین اختلاف‌های تمامی مقادیر ویژه با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 - \lambda_N}{N-1} \quad (12)$$

اختلاف‌های مقادیر ویژه همسایه با معادله زیر محاسبه

می‌شوند:

$$\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{i+1}, \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

$$S(t) = \sum_{k=1}^D S_k(t) \quad (7)$$

این سیگنال‌ها غیرگوسی مستقل و دارای میانگین صفر سیگنال هر منبع (گروه) در مسیر فرستند تا گیرنده، به موانع مختلفی برخورد می‌کند و به گیرنده می‌رسد (پدیده چند مسیری). این پدیده، سبب ایجاد مجموعه سیگنال‌های تأخیری می‌شود. در مدل‌سازی سیگنال و معادلات مربوط به آن، چندمسیری با ضرایبی به نام ضرایب چندمسیری یا فیدینگ مدل و شبیه‌سازی می‌شود. هر کدام از این گروه سیگنال‌ها در یک مجموعه ضرایب فیدینگ (α_{kp}) ضرب می‌شوند تا تمامی سیگنال‌های رسیده به آنتن از یک منبع (R_k) (بدون در نظر گرفتن نویز) ناشی از یک سیگنال خروجی از منبع (S_k) را نشان دهند. پس R_k تعداد سیگنال‌های چندمسیره برای منبع k ام از $S_k(t)$ با ضرایب فیدینگ α_{kp} که $r = 1, 2, \dots, R_k$ و $\sum_{k=1}^D R_k = K$ هستند. در این تحقیق فرض شده است که تعداد منابع کمتر از تعداد گیرنده‌های آنتن ($D < N$) و فضای بین گیرنده‌ها d برابر نصف طول موج (λ) است. بردار خروجی آنتن نیز هم بعد با تعداد عناصر آنتن گیرنده است. بر اساس توضیح بالا می‌توان نوشت:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^D \sum_{r=1}^{R_k} a(\theta_{kr}) \alpha_{kr} S_k(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A}S(t) + \mathbf{n}(t) \quad (8)$$

سیگنال رسیده به آنتن برابر است با حاصل ضرب سیگنال ارسالی و ضرایب چندمسیری به علاوه سیگنال نویز. در معادله بالا $a(\theta)$ بردار هدایت، λ طول موج سیگنال، D تعداد منابع سیگنال، $\mathbf{A} = [A_1 \alpha_1, \dots, A_D \alpha_D]$ ماتریس هدایت و $A_k \alpha_k$ بردار هدایت تعمیم یافته گروه k ام است که $A_k = [a(\theta_{k1}), \dots, a(\theta_{kR_k})]$ و $\alpha_k = [\alpha_{k1}, \dots, \alpha_{kR_k}]^T$ فیدینگ k امین گروه هستند. $S(t) = [S_1(t), \dots, S_D(t)]^T$ ماتریس منابع دور است که هر عنصر آن بردار منبع و $\mathbf{n}(t)$ بردار نویز گوسی سفید جمعی (AWGN) با میانگین صفر و توان دلخواه است که از منابع و سیگنال‌های دیگر مستقل است. $A_k \alpha_k$ برای گروه k ام به صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_k \alpha_k = [\alpha_{k1} a(\theta_{k1}) + \alpha_{k2} a(\theta_{k2}) + \dots + \alpha_{kR_k} a(\theta_{kR_k})] \quad (9)$$

بر اساس این معادلات، اندازه ماتریس خروجی آنتن برابر است با (تعداد نمونه‌ها $N \times N$).

۳. تخمین تعداد منابع

یکی از روش‌هایی که بیشترین استفاده را در تخمین تعداد منابع دارد، معیار تئوری اطلاعات است که توسط واکس و کایلات ارائه شده است و روشی را برای این حل مشکل مبتنی بر AIC و

استفاده شده است. ماتریس \mathbf{H} که $\mathbf{H} = \mathbf{V}' \times \mathbf{A}_1 \times$ قطری خواهد بود. $\mathbf{V}, \dots, \mathbf{V}' \times \mathbf{A}_D \times \mathbf{V}$ هم اندازه ماتریس \mathbf{A} است. به شرطی که $\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_D$ قطری شوند \mathbf{H} نیز مجموعه‌ای از ماتریس‌های

۴. یکی از تخمین‌های ماتریس \mathbf{A} به صورت $\mathbf{A}' = \mathbf{W}^\dagger \mathbf{U} = \mathbf{A} \mathbf{\Pi}$ است که $\mathbf{\Pi}$ ماتریس جای‌گشتی تعمیم یافته است. ماتریس \mathbf{W}^\dagger ماتریس شبه معکوس (معکوس مور-پنروز) ^۵ ماتریس \mathbf{W} است.

ماتریس کوواریانس $\mathbf{x}(t)$ را به صورت رابطه (۱۵) تجزیه می‌کنیم.

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{E} \{ \mathbf{x}(t) \mathbf{x}(t)^H \} = \mathbf{A} \mathbf{A}^H + \mathbf{E} \{ \mathbf{n}(t) \mathbf{n}(t)^H \} = \mathbf{A} \mathbf{A}^H + \sigma \mathbf{I}_N \quad (15)$$

