Archive of SID

نشریه علمی"پدافند الکترونیکی و سایبری"
سال هفتم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، ص ۳۶-۲۷

شکل‌دهی پرتو مقاوم در برابر خطای تخمین زاویه ورود سیگنال اخلال

سید مهدی حسینی اندارگلی[1*]، حبیب‌الله ذبیحی[2]
۱- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیراوانی بابل، ۲- کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی آریان بابل

(دریافت: ۹۷/۰۲/۳۰، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۴)

چکیده

یکی از راه‌های مقابله با اثر اخلالگرها مخصوصاً اخلالگرهای داخل باند، استفاده از شکل‌دهی پرتو در سامانه‌های چندآنتنه است. در این روش بر اساس اطلاعات زاویه ورود سیگنال هدف و سیگنال تداخل، سعی می‌شود تا پیک بیم در راستای سیگنال مطلوب قرار داده شده و یک نال در بیم در راستای تداخل قرار داده شود. از آنجا که عمق نال و محل آن وابسته به اطلاعات زاویه اخلالگر است و در عمل امکان دست‌یابی به اطلاعات دقیق از زاویه اخلالگر وجود ندارد، در این مقاله یک روش شکل‌دهی بیم مقاوم در برابر خطای زاویه‌سنجی اخلالگر به نام شکل‌دهنده بیم مبتنی بر خطای تخمین پیشنهاد شده است که نسبت به روش‌های سنتی که خطا را لحاظ نمی‌کنند و نسبت به روش‌های قبلی معرفی‌شده در مقالات از کارایی بالاتری برخوردار است. در بسیاری از مقالات از روش‌های مبتنی بر داده که نیاز به یک ساختار پیچیده جهت استخراج اطلاعات سیگنال مطلوب و اخلالگر دارد استفاده شده است، در حالی‌که در این مقاله استفاده از اطلاعات سامانه‌های شنود موجود و لحاظ کردن خطای آنها در مقابله با اخلالگر پیشنهاد می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، نسبت سیگنال به نویز و تداخل را با وجود خطای زاویه‌سنجی، در حد سامانه‌ای با اطلاعات دقیق از زاویه اخلالگر حفظ می‌نماید.

کلیدواژه‌ها: اخلالگر، شکل‌دهی پرتو، خطای زاویه‌سنجی، سیگنال به نویز و تداخل، سامانه حمایت الکترونیکی

۱- مقدمه

با گسترش فناوری‌های بی‌سیم، وجود اخلالگرها که با ارسال سیگنال اخلال موجب مسدودکردن ارتباطات شبکه‌های بی‌سیم می‌گردد، به یک مشکل مهم تحقیقاتی تبدیل شده است. مخصوصاً در کاربردهای نظامی که دشمن همواره سعی خواهد کرد با ایجاد اخلال در ارتباط نیروها دست بالا را در عملیات داشته باشد. اخلالگرها با کاهش نسبت سیگنال به نویز و تداخل در طرف گیرنده، موجب قطع ارتباطات یا کاهش کیفیت ارتباط موجود می‌گردند. به‌طور معمول سامانه‌های سنتی که امکان به‌کارگیری چند آنتن را نداشته‌اند از پرش فرکانسی برای مقابله با اخلالگرها استفاده می‌کرده‌اند. با پیشرفت‌هایی که در سامانه‌های شنود پدید آمد، ردیابی پرش‌های فرکانسی کند توسط سامانه اخلالگر براحتی قابل انجام است و در عمل اخلاگر باند فرکانسی خود را متناسب با تغییر باند سیگنال پیام تغییر خواهد داد و فرار از دست سیگنال اخلال امکان‌پذیر نخواهد بود.

اخلالگرها برای مقابله با سامانه‌های مخابراتی پیشرفته‌تر مانند سامانه‌های طیف گسترده رشته مستقیم یا سامانه‌های طیف گسترده با پرش فرکانسی تند، معمولاً از اخلال باند پهن[2] استفاده می‌نمایند که در نتیجه آن، بخشی از توان سیگنال اخلال در پهنای باند سیگنال پیام دریافت خواهد شد. در این‌گونه سناریوها نمی‌توان با پردازش‌های فرکانسی از اخلال داخل باند در امان ماند.

