

جهت‌یابی منابع همبسته صوتی در حضور نوفه با همبستگی فضایی نامشخص

عباس اسدزاده^۱، سید محمد علوی^{۱*}، محمود کریمی^۲، هادی امیری^۳

۱. دانشکده مهندسی فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین علیه‌السلام

۲. دانشکده مخابرات و الکترونیک، دانشگاه شیراز

۳. دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه تهران

چکیده

در این مقاله یک روش جدید برای برآورد جهت‌های صوتی همبسته در محیط‌های نوفه‌ای با همبستگی فضایی نامشخص ارائه شده است. با تشکیل ماتریس از زیرفضای علامت به روش واهم‌نهادی مقادیر تکین (تجزیه مقادیر منفرد) هنکل، اطلاعات منابع همبسته از هر بردار ویژه استخراج می‌گردد. سپس، یک ساختار تواما قطری از مشخصات زیرفضای علامت تشکیل داده شده و از روی آن، پایه‌های مستقل خطی مربوط به منابع بازیابی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با دیگر روش‌های ارائه‌شده معمول، به‌خوبی قابلیت این الگوریتم را در نسبت‌های پایین علامت به نوفه و وجود منابع نزدیک به هم نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: صوتی، منابع همبسته، جهت‌یابی، ماتریس هنکل.

۱. مقدمه

خواهد شد. با فرض اینکه k علامت ناهمبسته در آرایه با M حسگر دریافت شوند ($K < M$)، ماتریس هم‌دوس (همبستگی) نمونه‌ها، مرتبه کامل خواهد بود. در واقع در ماتریس مقادیر ویژه، k مقدار بیشینه، معادل با زیرفضای علامت هستند و مابقی زیرفضای نوفه را تشکیل می‌دهند. در صورت معلوم‌بودن تعداد منابع و ناهمبسته‌بودن توأم منابع با یکدیگر و نیز در صورت وجود نوفه گوسی سفید افزودنی (نگ‌سا)^۳، عملکرد الگوریتم‌های بالا بسیار خوب است. اما کارایی بیش‌تر این روش‌ها در حالت وجود علامت‌های همبسته و هم‌چنین در حضور نوفه رنگی و نیز در نسبت‌های پایین علامت به نوفه ضعیف می‌شود. در بیش‌تر کاربردهای عملی، نظیر مخابرات سیار و صدای زیر آب^۴، موج ارسالی دستخوش پدیده چند مسیری خواهد شد. در نتیجه، گیرنده شاهد چند نمونه‌ی نیمه‌منطبق بر هم از یک علامت ارسالی است که از مسیرهای مختلف دریافت می‌شوند. هر علامت، تضعیف، تأخیر و جابجایی فاز متفاوتی را تجربه خواهد کرد که این امر منجر به دریافت علامت‌هایی همبسته با یکدیگر در آرایه خواهد

برآورد جهت ورود علامت یکی از مباحث مهم در پردازش علامت آرایه است و در زمینه‌های رادار، سونار، زلزله‌نگاری، مخابرات رادیویی و غیره به‌کار می‌رود [۱]. سه دسته‌بندی کلی برای برآورد زاویه ورود وجود دارند که به روش‌های کلاسیک، زیرفضا و روش‌های حداکثر درست‌نمایی تقسیم می‌گردد [۲]. هر یک از این روش‌های کلی نیز می‌توانند در دو حالت مختلف طیفی و پارامتری حل شوند. در روش‌های طیفی، طیف فضایی علامت محاسبه می‌شود و متناسب با زوایایی که طیف دارای حداکثر مقدار است، مسئله‌ی برآورد جهت حل می‌شود. در روش‌های پارامتری، الگویی از علامت دریافتی را به‌عنوان تابعی از جهت دریافت (جد) علامت در نظر گرفته و با تعریف یک تابع هزینه، پارامتر مجهول برآورد می‌شود [۳].

در بیش‌تر این روش‌ها، ماتریس هم‌دوس (همبستگی)^۲ علامت که حاصل ضرب نظیر به نظیر بردارهای خروجی علامت آرایه در مزدوج هم هستند؛ برای پردازش استفاده

* نویسنده پاسخگو: Malavi@ihu.ac.ir

¹ DOA; Direction of Arrival

² Coherence

³ AWGN; Additive White Gousson Noise

⁴ Under water

اگرچه این روش جدید و جالب است اما جنبه ریاضی دارد و این شرایط واقعی نیستند. در این مقاله، شرایط نزدیک به واقعیت، از نظر تعداد حسگرها و شرایط علامت به نوفه، در فرضیات حل مسئله به کار گرفته خواهند شد. در منبع [۱۲] یک روش جهت یابی برای آرایه های راداری معرفی شده است که تفاوت زیادی با شرایط حل این مقاله دارد اما اصول مشترکی در روابط پایه ای وجود دارند که قابل استفاده هستند. در منبع [۱۳] روش جهت یابی مقاوم در شرایط منابع مستقل و همبسته براساس بردارهای ویژه علامت معرفی شده است که بسیار موثر و عملی است و ایده آن برای مقابله منابع همبسته مورد به کارگیری است. اما ایده، در این مقاله شرایط نوفه سفید در نظر گرفته شده اند حال آنکه قرار است موضوع در حضور نوفه همبسته بررسی شود. در منبع [۱۴] نوعی پردازش ماتریس داده معرفی شده است که می تواند اثر منابع همبسته را روی داده ها کاهش دهد و بنابراین مسئله جهت یابی راحت تر حل گردد. این ایده هم مهم و قابل استفاده است اما در مقاله حاضر این ایده بهبود یافته و به جای داده ها از بردارهای ویژه در این ساختار استفاده خواهد شد. در منبع [۱۵] مسئله جهت یابی بدون نیاز به دانستن تعداد اهداف و در حضور نوفه همبسته فضایی حل شده است که نزدیک به کار این مقاله است. در منبع [۱۵] با استفاده از کومولان^۸ مرتبه بالای علامت به مقابله با همبستگی علامت و نوفه پرداخته شده است اما، حل مقاله حاضر از روش ابداعی و بدون نیاز به کومولان مرتبه بالای علامت صورت گرفته است و در شبیه سازی ها نتایج حاصله با منبع [۱۵] مقایسه شده اند.