$D \leq N$ تعداد گیرنده‌ها و D تعداد گروه سیگنال‌هاست. اگر $D \leq N$ باشد σ برابر میانگین $N-D$ کوچکترین مقدارهای ویژه ماتریس \mathbf{R}_x است. اگر D مقدار ویژه بزرگ ماتریس \mathbf{R}_x را با μ_1, \dots, μ_D بردارهای ویژه مربوط به آنها را با h_1, \dots, h_D نشان دهیم، ماتریس سفیدساز \mathbf{W} را از رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{E} \{ \mathbf{x}(t) \mathbf{x}(t)^H \} = \mathbf{A} \mathbf{A}^H + \mathbf{E} \{ \mathbf{n}(t) \mathbf{n}(t)^H \} = \mathbf{A} \mathbf{A}^H + \sigma \mathbf{I}_N \quad (16)$$

$$\mathbf{I}_D = \mathbf{W} (\mathbf{R}_x - \sigma \mathbf{I}) \mathbf{W}^H = \mathbf{W} (\mathbf{A} \mathbf{A}^H) \mathbf{W}^H \quad (17)$$

$$\mathbf{R}_z = \mathbf{W} \mathbf{R}_x \mathbf{W}^H = \mathbf{W} (\mathbf{A} \mathbf{A}^H + \sigma \mathbf{I}_N) \mathbf{W}^H =$$

$$\mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{A}^H \mathbf{W}^H + \mathbf{W} \sigma \mathbf{I}_N \mathbf{W}^H = \mathbf{I}_D + \sigma \mathbf{W} \mathbf{W}^H = \mathbf{I}_D + \sigma \begin{pmatrix} \frac{1}{\mu_1 - \sigma} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{1}{\mu_D - \sigma} \end{pmatrix} \quad (18)$$

و برای $\mathbf{z}(t)$ داریم:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{W} \mathbf{x}(t) = \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{W} \mathbf{n}(t) = \mathbf{U} \mathbf{s}(t) + \mathbf{W} \mathbf{n}(t), \mathbf{U} = \mathbf{W} \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{U} \mathbf{U}^H = \mathbf{I}_D \quad (19)$$

که \mathbf{U} ماتریس یک‌ساز است. اگر بتوان ماتریس \mathbf{U} را یافت می‌توان ماتریس \mathbf{S} را بر اساس معادله $\mathbf{S} = \mathbf{U}^H \mathbf{z}$ تخمین زد. ماتریس \mathbf{A} شامل بردار هدایت گروه‌ها، از معادله $\mathbf{A} = \mathbf{W}^\dagger \mathbf{U}$ محاسبه می‌شود که \mathbf{W}^\dagger شبه معکوس ماتریس \mathbf{W} است.

۵. با مقایسه تمامی λ_i با $\Delta \bar{\lambda}$ و بررسی شرط $\Delta \lambda_i \leq \Delta \bar{\lambda}$ و فرض این که i_0 اولین i ای است که این شرط در آن صدق می‌کند، تعداد منابع برابر است با:

$$D = i_0 - 1 \quad (14)$$

باید توجه داشت که میانگین تفاضل‌ها به سه عامل بستگی دارد، نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۱، تعداد نمونه‌های سیگنال و تعداد گیرنده‌های آنتن. در مراجع [۱، ۳۰]، با فرض ثابت بودن دو عامل، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که:

۱. افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) سبب افزایش میانگین اختلاف‌های تمامی مقادیر ویژه می‌شود. این اثر به این دلیل است که افزایش توان سیگنال‌ها سبب افزایش مقادیر ویژه و همچنین میانگین کلی اختلاف‌ها می‌شود.

۲. افزایش تعداد نمونه‌های سیگنال سبب همگرایی میانگین تمامی اختلاف‌های مقادیر ویژه به یک عدد ثابت می‌شود. نشان داده شده است که افزایش تعداد نمونه‌های سیگنال، سبب دقیق‌تر شدن مقادیر ویژه آستانه و نیز نزدیک‌تر شدن اولین و آخرین مقدار آستانه به هم می‌شود. همچنین این افزایش در احتمال تشخیص در فرآیند تعیین تعداد منابع ناهمدوس نیز دیده می‌شود.

۳. افزایش تعداد منابع گیرنده‌های آنتن در مخرج معادله (۶) سبب کاهش میانگین تفاضل‌های تمامی مقادیر ویژه و نیز کاهش اختلاف بین اولین و آخرین مقدار ویژه می‌شود.

۴. الگوریتم JADE برای تخمین بردارهای هدایت

تعمیم یافته هرگروه

مراحل این الگوریتم را می‌توان در چهار مرحله زیر خلاصه نمود:

۱. محاسبه ماتریس کوواریانس (خودبستگی) \mathbf{R}_x خروجی آنتن، با رابطه $\mathbf{R}_x = \mathbf{E} \{ \mathbf{x}(t) \mathbf{x}(t)^H \}$ و ماتریس سفیدساز \mathbf{W}^\dagger .

۲. محاسبه ماتریس کومولان مرتبه چهارم ماتریس سفید شده $\mathbf{z}(t) = \mathbf{W} \mathbf{x}(t)$. محاسبه زوج مرتب ماتریس و مقادیر ویژه ماتریس $\mathbf{z}(t)$ ، $\{\lambda_{zr}, \mathbf{M}_{zr}\}$ ، $r=1, 2, \dots, D$ مربوط به D تایی بزرگ آن (D تعداد گروه‌های همدوس). در این تحقیق از تجزیه مقادیر منفرد^۳ استفاده شده است.

۳. قطری‌سازی همزمان مجموعه $\{\lambda_{zr}, \mathbf{M}_{zr}, r=1, 2, \dots, D\}$ توسط ماتریس یک‌ساز^۴ \mathbf{U} . در برنامه زیر از متغیر \mathbf{V} به جای \mathbf{U}

¹ Signal to Noise Ratio

² Whitening Matrix

³ Singular Value Decomposition

⁴ Unitary Matrix

⁵ Moore-Penrose Inverse

خودبستگی پیشرو و پسرو را محاسبه می‌کنیم. بر اساس ارتباطی که قسمت‌های پیشرو و پسرو با یکدیگر دارند می‌توان از رابطه‌ای استفاده کرد تا نیاز به تشکیل زیرآرایه‌ها به صورت پسرو نباشد. برای این کار از ماتریس تبادلی استفاده می‌شود. ماتریس تبادلی ماتریسی است که درایه‌های روی قطر فرعی آن یک و بقیه درایه‌های ماتریس صفر هستند. اگر ماتریس \mathbf{J} یک ماتریس تبادلی با ابعاد $M \times M$ باشد، می‌توان رابطه زیر را برای ماتریس خودبستگی کل نوشت. از این ماتریس در تخمین جهت سیگنال‌های هم‌دوس یک گروه استفاده می‌شود.