با توجه به پیشرفت‌هایی که در بخش آنتن، گیرنده جلویی[3] و بخش پردازش حاصل شده، استفاده از سامانه‌های چند آنتنه به شدت مورد توجه قرار گرفته است. در این‌گونه سامانه‌ها می‌توان یک شکل بیم تطبیقی متناسب با سناریو و اهداف مد نظر داشت. شکل‌دهی الگوی تشعشعی در آنتن‌های آرایه‌ای یکی از موضوعات مهمی است که با اهداف مختلفی ممکن است صورت پذیرد. در حالت متداول با هدف حداکثرکردن سیگنال به نویز پیام دریافتی سعی می‌شود تا بیمی شکل گیرد که پیک آن در راستای فرستنده سیگنال پیام قرار گیرد. شکل‌دهی بیم به دو روش صورت می‌گیرد. شکل‌دهی بیم آنالوگ که در آن با کنترل دامنه و فاز سیگنال RF[4] پشت آنتن‌ها، سعی خواهد شد تا به شکل بیم مد نظر دست یافت. در شکل‌دهی بیم دیجیتال، بعد از نمونه‌برداری از سیگنال‌ها (IF[5] یا باند پایه) سعی خواهد شد در پردازشگر با ترکیب سیگنال‌ها با وزن‌های مختلط و مناسب، به

* رایانامه نویسنده مسئول: smh_andargoli@nit.ac.ir

[2] Barrage Noise

[3] Front-end
[4] Radio Frequency
[5] Intermediate Frequency

www.SID.ir

Archive of SID

شکل بیم مد نظر دست یافت. در واقع خروجی بخش طراحی شکل‌دهنده بیم، وزن‌های ترکیب سیگنال‌ها است. شکل‌دهی بیم در واقع یک روش پردازشی است که مانند یک فیلتر فضایی عمل کرده و سیگنال‌های دریافتی در جهت‌های مشخصی (جهت‌های نزدیک به محل پیک بیم) را تقویت و سیگنال‌های دریافتی در خارج از عرض بیم را به‌طور نسبی تضعیف می‌نماید.

در سناریوهایی که وجود اخلاگر عامل اصلی در کاهش کیفیت ارتباط است و با پردازش فرکانسی امکان مقابله با سیگنال اخلال داخل باند وجود نداشته باشد، تنها روش، استفاده از فیلترینگ فضایی جهت کاهش دامنه سیگنال اخلال دریافتی خواهد بود. در این حالت در سامانه‌های چند آنتنه، سعی خواهد شد بیمی شکل گیرد که تضعیف شدیدی (نال بیم) در جهت سیگنال اخلالگر ایجاد نماید و در عین حال سیگنال دریافتی در جهت منبع سیگنال پیام (سیگنال مطلوب) را با حداکثر توان ممکن دریافت نماید. دو روش کلی جهت تعیین وزن‌های شکل‌دهی بیم وجود دارد. روش مبتنی‌بر داده که در آن بر اساس ذخیره‌سازی سیگنال‌های دریافتی در آرایه و تخمین ماتریس کوواریانس سیگنال‌های دریافتی در آرایه و با فرض دانستن جهت سیگنال مطلوب، بردار شکل‌دهی بیم را محاسبه می‌نماید. یکی از اشکالات این روش افزایش پیچیدگی گیرنده جهت ذخیره‌سازی نمونه‌ها و محاسبات ماتریس کوواریانس است. در اکثر سامانه‌های نظامی و اغلب مخابراتی، سامانه‌های شنود مجهز به جهت‌یاب نیز وجود دارند که می‌توانند جهت سیگنال مطلوب و سیگنال اخلالگر را تعیین نمایند. در این حالت می‌توان از زاویه ورود سیگنال مطلوب و زاویه ورود سیگنال اخلال که توسط سامانه شنود استخراج شده‌اند، به‌عنوان ورودی بخش طراحی وزن‌های شکل‌دهی بیم استفاده کرد و از پیچیده شدن ساختار گیرنده مخابراتی برای تخمین ماتریس کواریانس سیگنال‌ها خودداری کرد. در هر صورت خطا در تخمین زاویه ورود سیگنال اخلال اجتناب ناپذیر است. در [۱] روشی ارائه شده است که بتواند جهت ورود سیگنال‌های طیف گسترده را در محیط چند مسیره با خطای معقول محاسبه نماید.