۲. الگو و مشخصات کلی مسئله

با فرض دریافت نمونه زمانی علامت از طریق یک آرایه خطی با M حسگر، علامت دریافتی در آرایه در نمونه t -ام به صورت $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ است که عملگر T تران هاده است. تعداد حسگرهای آرایه عددی فرد است و حسگر مبنا جهت محاسبه اختلاف فازها،

شد. با وجود همبستگی بین علامت ها، تعداد منابع برآورد شده براساس مقادیر ویژه و در نتیجه کارایی الگوریتم های مبتنی بر زیرفضا نظیر میوزیک^۱ و اسپریت^۲ کاهش می یابد. در این حالت، ماتریس هم دوس (همبستگی) دارای مرتبه کامل نبوده و این امر منجر به ایجاد خطای برآورد خواهد شد. در کل، برای برآورد درست جهت منابع در حالت همبستگی، ابتدا باید فرآیند کاهش همبستگی انجام شود. برای این کار، روش های مختلفی نظیر هموارسازی فضایی و روش هایی با رویکرد تقلیلی ارائه شده است [۴-۵]. در روش هموارسازی فضایی، با ایجاد چند زیرآرایه ای دارای هم پوشانی و با به دست آوردن میانگین ماتریس هم دوس (همبستگی) از همه زیرآرایه های رو به جلو و رو به عقب، مرتبه ماتریس هم دوس (همبستگی)، کامل می گردد [۶-۷]. حضور نوفه با همبستگی فضایی یکی از الگوهای رایج در مخابرات زیر آب است [۸-۹].

در منبع [۱۰]، الگوریتم ۲کیو-میوزیک^۳، پیشنهاد شده است که بسط روش میوزیک براساس آمارگان مرتبه ۲کیو-ام داده است. این روش نیز در حضور نوفه گوسی با همبستگی فضایی نامشخص به صورت مجانبی مقاوم بوده و تعداد علامت های بیش تری را نسبت به روش های قبل برآورد می نماید؛ اما پیچیدگی محاسباتی آن، نسبتاً زیاد است.

در منبع [۱۰] مسئله جهت یابی برای علامت خاص مخابراتی کیوپی ای کی^۴ در دو حالت دون-معین^۵ و فوق-معین^۶ و برای آرایه خطی و دایره ای حل شده است ولی این مقاله مسئله را در شرایط اهداف سوناری در نظر گرفته است. در منبع [۱۱] حل مسئله جهت یابی با روش تنک^۷ انجام شده و ادعای جهت یابی با یک نمونه زمانی از علامت منبع را دارد. شبیه سازی انجام شده با حداقل ۴۰ عدد حسگر و در علامت به نوفه ۲۰ دسی بل می باشند.

¹ MUSIC; Multiple Signal Classification

² ESPRIT; Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques

³ 2q-Music

⁴ QPSK; Quadrature Phase- Shift Keying

⁵ Under-determined

⁶ Over-determined

⁷ Sparse

⁸ Cumulant

شکل برداری، علامت دریافتی را می توان به صورت رابطه ۵ نوشت [۱۱]:

$$X(t) = AS(t) + n(t), \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

که N ، طول قاب (فریم) زمانی علامت و D ماتریس پاسخ آرایه^۱ است که براساس بردار هدایت^۲ $a(\theta_k)$ به صورت رابطه ۶ مشخص می شود.

$$D = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_L)] \quad (6)$$

از علامت دریافتی $X(t)$ ، می توان تابع خود همبستگی را به صورت رابطه زیر تعریف نمود.

$$R_{xx} = E\{x(t)x^H(t)\} = DPD^H + \delta_{t_1, t_2} R_M \quad (7)$$

که در آن E نماد امید ریاضی از علامت است. به ماتریس P ، ماتریس همدوس یا ماتریس توان علامت و به ماتریس D ، ماتریس نگاه آرایه می گویند. در ماتریس P ، مقادیر روی قطر اصلی آن، خودهمبستگی علامت بوده و میانگین توان علامت منابع است و مقادیر غیر-قطری^۳، همبستگی-متقابل^۴ بین علامت های مختلف است.

اگر علامت منابع ناهمبسته باشند ماتریس همدوس (همبستگی) قطری و مرتبه کامل^۵ می شود. اگر علامت به طور جزئی همبسته باشد، ماتریس همدوس آن غیر-قطری است اما همچنان نامنفرد باقی می ماند. اگر علامت به طور کامل همبسته باشد، ماتریس همدوس (همبستگی) آن، هم غیر-قطری و هم تکین (منفرد) می شود [۱۲]. عموماً در کاربردهای عملی تابع چگالی احتمال^۶ علامت در دسترس نیست. بنابراین، در نمونه های محدود داده از علامت دریافتی، تابع خود همبستگی را می توان به صورت تقریبی با رابطه ۸ تعریف نمود.