$$\bar{\mathbf{R}}_k = \sum_{l=1}^L \frac{\mathbf{G}_{k,l} + \mathbf{J} \mathbf{G}_{k,l}^T \mathbf{J}}{L} \quad (21)$$

روش‌های مختلفی برای تخمین زاویه ورود سیگنال وجود دارد که در سه دسته اساسی کلاسیک، مبتنی بر فضا و مبتنی بر حداکثر درست‌نمایی قرار می‌گیرند. این روش‌ها در نحوه مدل کردن مسأله، پیچیدگی محاسباتی، میزان وضوح زاویه‌ای و دقت تخمین با هم تفاوت دارند. روش‌های مبتنی بر طیف دسته‌های اول و دوم، طیف فضایی سیگنال دریافتی را محاسبه می‌نمایند و سپس زوایای ورود را به عنوان قله‌های این طیف می‌یابند. این روش‌ها از جنبه کاربردی ساده و در مقایسه با روش‌های پارامتریک و مبتنی بر حداکثر درست‌نمایی که بدون محاسبه طیف مستقیماً زوایای ورود را تخمین می‌زنند به محاسبات کمتری نیاز دارند [۱ و ۳۱]. در این میان، الگوریتم MUSIC که جزو روش‌های تخمین زاویه ورود مبتنی بر زیرفضاست و به تکنیک با وضوح بالا مشهور است، مصالحه مناسبی بین وضوح زاویه‌ای و پیچیدگی محاسباتی ایجاد می‌نماید. یکی از ویژگی‌های بارز این الگوریتم، توانایی تطابق با کلیه هندسه‌های آرایه‌ای است. بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس $\bar{\mathbf{R}}_k$ متعلق به دو زیرفضای سیگنال و نویز است. اگر M سیگنال در هر گروه به آرایه برسد، M تا بزرگترین بردارهای ویژه متناظر با M تا بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس مربوط به زیرفضای سیگنال و $N-M$ تا بردار ویژه متناظر با $N-M$ کوچکترین مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس مربوط به زیرفضای نویز است. M بردار هدایت که ماتریس منیفلد $\mathbf{A}(\theta)$ را شکل می‌دهد بر زیرفضای نویز عمود است و بردارهای هدایت در زیرفضای نویز قرار می‌گیرند. الگوریتم MUSIC زیرفضای نویز را با استفاده از تجزیه با مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس تخمین می‌زند. زوایای تخمینی عبارتند از θ هایی که کمترین مقدار $\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{V}_n$ را می‌سازند. \mathbf{V}_n ماتریسی

۵. هموارسازی فضائی و تخمین جهت ورود

پس از این که سیگنال‌ها و بردارهای هدایت تعمیم‌یافته هر گروه با استفاده از روش JADE تخمین زده شد، می‌توان با استفاده از روش‌های تخمین جهت DOA، زاویه سیگنال‌های داخل هر گروه را تخمین زد. در این تحقیق از روش FBSS-MUSIC استفاده شده است که بهترین کارایی را در میان روش‌های خانواده MUSIC برای سیگنال‌های هم‌دوس دارد. اساس کار این روش به صورت زیر است.

۱. هر یک از ستون‌های ماتریس \mathbf{A} که هر کدام بردار هدایت تعمیم‌یافته یک گروه سیگنال هستند را در نظر گرفته و تابع خودبستگی آن را محاسبه می‌کنیم. یعنی اگر $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_D]$ آنگاه می‌توان \mathbf{G}_k برای هر گروه سیگنال را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H, \quad k = 1, 2, \dots, D \quad (20)$$

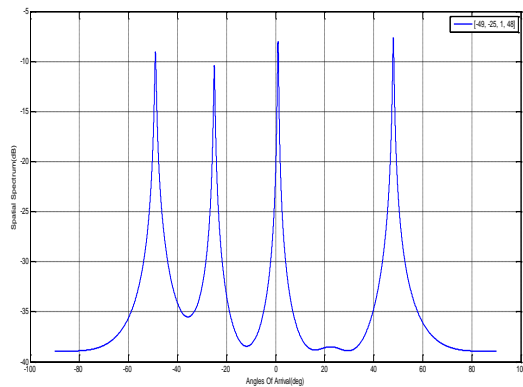
که \mathbf{a}_k ستون k ام (مربوط به گروه k ام) از ماتریس تخمین زده شده بردار هدایت کلی ماتریس \mathbf{A} است.

۲. ماتریس خودبستگی هر گروه را به چندین قسمت تقسیم نموده و از آنها میانگین‌گیری می‌شود. به عبارتی روش FBSS-MUSIC، آرایه گیرنده را به زیر آرایه‌های کوچکتری با طول‌های مشخصی تقسیم می‌کند و سپس ماتریس خودبستگی هر یک از آنها را محاسبه کرده و به صورت پیشرو پسرو میانگین‌گیری می‌کند. اگر N تعداد کل گیرنده‌ها، M طول هر زیرآرایه و L تعداد زیرآرایه‌ها باشد، رابطه $L = N - M + 1$ برقرار است. در این مرحله خواهیم داشت:

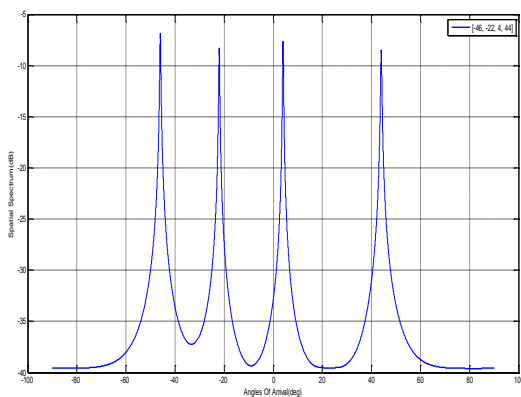
$$\mathbf{G}_{k,l} = \mathbf{G}_k (1:l+M-1, 1:l+M-1), \quad l = 1, 2, \dots, L$$

مشخص است که ماتریس $\mathbf{G}_{k,l}$ از سطر l تا $l+M-1$ و از ستون l تا $l+M-1$ ماتریس \mathbf{G}_k تشکیل شده است.