MVDR[1] یک شکل‌دهنده بیم مبتنی بر داده است که سعی می‌نماید واریانس خروجی بیم را حداقل نماید در حالیکه پاسخ شکل‌دهنده بیم در راستای ورود سیگنال مطلوب برابر با یک باشد [۲]؛ اما کارایی این روش زمانی که سیگنال مطلوب در نمونه‌های استفاده شده جهت تخمین ماتریس کواریانس سیگنال تداخل حضور دارد و سیگنال مطلوب خیلی ضعیف‌تر از سیگنال تداخل نباشد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، این روش خیلی حساس به خطای بردار فرمان سیگنال تداخل و سیگنال مطلوب است. خطای بردار فرمان می‌تواند ناشی از خطا در تخمین زاویه منبع تداخل یا منبع سیگنال مطلوب، حرکت منابع سیگنال، کالیبره نبودن آرایه، انعکاس از موانع و اعوجاج سیگنال باشد [۳].

در [۳] بحث مفصلی روی روش‌های مقاوم‌سازی الگوریتم MVDR شده است و کتاب مناسبی برای آشنایی با این موضوع تحقیقاتی است.

برای افزایش مقاومت روش MVDR، الگوریتم بارگزاری قطری[2] در [۴] پیشنهاد شده است؛ اما مشکل این روش این است که فاکتوری که باید به عناصر روی قطر ماتریس اضافه شود معلوم نیست چگونه باید انتخاب شود. در [۵-۷] با استفاده از اضافه کردن قیدهای خطی سعی می‌شود تا عمق نال پهن گردد.

در [۸] با فرض این‌که خطای زاویه‌سنجی دارای توزیع یکنواخت حول گزارش زاویه‌سنجی است، الگوریتمی ارائه می‌دهد که سعی می‌کند با بهبود تخمین ماتریس کواریانس و همزمان بکارگیری بارگزاری قطری، مقاومت شکل‌دهنده بیم را در مقابل خطای زاویه‌سنجی و خطای ناشی از منابع متحرک افزایش دهد. فرض توزیع یکنواخت برای خطای زاویه‌سنجی ممکن است برای خطای ناشی از تحرک منبع منطقی به نظر برسد اما برای خطای زاویه‌سنجی ناشی از نویز حرارتی در جهت‌یاب منطقی نیست. علاوه بر این اشکالات مطرح شده برای بارگزاری قطری، برای این الگوریتم نیز وجود دارد.

در [۹] سعی شده با ارائه الگوریتمی جدید در تعیین زاویه ورود سیگنال‌ها، خطای زاویه سنجی کاهش یابد و نوآوری مقاله روی بهبود الگوریتم MVDR نیست و تاکید بیشتر مقاله روی مقاومت روش‌های جهت‌یابی است.

در [۱۰] پیشنهاد شده است که برای به‌دست آوردن ماتریس کواریانس منبع تداخل، زاویه منبع تداخل به چندین زاویه حول گزارش زاویه‌سنجی تعمیم داده شود و برای هر زاویه توانی متفاوت در نظر گرفته شود. سپس ماتریس کواریانس بر اساس جمع ماتریس کوواریانس هر یک از زوایای در نظر گرفته شده به‌دست می‌آید و از این ماتریس در الگوریتم MVDR استفاده می‌شود. پخش کردن زوایا حول گزارش باعث خواهد شد تا ماتریس کوواریانس مشابه ماتریس کوواریانس چند منبع تداخل گردد و همین موضوع باعث پهن شدن عمق نال در روش MVDR خواهد شد. یکی از اشکالات این روش این است که در مورد نحوه انتخاب زوایا حول گزارش، تعداد آنها، فواصل آنها و

[1] Minimum Varianse Distortionless Response

[2] Diagonal Loading

www.SID.ir

Archive of SID

مهم‌تر از همه توان آنها و ارتباط آنها با آماره خطای زاویه‌سنجی هیچ پیشنهادی ارائه نمی‌دهد.