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x(t)x^H(t) = \overline{E\Lambda E} \quad (8)$$

که در آن، T تعداد نمونه های زمانی علامت است و ماتریس R ماتریس هرمیتی با ابعاد $M \times M$ می باشد. در بیش تر کاربردهای برآورد زاویه، از ماتریس همدوس

حسگر میانی آرایه در نظر گرفته شده است. هم چنین، فرض می شود L منبع علامت میدان دور باند باریک $S_i(k)$ در زوایای θ_i نسبت به یک آرایه ی حسگری قرار دارند؛ که به تعداد K علامت طبق رابطه ۱ با یکدیگر همبسته اند و مابقی مستقل از این علامت ها و ناهمبسته از یکدیگرند.

$$S_k(t) = \beta_k e^{j\delta f_k} S_1(t), \quad k = 2, \dots, K \quad (1)$$

بنابراین، علامت دریافتی در حسگر m -ام در نمونه ی زمانی t -ام به صورت روابط ۲ و ۳ است.

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^L S_i(t) e^{-j2\pi m \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_i)} + n_m(t) \quad (2)$$

$$S_i(t) = \begin{cases} \beta_i S_1(t), & i = 2, \dots, K, \quad K < L \\ \beta_i S_i(t), & i = K + 1, \dots, L \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه ۲ نمادهای d ، λ و n_m به ترتیب فاصله دو عنصر مجاور آرایه، طول موج ارسالی و نوفه جمع شونده در حسگر m -ام است. فرض می شود که نوفه حسگر، یک نوفه گوسی با میانگین صفر و دارای همبستگی فضایی نامشخص مطابق رابطه ۴ است.

$$E[n(t_1)n^H(t_2)] = \delta_{t_1, t_2} R_M, \quad \delta_{t_1, t_2} = \begin{cases} 0, & t_1 \neq t_2 \\ 1, & t_1 = t_2 \end{cases} \quad (4)$$

به طوری که R_M ماتریس همدوس (همبستگی) نوفه است و آن یک ماتریس هرمیتی معین مثبت با ابعاد $M \times M$ است. فرض اینکه یک گروه منبع همبسته وجود دارد و بقیه ناهمبسته هستند؛ به خاطر این است که اصولاً الگوریتم های جهت یابی، منابع و گروه های ناهمبسته از هم راه، با دقت خوبی برآورد می کنند. بنابراین، بیش تر محدودیت الگوریتم ها در جداسازی علامت هایی است که در یک گروه، ماهیت علامتی همبسته دارند. در واقع در اثر پدیده ی چند مسیری، ممکن است علامت یکی از منابع، از زوایای مختلف انعکاس یابد و این علامت های بازتابده با تضعیف ها و تأخیرهای متفاوت به آرایه برسند. بنابراین، در آرایه، با یک گروه از علامت هایی مواجه هستیم که ماهیت علامتی مشابه دارند ولی از زوایای مختلف دریافت گردیده اند و با هم ترکیب شده اند. فرض میدان دور بودن به خاطر این است که می توان علامت دریافتی در آرایه را به صورت موج صفحه ای الگو نمود. در

¹ Array response

² Steering vector

³ Non-diagonal

⁴ Cross-correlation

⁵ Full rank

⁶ PDF; Probability Density Function

جداگانه یک فرآیند کاهش همبستگی صورت گیرد؛ آنگاه می توان منابع همبسته را از هم تفکیک نمود. با توجه به رابطه Y که در آن ماتریس R_M ماتریس همبستگی فضایی نوفه است، هر بردار ویژه حاوی اطلاعاتی از یک یا چند منبع همبسته است. بنابراین در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا بردارهای ویژه‌ی مربوط زیرفضای علامت را انتخاب می‌نماییم و با بازآرایش هر یک از این بردارهای ویژه، از یک ساختار $[e_1, \dots, e_M]^T$ با ابعاد $M \times 1$ که عنصر (المان) m -ام آن به صورت $c_p(m) = \sum_{p=1}^D c_p \beta_p^{m-1}$ و $\beta_1^{m-1} = e^{j\pi(m-1)\sin\theta_1}$ است؛ یک ماتریس جدید هنکل Y را به صورت رابطه ۹ تشکیل می‌دهیم [۱۴].

$$Y = \begin{bmatrix} e_1 & e_r & \dots & e_p \\ e_r & e_r & \dots & e_{p+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_m & e_{m+1} & \dots & e_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه ۹، ماتریس Y ، یک ماتریس با ابعاد $m \times (M - m + 1)$ است. در ادامه، طبق رابطه‌ی $Y_1 = Y Y^H$ ، ماتریس Y_1 با ابعاد $M \times M$ را تشکیل داده و فرآیند میانگین‌گیری جلورو-عقب‌رو (رو به جلو و رو به عقب) Y_1 را برای آن پیاده‌سازی می‌نماییم

$$Y_1 = \frac{1}{2} (Y_1 + J_{m_1} \text{conj}(Y_1) J_{m_1}^H)$$

گفت که هر بردار ویژه را به‌طور مجزا وارد فرآیند کاهش همبستگی کرده و همبستگی بین‌علامت‌های موجود در یک گروه را کم‌تر نموده‌ایم. با تجزیه‌ی برداری از ماتریس Y_1 براساس فن واهم‌نهادی (تجزیه) مقدار تکین (منفرد) λ_i ، زیرفضای جدیدی به‌دست می‌آید که حاوی اطلاعات بیش‌تری نسبت به حالت قبل است؛ زیرا از یک بردار ویژه یک یا چند بردار ویژه‌ی جدید استخراج می‌گردد. در ادامه، بردارهای ویژه‌ی علامت مربوط به ماتریس Y_1 را که از هر بردار ویژه اولیه استخراج شده‌اند، در ستون‌های مجاور کنار هم قرار می‌دهیم تا ماتریس