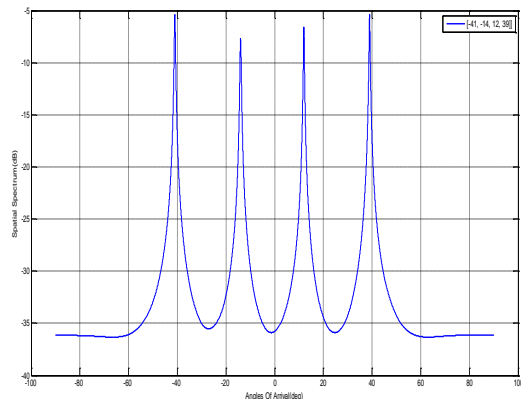
میانگین‌گیری در این روش به صورت پیشرو/پسرو انجام می‌شود. این میانگین‌گیری بدین صورت است که از گیرنده اول شروع به حرکت کرده، زیرآرایه‌ها را جدا نموده و از ماتریس خودبستگی آنها میانگین‌گیری می‌کنیم (قسمت پیشرو). به همان ترتیب از گیرنده انتهایی شروع به حرکت کرده و زیرآرایه‌هایی را تشکیل داده و از ماتریس خودبستگی آنها میانگین‌گیری می‌کنیم (قسمت پسرو). سپس در انتها، میانگین این دو ماتریس



الف. گروه اول $[-49, -25, 1, 48]$



ب. گروه دوم $[-49, -22, 4, 44]$



ج. گروه سوم $[-41, -14, 12, 39]$

شکل ۲. طیف فضایی DOAهای اصلی

ساختار ULA برای تخمین DOA زوایایی که در کنار آنتن دریافت می‌شوند خوب عمل نمی‌کند. برای نشان دادن این حقیقت، DOAهای ۳ گروه سیگنال به مقدار $\pm 40^\circ$ درجه به ترتیب به سمت راست و چپ درجه برده شده‌اند. شکل ۳ RMSE کلی DOAهای تخمینی این حالات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، DOAهای حالت اول (اصلی) در تمامی SNRها نسبت به حالاتی که به راست و چپ برده شده‌اند

مشکل از بردارهای ویژه متناظر با زیرفضای نویز است. یافتن زوایای مورد نظر با پیدا کردن M قله در طیف MUSIC، رابطه (۲۲) میسر می‌شود [۳۲].

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{A}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{A}(\theta)} \quad (22)$$

۶. معیار خطا

در این تحقیق، برای ارزیابی کارایی روش تخمین DOA از معیار مجذور متوسط مربع خطا^۱ مطابق رابطه (۲۳) استفاده می‌شود.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{FK} \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_k(n) - \theta_k)^2} \quad (23)$$

F تعداد تکرارهای آزمایش، K تعداد سیگنال‌های رسیده به آنتن از تمام زوایا و مسیرها و منابع، θ_k و $\hat{\theta}_k$ زوایای اصلی و تخمینی هستند.

۷. نتایج اولین شبیه‌سازی

با توجه به الگوریتم پیشنهادی JADE-MUSIC مبتنی بر EGM، الگوریتم JADE برای تخمین بردارهای هدایت منابع؛ با دانستن تعداد منابع که با روش EGM تخمین زده شده‌اند؛ استفاده می‌شود. بعد از یافتن بردارهای هدایت، روش FBSS-MUSIC زوایای دریافت سیگنال‌های هر بردار هدایت را تخمین می‌زند. در اولین شبیه‌سازی، ۳ منبع ناهمدوس ($D=3$) در نظر گرفته شده است که هر کدام از آن‌ها شامل ۴ سیگنال هم‌دوس ($P_k=4$) است. گروه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب شامل DOAهای: $[-49, -25, 1, 48]$ ، $[-49, -22, 4, 44]$ و $[-41, -14, 12, 39]$ هستند. تعداد گیرنده‌های آنتن (N) که با معادله (۸) مدل شده اند ۱۲ عدد هستند و فاصله هر گیرنده (d) نصف طول موج (λ) است. همچنین $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$ ، تعداد نمونه‌ها ۲۰۰۰ و تعداد تکرارها ۱۰۰ است. برای اجرای FBSS، از دو زیر آرایه دارای همپوشانی که هر کدام هشت گیرنده دارند استفاده شده است. شکل ۲ طیف تخمینی گروه‌های ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد.

$$\mathbf{a}(\theta) = [e^{-j\frac{(N-1)}{2}2\pi d \frac{d}{\lambda} \sin \theta}, \dots, 1, \dots, e^{j\frac{(N-1)}{2}2\pi d \frac{d}{\lambda} \sin \theta}]^T \quad (24)$$

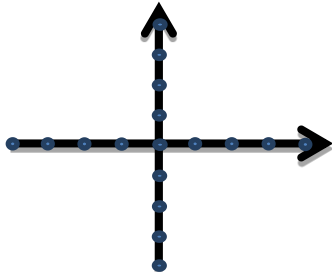
^۱ Root Mean Square Error

محاسبات نسبت به آرایه صلیبی می‌شود. ضمناً در مقایسه با آرایه خطی پیچیدگی اضافه نمی‌شود زیرا در یک آرایه روابط سینوسی و در دیگری کسینوسی استفاده می‌شود که از نظر پیچیدگی مشابهند. بر اساس این روش جدید، بردار هدایت CA می‌تواند به دو بردار هدایت افقی و عمودی تقسیم شود:

$$\mathbf{a}_1(\theta) = [e^{-j\frac{(N-1)}{2}2\pi\frac{d}{\lambda}\sin\theta}, \dots, 1, \dots, e^{j\frac{(N-1)}{2}2\pi\frac{d}{\lambda}\sin\theta}]^T \quad (25)$$

$$\mathbf{a}_2(\theta) = [e^{-j\frac{(M-1)}{2}2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\theta}, \dots, 1, \dots, e^{j\frac{(M-1)}{2}2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\theta}]^T \quad (26)$$

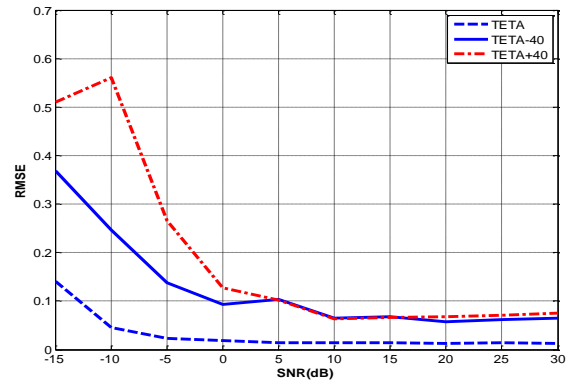
M و N به ترتیب تعداد عناصر ULAهای افقی و عمودی هستند.



شکل ۴. آرایه صلیبی (CA)

در این بخش، DOAهای حالاتی که زوایا به چپ و راست برده شده‌اند با الگوریتم JADE-MUSIC مبتنی بر EGM و برای ۳ ساختار آنتنی تخمین زده می‌شوند. ساختارهای آنتنی ULA افقی (آرایه سینوسی)، ULA عمودی (آرایه کسینوسی) و روش پیشنهادی که جستجوی زاویه‌ای را به دو قسمت تقسیم می‌کند (آرایه صلیبی). در شبیه‌سازی دوم تعداد گیرنده‌های افقی و عمودی یک آرایه ULA ۹ عنصری است که گیرنده میانی مشترک است. یعنی ساختار CA شامل ۱۷ عنصر گیرنده است. فاصله بین گیرنده‌ها برابر نصف طول موج، SNR = 10 dB و تعداد نمونه‌های سیگنال برابر ۲۰۰۰ است. شبیه‌سازی ۱۰۰ بار تکرار شده است. شکل‌های ۵ و ۶ طیف فضایی DOAهای تخمین زده شده برای حالتی که زوایا به چپ و راست برده شده‌اند را برای ULA افقی، ULA عمودی و CA نشان می‌دهند که به ترتیب با نقطه - خط تیره آبی، خط تیره قرمز و خط مشکی رسم شده‌اند. این نمودارها بهبود ناشی از روش پیشنهادی را تأیید می‌کنند. به علاوه این شکل‌ها نشان می‌دهند که به علت ساختار متقارن CA، این آنتن، در هر دو حالت که زوایا به چپ و راست برده شده‌اند تخمین خوبی می‌زند. نکته مهم این است که علیرغم دست‌یابی به این بهبود، پیچیدگی محاسباتی افزایش نیافته است.

بهتر تخمین زده شده‌اند. به‌علاوه، برای SNRهای کوچک، این اختلاف بحرانی‌تر می‌شود و برای SNRهای بزرگ RMSE حالات به چپ و راست برده شده مانند هم هستند اما هر دو از RMSE حالت اصلی بالاتر هستند. این موضوع به این معنی است که ساختار ULA ساختار مناسبی برای تخمین DOA تمامی جهات، خصوصاً برای زوایای کنار آنتن نیست.

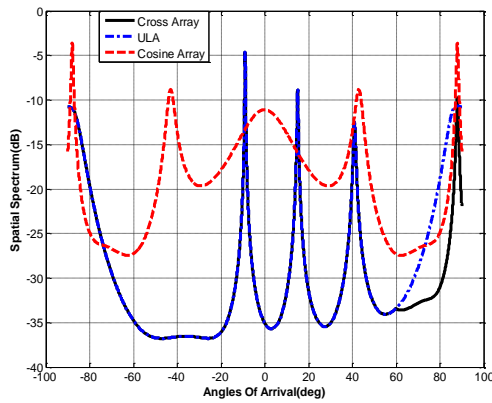


شکل ۳. RMSE زوایای تخمین زده شده توسط ULA تک‌بعدی در ۳ حالت اصلی، انتقال یافته به راست و انتقال یافته به چپ

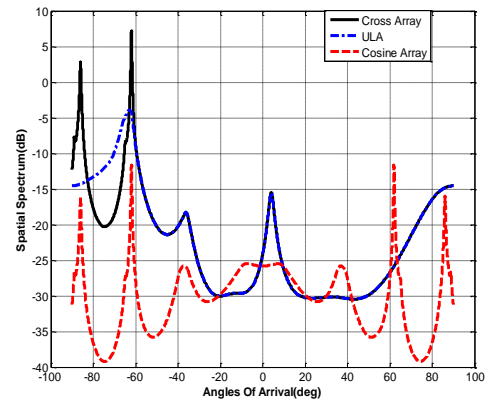
۸. روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

یکی از شکل‌های آنتنی مناسب برای حل مشکل تخمین DOA زوایای کنار آنتنی با هندسه ULA، ساختار CA است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده است این ساختار یک هندسه دو بعدی دارد که پیچیدگی محاسباتی بالاتری دارد.