نمونه‌ها، تجزیه‌ی بردار ویژه انجام می‌پذیرد ماتریس همبسته M مقصدار ویژه $\Lambda = \text{diag}([\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M])$ و متناظر با آن، M بردار ویژه $\bar{E} = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \dots, \bar{e}_M)$ دارد. بردارهای ویژه \bar{e}_i که مربوط به مقادیر ویژه مجزا از هم هستند؛ نسبت به یکدیگر مستقل خطی‌اند^۱. در صورت وجود k علامت ناهمبسته، مرتبه ماتریس R برابر k می‌شود. اگر مقادیر ویژه را از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین مقدار مرتب کنیم؛ آنگاه می‌توانیم ماتریس \bar{E} را به دو زیرفضا \bar{E}_N و \bar{E}_S تقسیم کنیم. زیرفضای اول \bar{E}_N متناظر با $M-k$ مقدار ویژه کوچک‌تر و زیرفضای دوم \bar{E}_S متناظر با k مقدار ویژه بزرگ‌تر است. در این صورت، $M-k$ راه‌حل مستقل، برای معادله همگن که دارای شکل $\text{Re}_i = 0$ است؛ وجود دارند. به‌علاوه، تحت شرایط تعامد می‌توان نشان داد که برای هر کدام از زوایای ورود $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$ ، فاصله‌ی هندسه‌ی $d^2 = a^H(\theta) \bar{E}_N \bar{E}_N^H a(\theta) = 0$ برقرار است. الگوریتم میوزیک بر این اساس که بردارهای ویژه زیرفضای نوفه، بر بردارهای هدایت آرایه $a(\theta_i)$ عموداند؛ برآورد زاویه انجام می‌دهد.

۳. الگوریتم پیشنهادی

براساس آنچه بیان شد، کارایی الگوریتم‌های زیرفضا شدیداً به تعامد زیرفضای علامت و نوفه وابسته است. به‌بیان دیگر، در حالت همبسته‌بودن، تجزیه‌ی بردارهای ویژه به دو زیرفضای علامت و نوفه، به خاطر عدم تعامد این دو زیرفضا، مشکل است. در صورت وجود همبستگی بین منابع، امکان دارد بردار جهت چند علامت با یکدیگر ترکیب شده و در یک بردار ویژه مولفه داشته باشند. ایده اصلی این مقاله بر این اصل استوار است که بردارهای ویژه علامت ترکیب خطی بردارهای جهت منابع همبسته هستند [۱۳]. بنابراین، اگر برای هر بردار ویژه به‌طور

² Hankel-SVD

³ Forward-backward averaging

⁴ SVD; Singular Value Decomposition

¹ Linearly independent

متداول این حوزه است. این روش، در شرایط مناسب، منابع همبسته در محیط نوفه‌ای با نوفه دارای همبستگی فضایی نامشخص را بدون نیاز به کومولان مرتبه بالا، برآورد می‌کند. این برآورد گرچه در مقادیر پایین نسبت علامت به نوفه، جواب خوبی نمی‌دهد؛ اما در بسیاری از موارد، دارای جواب‌های قابل قیاس با آن‌ها است. روش ارائه شده در این مقاله نیز از این ویژگی برخوردار بوده و می‌تواند با استفاده از تحلیل زیرفضای علامت، بردارهای مستقل خطی را بدون استفاده از کومولان برآورد کند.

۴. شبیه‌سازی و ارزیابی

در اولین شبیه‌سازی یک آرایه خطی همه جهته با هفت عنصر که فاصله بین دو عنصر مجاور هم، نصف طول موج است؛ مورد بررسی قرار گرفت. نوفه پس‌زمینه افزوده شده نیز نوفه گوسی مختلط با متوسط صفر است که ماتریس همدوس آن در عنصرهای (k, l) ، براساس الگویی که در منبع [۱۶] و [۱۷] بیان شده است، به صورت زیر است.

$$R_m(k, l) = \sigma_n^2 \gamma^{|k-l|} e^{j\pi(k-l)/2} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، σ_n^2 واریانس نوفه است که به نسبت علامت نوفه (ن‌ع‌ن) (اس‌ان‌آر)^۲ وابسته می‌باشد و γ ضریب همبستگی فضایی نوفه در عنصرهای مختلف است که مقدار صفر برای آن، معادل وجود نوفه گوسی سفید و مقدار زیاد آن معادل وجود همبستگی بالا بین نوفه است. در همه شبیه‌سازی‌ها علامت‌های منابع، علامت‌هایی باند باریک صفحه‌ای و هم‌توان هستند و نسبت علامت به نوفه، به صورت نسبت توان همه علامت‌ها، به توان نوفه هر حسگر تعریف شده است. تعداد داده در هر قاب (فریم) زمانی برابر با ۲۰۰ نمونه در نظر گرفته شده است. کارایی الگوریتم پیشنهادی با روش‌های میوزیک [۱۸]، اف‌بی‌اس‌اس [۷]، اس‌وی‌دی‌آی^۳ [۱۹]، جی‌دی‌تی‌اف‌آسی^۴ [۱۵] و اف‌آسی^۵ [۱۶] مقایسه شده است. مبنای مقایسه نیز حداقل واریانس خطا (آرام‌اس‌ای)^۶، احتمال تفکیک