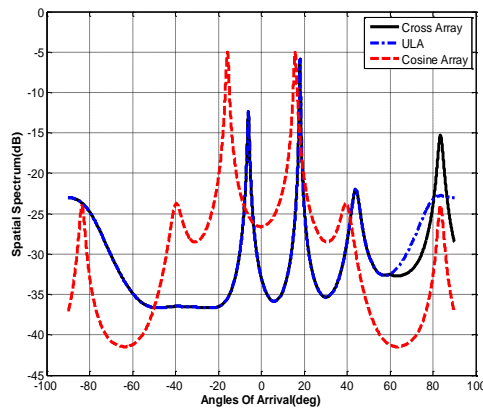
اگر از ساختار ULA تک‌بعدی برای تخمین زوایای کناری استفاده شود؛ همان‌طور که از شکل ۳ مقاله پیداست؛ دقت تخمین کم خواهد بود. به همین دلیل در این تحقیق از آرایه دوبعدی صلیبی؛ یک ULA در جهت افقی و دیگری در جهت عمودی؛ استفاده شده است که پیچیدگی محاسباتی دو برابر ULA تک‌بعدی دارد. سپس برای کاهش این پیچیدگی؛ که تا حد ULA یک بعدی کاهش می‌یابد؛ تخمین در دو بخش زاویه‌ای، زوایای نزدیک به وسط آنتن و زوایای نزدیک به کناره آنتن، انجام می‌شود. برای زوایای میانی، متعلق به بازه $(-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$ ULA افقی و برای زوایای کناری، زوایای متعلق به بازه $(-90^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$ و $(60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ ULA عمودی در نظر گرفته می‌شوند. سیگنال‌های هر ULA فقط برای محدوده اختصاص یافته استفاده می‌شود و سیگنال‌های ULA دیگر نقشی در تخمین زوایای این بخش ندارد. این امر سبب کاهش ۵۰ درصدی



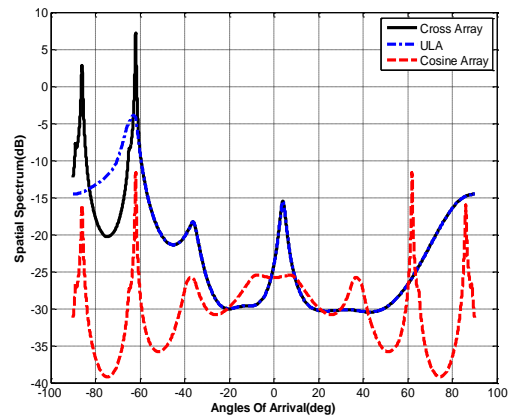
(الف) گروه اول $[-۹, ۱۵, ۴۱, ۸۸]$



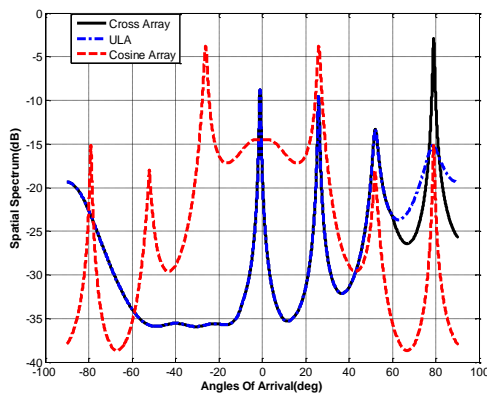
(الف) گروه اول $[-۸۹, -۶۵, -۳۹, ۸]$



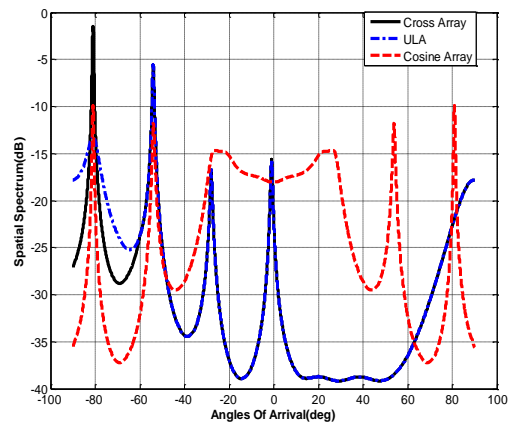
(ب) گروه دوم $[-۶, ۱۸, ۴۴, ۸۴]$



(ب) گروه دوم $[-۸۶, -۶۲, -۳۶, ۴]$



(ج) گروه سوم $[-۱, ۲۶, ۵۲, ۷۹]$



(ج) گروه سوم $[-۸۱, -۵۴, -۲۸, ۱]$

شکل ۶. طیف فضایی MUSIC برای DOAهای انتقال یافته به راست

پیچیدگی محاسباتی در حد آرایه یکنواخت خطی، دقت تخمین زاویه ورود منابع رادیویی (مقدار مجذور متوسط مربع خطای تخمین) مستقل از نحوه قرارگیری منابع خواهد بود و در حالات مختلف قرار گیری منابع، روش پیشنهادی در این مقاله کارایی بالاتری نسبت به دو آرایه قبلی دارد.

شکل ۵. طیف فضایی MUSIC برای DOAهای انتقال یافته به چپ

شکل ۷ نشان می‌دهد که RMSE حاصل از تخمین زاویه ورود به روش پیشنهادی در تمامی نسبت‌های سیگنال به نویز، برای بدترین حالت (مطابق شکل ۳) که زوایا به سمت راست انتقال یافته بودند، کمتر از دو آرایه متداول قبلی ULA و CA است. به عبارت واضح‌تر با به‌کارگیری روش پیشنهادی، ضمن داشتن

EGM در هر گروه، تعداد سیگنال‌های هر گروه تخمین زده می‌شود.

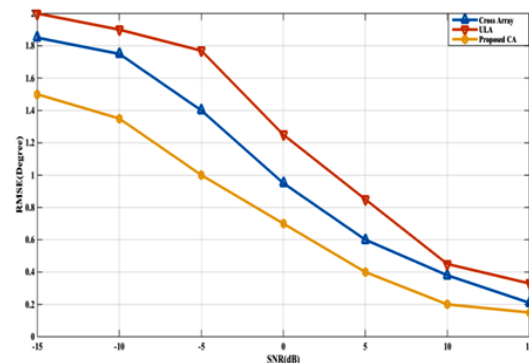
۳. ساختاری برای آنتن آرایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است که موجود، متداول ساده و عملی است.

۴. با تفکیک ناحیه جستجو به دو قسمت زاویه‌ای و استفاده از سیگنال‌های آرایه‌ای افقی و عمودی مرتبط در هر ناحیه، در عین ساده بودن روش، با ایجاد کمترین تغییر در روش موجود، پیچیدگی محاسباتی معادل آرایه ULA حاصل شده است.

۵. در روش پیشنهادی، دقت تخمین و وضوح زاویه‌ای، مستقل از نحوه قرارگیری سیگنال‌های هر گروه، برای میانه و گوشه‌های آرایه یکسان است و دقت تخمین بیشتر از دو ساختار دیگر است. در ساختارهای قبلی، دقت تخمین و وضوح زاویه‌ای کاملاً وابسته به موقعیت منابع و سیگنال‌های همدوس هر گروه است.

۱۰. مراجع

- [1] S. Shirvani Moghaddam and S. Almasi Monfared, "A Comprehensive Performance Study of Narrowband DOA Estimation Algorithms," *International Journal on Communications, Antenna and Propagation (IRECAP)*, vol. 1, no. 4, pp. 396-405, August 2011.
- [2] S. Shirvani Moghaddam and F. Akbari, "Efficient Narrowband Direction of Arrival Estimation Based on a Combination of Uniform Linear / Shirvani-Akbari Arrays," *International Journal of Antennas and Propagation (IJAP)*, Hindawi, September 2012.
- [3] J. Foutz, A. Spanias, and M. K. Banavar, "Narrow band Direction of Arrival Estimation for Antenna Arrays," Morgan & Claypool Publishing: Canada, 2008.
- [4] L. C. Godara, "Handbook of Antennas in Wireless Communications," CRC Press: Boca Rato Florida, 2002.
- [5] E. Tuncer and B. Friedlander, "Classical and Modern Direction-Of-Arrival Estimation," Academic Press: New York, 2009.
- [6] S. Zhenfei, S. Donglin, and X. Shunguo, "Detecting the Number of EMI Sources Based on Higher Order Statistics," In Proc. of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 465-468, January 2009.
- [7] H. Akaike, "A New Look at the Statistical Model Identification," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-19, no. 6, pp. 716-723, December 1974.
- [8] J. Rissanen, "Modeling by Shortest Data Description," *Automatica*, vol. 14, pp. 465-471, 1978.
- [9] M. Wax and I. Ziskind, "Detection of the Number of Coherent Signals by the MDL Principle," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, no. 8, pp. 1190-1196, August 1989.
- [10] E. J. Hannan, "The Determination of the Order of an Autoregression," *Journal of the Royal Statistical Society*,



شکل ۷. RMSE زوایای تخمینی در سه حالت ULA, CA و پیشنهادی

۹. نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم EGM برای تخمین تعداد منابع ناهمدوس که هر کدام خود شامل چندین سیگنال همدوس هستند استفاده شده است. این روش میانگین تفاضل تمامی مقادیر ویژه را محاسبه کرده و از آن به عنوان مقدار آستانه برای تخمین تعداد منابع استفاده می‌کند. نشان داده شده است که این مقدار آستانه به ۳ عامل: SNR، تعداد نمونه‌های سیگنال و تعداد گیرنده‌ها بستگی دارد. الگوریتم JADE-MUSIC پیشنهادی مبتنی بر مقدار آستانه، DOAهای سیگنال‌های همدوس را بدون دانستن تعداد منابع ناهمدوس تخمین می‌زند. همچنین، یک روش جدید با پیچیدگی کم و با استفاده از CA برای تخمین زوایای سیگنال‌های دریافتی از کناره آنتن استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی، موثر بودن این الگوریتم در تخمین زاویه ورود گروه سیگنال‌های ناهمدوس شامل سیگنال‌های همدوس را بدون افزایش پیچیدگی محاسباتی نشان می‌دهد. به عنوان نتیجه مهم، باید توجه نمود که این روش برای تعداد سیگنال‌های همدوس نامشابه در هر گروه نیز می‌تواند استفاده شود. به علاوه، با این روش می‌توان تعداد مسیرهای غالب ناشی از پدیده چندمسیری را تخمین زد. به طور خلاصه، نوآوری‌های این تحقیق عبارتند از:

۱. در این تحقیق، فرض شده است که تعداد منابع (یا گروه‌های دارای سیگنال‌های همدوس) نامشخص است و با روش EGM تعداد منابع تخمین زده شده است. در مقالات قبلی فرض بر این بود که تعداد منابع مشخص است.
۲. در تحقیقات پیشین تعداد سیگنال‌های منابع مختلف برابرند. در این تحقیق به دلیل تخمین تعداد منابع و تعداد سیگنال‌های همدوس هر منبع (گروه)، این فرض محدود کننده برداشته می‌شود. البته برای مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین، همان تعداد منابع با سیگنال‌های برابر در هر گروه شبیه‌سازی شده است. به عبارت واضح تر با اعمال الگوریتم