بردارهای ویژه نهایی به دست آید. از روی آن ماتریس بازیابی شده $R_{rec} = \tilde{E}_s \tilde{\Lambda} \tilde{E}_s^H$ را (ماتریس \tilde{E}_s ماتریس بردارهای ویژه جدید و $\tilde{\Lambda}$ نیز ماتریس قطری متناظر با مقادیر ویژه جدید می‌باشند) جایگزین ماتریس همدوس نمونه‌ها خواهیم نمود. از آنجایی که، بردارهای ویژه مربوط به زیرفضای علامت که در مرحله‌ی بعد از فرآیند کاهش همبستگی به دست می‌آیند، مستقل خطی‌اند؛ لذا با در کنار هم قرار گرفتن بردارهای ویژه استخراج شده، تعداد بردارهای مستقل خطی افزایش می‌یابد. در ادامه، با توجه به اینکه بردارهای ویژه علامت، ترکیب خطی بردارهای جهت منابع هستند؛ مسئله برآورد زوایا را با تعریف یک تابع هزینه و حل آن ادامه می‌دهیم. بعد از انجام فرآیند کاهش همبستگی، بردارهای ویژه جدید معادل بردارهای ویژه یک ماتریس همدوس حاصل از منابع ناهمبسته هستند. برای هر بردار ویژه علامت می‌توان نوشت [۱۳]:

$$e_k = \sum_{i=1}^L c_{k,i} d_i = \sum_{i=1}^L c_{k,i} e^{j\pi d [1, \nu, \dots, m-1]^T \sin(\theta_i)} \quad (10)$$

که در آن ضریب $c_{k,i}$ به صورت رابطه ۱۱ است:

$$c_{k,i} = \frac{p_i d_i^H e_k}{(\lambda_i - \sigma_n^2)} \quad (11)$$

و این یعنی بردار ویژه k -ام، ترکیب خطی L تا بردار جهت مربوط به L تا منبع است. بنابراین، ماتریس R_{rec} به فرم رابطه ۱۲ است:

$$R_{rec} = DC_k D^H, \quad C_k = \text{diag}\{C_{k,1}, C_{k,2}, \dots, C_{k,L}\} \quad (12)$$

رابطه ۱۲ مشابه ماتریس بازیابی شده در منبع [۱۵] است. بنابراین، براساس روش حل ارائه شده در آن، می‌توان طیف فضایی علامت را محاسبه نمود. جهت اختصار، از ارائه حل خودداری نموده و روش حل به منبع [۱۵] ارجاع داده می‌شود. در واقع، ایده اصلی این مقاله ارائه یک روش جدید برای انجام فرآیند کاهش همبستگی و پیدا کردن ماتریس همدوس بهبود یافته است. یکی از ویژگی‌های الگوریتم هموارسازی فضایی جلوسو-عقب‌سو (رو به جلو-رو به عقب) (اف‌بی‌اس‌اس)^۱ در مقایسه با الگوریتم‌های

² SNR; Signal Noise Ratio

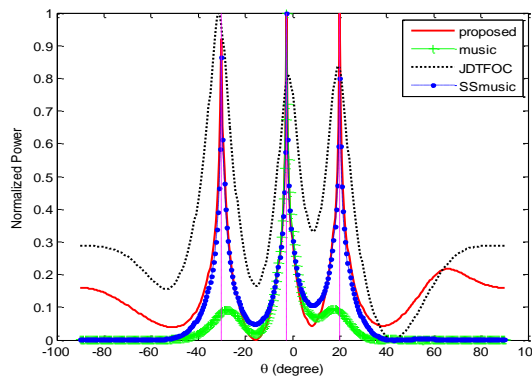
³ SVDOA; Singular Value Decomposition Direction of Arrival

⁴ JDFTOC; Joint-Diagonalization Toeplitz Fourth-Order Cumulant

⁵ FOC; Fourth-Order Cumulant

⁶ RMSE; Root Mean Square Error

¹ FBSS; Forward-Backward Spatial Smoothing



شکل ۱ نمایش طیف توان هنجاریده در برآورد زوایای منابع همبسته در حضور نوفه سفید.

شکل ۲ نتیجه شبیه سازی چهار علامت را با زوایای ۹-، ۲، ۲۰ و ۳۵ درجه و در آرایه ای با ۹ حسگر و در نسبت علامت به نوفه ۵- دسی بل نشان می دهد. نوفه گوسی با ضریب همبستگی فضایی $\gamma=0.9$ فرض شده است. علامت های اول و چهارم در یک گروه و دو علامت دوم و سوم نیز در گروه دیگر با هم همبسته اند و هر گروه از گروه دیگر ناهمبسته فرض شده است. مطابق شکل ۲، الگوریتم پیشنهادی در نسبت های پایین علامت به نوفه نیز جواب های خوبی را ارائه می کند و همه زوایا را با دقت خوبی پیدا می کند. الگوریتم میوزیک در این حالت دارای دو قله غالب است که تنها یکی از آن ها مطابق با زاویه درست (۳۵ درجه) است. الگوریتم میوزیک هموارسازی شده^۴ همانند الگوریتم پیشنهادی دارای چهار قله است اما با توجه به شکل ۲، بایاس^۵ برآورد آن زیاد است. کارایی الگوریتم جی دی تی اف اسی^۶ در این حالت کاهش می یابد زیرا عملکرد این الگوریتم برای برآورد چهار منبع که به نسبت نزدیک به هم هستند، کاهش می یابد. البته الگوریتم پیشنهادی توانسته است دو منبع با فاصله زاویه ای ۱۱ درجه را در شرایط همبسته از هم تمییز دهد و جهت آن ها را مشخص نماید.

علت برتری الگوریتم پیشنهادی در سناریوی شکل ۲ قابلیت تشخیص صحیح زاویه چهار هدف هم زمان که دو مورد آن ها نزدیک به هم هستند، می باشد و این در

پی آر^۱ منابع و زمان (پیچیدگی) محاسباتی^۲ حل در نظر گرفته شده است. تعداد تکرار مونت کارلو برای به دست آوردن مقدار آرام سازی برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده و این مقدار با رابطه ۱۴ محاسبه می گردد [۶].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{LK} \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^L (\bar{\theta}_{i,l} - \theta_i)} \quad (14)$$

که در رابطه ۱۴، $L=1000$ تعداد تکرار مونت کارلو و K تعداد علامت منابع است. برای برآورد گروه ناهمبسته منابع در الگوریتم اسی دی ای از روش انقباض خطی اسی دی ال^۳ که در منبع [۲۰] بیان گردیده استفاده شده است. تعداد زیر آرایه در الگوریتم اسی دی ای یک واحد از تعداد حسگرها کم تر است.

شکل ۱ نتیجه شبیه سازی سه علامت مختلف که در دو گروه ناهمبسته تعریف شده اند را نشان می دهد. علامت سوم انعکاس علامت اول بوده و با یکدیگر همبسته اند و علامت دوم ناهمبسته از آن دو است. مقدار نسبت علامت به نوفه برابر با ۱۰ دسی بل در نظر گرفته شده است. شکل ۱ طیف توان هنجاریده (نرمالیزه) را برای سه علامت با زوایای ۲۰ درجه، ۲- درجه و ۳۰- درجه و در حالت وجود نوفه گوسی سفید (با ضریب همبستگی $\gamma=0$) نشان می دهد. مطابق این شکل، الگوریتم پیشنهادی در زوایای وجود علامت دارای قله مناسب است. در این حالت کارایی الگوریتم میوزیک معمولی، به خاطر وجود همبستگی بین علامت های منابع، کاهش می یابد و این الگوریتم تنها منبع مستقل را تشخیص داده است.

در شکل ۱ برتری زیادی بین الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم های دیگر وجود ندارد جز اینکه منحنی در الگوریتم پیشنهادی و در محل قرارگیری منابع تیزتر از بقیه الگوریتم هاست. این به معنای دقت زاویه یابی بهتر در روش پیشنهادی نسبت به روش های مقایسه شده است. این سناریو برای تأیید شبیه سازی و نشان دادن صحت عملکرد الگوریتم ها، در شرایط ساده ای چون عدم وجود نوفه همبسته، اجرا شده است. در ادامه، شبیه سازی ها در شرایط پیچیده تر انجام شده اند.

⁴ SSMUSIC; Spital Smoothing Multiple Signal Classification

⁵ Bias

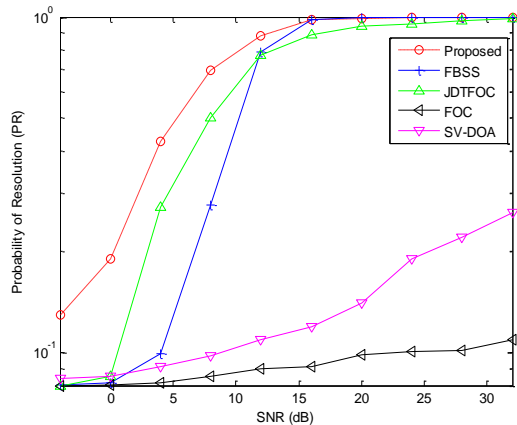
⁶ GDTFOC

¹ PR; Probability of Resolution

² Computational time

³ Linear Shrinkage MDL

الگوریتم پیشنهادی در تمامی مقادیر علامت به نوفه جواب قابل قبولی ارائه می‌دهد. در مقدار علامت به نوفه‌های بالاتر کارایی الگوریتم پیشنهادی از نظر احتمال تفکیک منابع (پی‌آر) با کارایی الگوریتم (اف‌بی‌اس‌اس) یکسان می‌گردد.



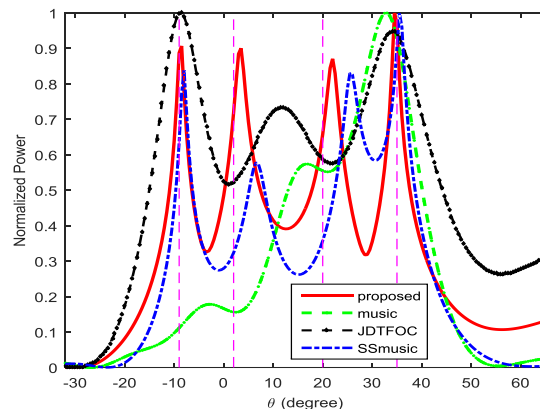
شکل ۳ نمودار احتمال تفکیک درست (پی‌آر) به صورت تابعی از اِس‌اِن‌آر.

عامل برتری الگوریتم پیشنهادی در سناریوی شکل ۳ تشخیص صحیح همه زوایای ذکر شده در این سناریو است. البته این پارامتر با تغییر نسبت علامت به نوفه تغییر می‌کند در واقع شکل ۳ نشان می‌دهد همیشه احتمال تشخیص صحیح زاویه چند هدف هم‌زمان دریایی در الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم‌های مقایسه شده است. این برتری تا نسبت علامت به نوفه ۲۰ دسی‌بل ادامه دارد. به‌عنوان مثال در نسبت علامت به نوفه صفر دسی‌بل احتمال تشخیص صحیح همه زوایای ذکر شده در سناریو توسط الگوریتم ۲۰ درصد است در حالی که این مقدار برای همه الگوریتم‌های دیگر کم‌تر از ۰٫۰۵ درصد است.