- Electrical and Control Engineering (JECE), vol. 3, no. 6, pp. 17-22, Nov. /Dec. 2013.
- [26] Q. Zhang, Y. Yin, and J. Huang, "Detecting the Number of Sources Using Modified EGM," In Proc. of the IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 1-4, 2006.
- [27] F. J. Theis and Y. Inouye, "On The Use of Joint Diagonalization in Blind Signal Processing," In Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2006.
- [28] S. U. Pillai and B. H. Kwon, "Forward/Backward Spatial Smoothing Techniques for Coherent Signal Identification," IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 37, no. 1, January 1989.
- [29] S. Shirvani Moghaddam and S. Jalaei, "Determining the Number of Coherent/Correlated Sources Using FBSS-based Methods," Frontiers in Science, vol. 2, no. 6, pp. 203-208, December 2012.
- [30] S. Shirvani Moghaddam, F. Akbari, and V. Tabataba Vakili, "A Novel Array Geometry to Improve DOA Estimation of Narrowband Sources at the Angles Close to the Array Endfire," In Proc. of the 19th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2011), Tehran, Iran, pp. 1-6, May 2011.
- [31] S. Shirvani Moghaddam and F. Akbari, "A Novel ULA-Based Geometry for Improving AOA Estimation," EURASIP Journal of Advances on Signal Processing, vol. 2011 (Article Id: 39), pp. 1-9, 2011.
- Series B (Methodological), vol. 41, no. 2, pp. 190-195, 1979.
- [11] C. R. Rao and Y. WU, "A Strongly Consistent Procedure for Model Selection in a Regression Problem," Biometrika, vol. 76, pp. 369-374, 1989.
- [12] M. Wax and T. Kailath, "Detection of Signals by Information Theoretic Criteria," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. ASSP-33, no. 2, pp. 387-392, February 1985.
- [13] Q. T. Zhang, "Statistical Analysis of the Performance Information Theoretic Criteria in the Detection of the Number of Signals in Amy Processing," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. ASSP-37, no. 10, pp. 1557- 1567, October 1989.
- [14] P. Stoica and A. Nehorai, "Music, Maximum Likelihood and Cramer-Rao Bound: Further Results and Comparisons," In Proc. of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), vol. 4, pp. 2605-2608, 1989.
- [15] M. Wax, "Detection and Localization of Multiple Sources via the Stochastic Signals Model," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 39, no. 1, pp. 2450-2456, November 1991.
- [16] P. M. Djuric, "A Model Selection Rule for Sinusoids in White Gaussian Noise," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 44, no. 7, pp. 1744-1751, July 1996.
- [17] E. Fishler and H. Messer, "On the Use of Order Statistics for Improved Detection of Signals by the MDL Criterion," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 48, no. 8, pp. 2242-2247, August 2000.
- [18] L. Huang, T. Long, E. Mao, and H. C. So, "MMSE-Based MDL Method for Accurate Source Number Estimation," IEEE Signal Processing Letters, vol. 16, no. 9, pp. 798-801, September 2009.
- [19] L. Huang, T. Long, and E. Mao, "Robust Estimation of the Number of Sources Using an MMSE-Based MDL Method," In Proc. of the IET International Radar Conference, pp. 1-4, 2009.
- [20] F. Chu, J. Huang, M. Jiang, Q. Zhang, and T. Ma "Detecting the Number of Sources Using Modified EIT," In Proc. of the 4th IEEE Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. 563-566, 2009.
- [21] J. F. Cardoso, S. Bose, B. Friedlander, "On the Optimal Source Separation Based on Second and Fourth Order Cumulants," In Proc. of the 8th IEEE Signal Processing Workshop on General Topics for Engineers, 1996.
- [22] S. Shirvani Moghaddam, Z. Ebadi, and V. Tabataba Vakili, , "A Novel DOA Estimation Approach for Unknown Coherent Source Groups with Coherent Signals," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 11, no. 1, pp. 8-16, 2015.
- [23] Zhang, Y.F., Ye, Z.F., "Efficient Method of DOA Estimation for Uncorrelated and Coherent Signals", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 7, No. 1, pp. 799-802, 2008.
- [24] E. Gonen, J. B. M.C., and M. Dogan, "Applications of Cumulants to Array Processing: Part IV: Direction Finding in Coherent Signals Case," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 45, no. 9, pp. 2265-2276, September 1997.
- [25] S. Shirvani Moghaddam and A. Keshavarz Nasab, "A Threshold-based Jade-Music Algorithm for DOA Estimation of Unknown Signal Groups," Journal of

A Low-Complexity Setup for DOA Estimation of Coherent Signals of Unknown Sources Located at Endfire Angles

S. Shirvani Moghaddam*, A. Keshavarz Nasab

Shahid Rajaei Teacher Training University

(Received: 07/06/2015, Accepted: 13/03/2016)

Abstract

Estimating direction of arrival (DOA) is more complicated when unknown non-coherent sources contain coherent signals or when sources are coherent. Recently, a new method based on uniform linear array (ULA) has been proposed that first determines the number of non-coherent sources and then estimates the DOA of coherent signals in each group. ULA is more applicable for DOA estimation but for estimating DOAs close to the array endfire, this configuration does not perform well or signals may be missed. Cross array (CA) is a suggestion to solve this problem but it offers a lower performance for middle angles and introduces more computational complexity. As the main goal of this investigation, using the proposed threshold-based JADE-MUSIC algorithm, a new method is proposed which divides angles in two parts. For the angles which are in the range of $[-60^\circ, 60^\circ]$, horizontal elements of CA and for endfire angles and the angles which are in the range of $[-90^\circ, -60^\circ]$ and $[60^\circ, 90^\circ]$, vertical elements of CA are considered. Simulation results demonstrate that the new proposed scenario offers a higher performance for DOA estimation of narrowband signals with respect to ULA and CA configurations. Also, its computational load is the same as the case that uses ULA.

Keywords: ULA, CA, DOA estimation, EGM, FBSS, JADE-MUSIC algorithm.

* Corresponding author E-mail: sh_shirvani@srttu.edu