۲-۴ بررسی آرام‌اس‌ایی و پیچیدگی محاسباتی به صورت تابعی از نمونه‌های زمانی

در این سناریو کارایی الگوریتم پیشنهادی به ازای تعداد نمونه‌های زمانی علامت با دیگر الگوریتم‌ها مقایسه شده‌اند. در شبیه‌سازی مقدار علامت به نوفه برابر با ۱۰ دسی‌بل در نظر گرفته شده است و پارامترهای دیگر مانند شبیه‌سازی قبل انتخاب شده‌اند. تعداد نمونه‌های زمانی در نه گام از ۲۰۰ نمونه تا ۱۰۰۰ نمونه در نظر گرفته شده

شرایطی است که نوفه همبسته زیادی در گیرنده وجود دارد و علامت اهداف بسیار ضعیف است و می‌تواند به معنای فاصله زیاد اهداف از گیرنده باشد. در این سناریو، علامت اهداف همبسته فرض شده است که تداعی‌کننده اهداف سوناری است. در شکل ۲ واضح است که هیچ کدام از الگوریتم‌های رقیب قابلیت الگوریتم پیشنهادی را ندارند.



شکل ۲ نمایش طیف توان هنجاریافته در برآورد زوایا در مقدار نسبت علامت به نوفه ۵- دسی‌بل و در حضور نوفه رنگی با $\gamma=0.9$.

۴-۱ بررسی آرام‌اس‌ایی و احتمال تفکیک با تغییر نسبت علامت به نوفه

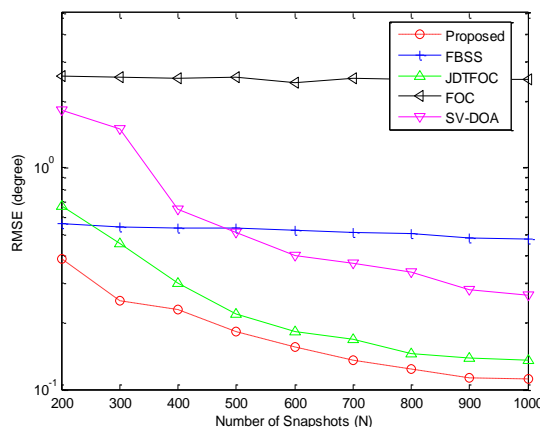
در ادامه، عملکرد روش پیشنهادی را علاوه بر روش‌های قبلی با دیگر روش‌ها، نظیر اِس‌وی‌دی‌اِی [۲۱] و روش اِف‌اِسی [۱۰] مقایسه می‌نماییم. معیار مقایسه به‌صورت تابعی از نسبت علامت به نوفه و براساس مقدار حداقل مجذور میانگین خطا و احتمال تفکیک (رزولوشن) در نظر گرفته شده است. در این قسمت آرایه دارای ۷ عنصر بوده و تعداد نمونه‌ها برابر با ۴۰۰ نمونه در نظر گرفته شده‌اند. در این آزمایش دو گروه ناهمبسته علامت وجود دارند که در گروه اول، دو علامت همبسته به زوایای ۲۵- درجه و ۱۴ درجه و در گروه دوم نیز دو علامت همبسته دارای زوایای ۸ درجه و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب، حداقل فاصله زوایا برای دو علامت ناهمبسته برابر با ۶ درجه و در حالت همبسته برابر با ۲۲ درجه است. مقدار علامت به نوفه نیز در ۱۰ بازه زمانی از ۴- تا ۳۲ دسی‌بل در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نمودار احتمال تفکیک (رزولوشن) را برای روش‌های مختلف به ازای تغییرات اِس‌اِن‌آر نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳

همدوس، ماتریس ابداعی تشکیل می‌شود که اطلاعات زوایا را در خود دارد. سپس، براساس این ماتریس یک تابع هزینه تعریف شده و مسئله برآورد جهت، بدون نیاز به اطلاعاتی از تعداد منابع حل می‌گردد. روش ارائه‌شده در این مقاله قادر است جهت منابع همبسته در محیط نوفه‌ای با نوفه دارای همبستگی فضایی نامشخص را با دقت خوبی برآورد کند. روش‌های پردازشی دقیق در این حوزه، نیاز به دانستن سمت اولیه از اهداف هستند در حالی که این الگوریتم برای برآورد جهت، نیاز به دانستن تعداد منابع ندارد. کارایی این الگوریتم با چند الگوریتم متداول بررسی گردید و نتایج شبیه‌سازی قابلیت این الگوریتم را به لحاظ قدرت تفکیک زاویه‌ای در علامت به نوفه‌های پایین در مقایسه با الگوریتم‌های میوزیک، میوزیک هموارسازی شده و جی‌دی‌تی‌اف‌آسی به اثبات رسانده است. علت برتری روش پیشنهادی به روش‌های مدعی جهت‌یابی هم‌زمان اهداف سوناری (منابع همبسته)، پایداری عملکرد و دقت بالای این روش در شرایط اهداف نزدیک به هم، نوفه زیاد و همبسته (فاصله دور اهداف) و زمان مشاهده کوتاه از علامت اهداف است.

۶. فهرست منابع

- [1] B. Porat, B. Friedlander, "Direction finding algorithms based on high-order statistics," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 39, no. 9, pp. 2016-2024, 1991.
- [2] J.C. Liberti, T.S. Rappaport, "Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications," Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] H. Krim, M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: The parametric approach," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, 1996.
- [4] T.J. Shan, M. Wax, T. Kailath, "On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 33, no. 4, pp. 806-811, 1985.
- [5] X. Xu, Z. Ye, Y. Zhang, C. Chang, "A deflation approach to direction of arrival estimation for symmetric uniform linear array," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, 2006.
- [6] P. Zhao, W. Si, G. Hu, L. Wang, "DOA estimation for a mixture of uncorrelated and coherent sources based on hierarchical

است. مقایسه نمودارها در شکل ۴ نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی بخصوص در نمونه‌های زمانی کم‌تر از ۴۰۰ نمونه در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها با خطای کم‌تری عملیات جهت‌یابی را انجام می‌دهد.



شکل ۴ نمودار آرم‌اس‌ای برای روش‌های مختلف به صورت تابعی از نمونه‌های زمانی.

برتری الگوریتم پیشنهادی در سناریوی شکل ۴ نسبت به الگوریتم‌های مورد قیاس، زاویه‌یابی اهداف سوناری با خطای کم‌تر و با تعداد نمونه‌های مختلف علامت آن‌ها می‌باشد. یعنی، اگر علامت اهداف سوناری در یک مدت زمان کوتاه به گیرنده برسد الگوریتم پیشنهادی می‌تواند با کم‌ترین خطا نسبت به الگوریتم‌های روز دنیا زاویه آن‌ها را تشخیص دهد. هرچه مدت زمان دریافت علامت اهداف توسط گیرنده بیش‌تر باشد دقت جهت‌یابی بالا رفته (خطای جهت‌یابی کم‌تر می‌شود) و همواره از همه روش‌های ذکر شده دقیق‌تر است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدید برآورد جهت منابع همبسته در حضور نوفه با همبستگی فضایی ارائه شده است. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا برای هر بردار ویژه علامت، فرآیند نا-همبسته‌سازی^۱ به صورت مجزا انجام می‌شود و براساس ساختار قطری‌سازی توأم^۲، به جای ماتریس

¹ De-correlation

² Joint-diagonalization

- MAP approach and its implementation," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 40, no. 8, pp. 2007-2017, 1992.
- [18] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, 1986.
- [19] N. Yuen, B. Friedlander, "DOA estimation in multipath: An approach using fourth-order cumulants," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 45, no. 5, pp. 1253-1263, 1997.
- [20] L. Huang, H.C. So, "Source enumeration via mdl criterion based on linear shrinkage estimation of noise subspace covariance matrix," IEEE Transactions Signal Processing, vol. 61, no. 19, pp. 4806-4821, 2013.
- [21] M. Wax, T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 33, no. 2, pp. 387-392, 1985.
- sparse bayesian inference with a gauss-exp-chi2 prior," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2018, 2018.
- [7] S.U. Pillai, B.H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, no. 1, pp. 8-15, 1989.
- [8] T. Li, A. Nehorai, "Maximum likelihood direction finding in spatially colored noise fields using sparse sensor arrays," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 3, pp. 1048-1062, 2011.
- [9] S. Bourennane, C. Fossati, J. Marot, "Localization of narrow-band sources in unknown spatially correlated noise," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2010, pp. 72, 2010.
- [10] P. Chevalier, A. Ferréol, L. Albera, "High-resolution direction finding from higher order statistics: The 2 rmq -MUSIC algorithm," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 54, no. 8, pp. 2986-2997, 2006.
- [11] M.N. Tabassum, E. Ollila, "Sequential adaptive elastic net approach for single-snapshot source localization," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 143, no.6, 2018.
- [12] L. Li, "Root-MUSIC-based direction-finding and polarization estimation using diversely polarized possibly collocated antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 3, no. 1, pp. 129-132, 2004.
- [13] P. Totorong, A. El-Jaroudi, "Robust high-resolution direction-of-arrival estimation via signal eigenvector domain," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 18, no. 4, pp. 491-499, 1993.
- [14] G. Shi-Wei, B. Zheng, "Data-based matrix decomposition technique for high-resolution array processing of coherent signals," Electronics Letters, vol. 23, no. 12, pp. 643-645, 1987.
- [15] C. Qian, L. Huang, Y. Xiao, H.C. So, "Localization of coherent signals without source number knowledge in unknown spatially correlated Gaussian noise," Signal Processing, vol. 111, pp. 170-178, 2015.
- [16] W.J. Zeng, X.L. Li, X.D. Zhang, "Direction-of-arrival estimation based on the joint diagonalization structure of multiple fourth-order cumulant matrices," IEEE Signal Processing Letters, vol. 16, no. 3, pp. 164-167, 2009.
- [17] K.M. Wong, J.P. Reilly, Q. Wu, S. Qiao, "Estimation of the directions of arrival of signals in unknown correlated noise. I. The

Acoustic correlated sources direction finding in the presence of unknown spatial correlation noise

A. Asadzadeh¹, S.M. Alavi^{*1}, M. Karimi², H. Amiri³

1. Faculty of Information and Communication Technology, Imam Hossein Comprehensive University

2. Faculty of Electronics and Telecommunication, Shiraz University

3. Faculty of Engineering Sciences, Tehran University

Abstract

In this paper, a new method is proposed for DOA estimation of correlated acoustic signals, in the presence of unknown spatial correlation noise. By generating a matrix from the signal subspace with the Hankel-SVD method, the correlated resource information is extracted from each eigenvector. Then a joint-diagonalization structure is constructed of the signal subspace and basis it, independent linear component, related to sources are recovered. Simulation results and comparisons with other commonly presented methods show the capability of this algorithm in low signal-to-noise ratio and close sources.

Keywords: Acoustic, Correlated sources, Direction finding, Hankel matrix.

pp. 1-9 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: Malavi@ihu.ac.ir