با توجه به تصادفی بودن خطای گزارش زاویه‌سنجی سامانه شنود، جهت مقاوم‌سازی شکل‌دهی بیم، حل مسئله حداقل‌سازی متوسط توان دریافتی اخلالگر (متوسط آماری روی متغیر تصادفی زاویه ورود سیگنال اخلال) پیشنهاد می‌گردد. از آنجا که حداقل‌سازی متوسط توان تداخلی دریافتی، منجر به استفاده از متوسط آماری ماتریس کواریانس اخلالگر در محاسبات وزن‌های شکل‌دهی بیم خواهد شد، در این مقاله یک چارچوب کلی جهت محاسبه متوسط ماتریس کواریانس اخلالگر و نحوه به‌کارگیری آن در محاسبه وزن‌های شکل‌دهی بیم ارائه می‌گردد. در این چارچوب کلی با توجه به عدم وجود جواب بسته برای متوسط آماری ماتریس کواریانس اخلالگر یک روش ابتکاری و مبتنی بر تحلیل برای محاسبه تقریبی متوسط آماری پیشنهاد می‌گردد. بر اساس مدل خطای گزارش سامانه شنود، نحوه انتخاب یک دسته زاویه حول زاویه گزارش شده، تعداد آنها و فواصل آنها به روش تحلیلی ارائه می‌گردد. سپس با توجه به دسته زوایای انتخاب شده، نحوه محاسبه متوسط آماری به‌صورت ریاضی توضیح داده شده و نحوه به‌کارگیری آن در محاسبات وزن‌های شکل‌دهی بیم ارائه می‌گردد. با فرض این‌که خطای زاویه‌سنجی سامانه شنود دارای توزیع نرمال با واریانس مشخص است، متوسط ماتریس کوواریانس اخلالگر محاسبه شده و با به‌کارگیری آن در محاسبه ضرایب شکل‌دهی بیم، عمق نال متناسب با احتمال وقوع خطای زاویه‌سنجی پهن خواهد شد و همین موضوع به بهبود مقاومت الگوریتم MVDR کمک خواهد کرد.

در بخش ۲، مدل یک سامانه مخابراتی چند آنتنه که از گزارش سامانه شنود برای طراحی شکل‌دهی بیم استفاده می‌نماید و محاسبات مربوط به سیگنال به تداخل و نویز توضیح داده خواهد شد. در این بخش همچنین تاثیر خطادار بودن گزارش سامانه شنود بر روی روش‌های شکل‌دهی بیم که اثر خطای زاویه ورود سیگنال اخلال را در نظر نمی‌گیرند بررسی خواهد شد. چارچوب روش پیشنهادی جهت مقاوم‌سازی شکل‌دهی بیم در برابر خطای گزارش سامانه شنود در بخش ۳ آورده شده است. در این بخش با تحلیل ریاضی مدل خطای سامانه شنود، روشی برای محاسبه میانگین ماتریس همبستگی سیگنال تداخل و نحوه استفاده از آن در محاسبات وزنهای شکل‌دهی بیم ارائه شده است. در بخش ۴، کارایی روش پیشنهادی بر حسب سیگنال به تداخل و نویز خروجی شکل‌دهنده بیم و شکل الگوی تشعشعی گیرنده مخابراتی از طریق شبیه‌سازی‌ها ارزیابی می‌شود. در بخش ۵، نتایج به‌دست‌آمده جمع‌بندی خواهد شد.

۲- مدل سامانه

در شکل (۱) مدل سامانه مد نظر نمایش داده شده است. فرض می‌کنیم گیرنده شامل آرایه خطی یکنواخت با M آنتن همه‌جهته با فاصله d است. در اینجا $d=\frac{\lambda}{2}$ فرض می‌شود که λ معرف طول موج سیگنال است. منبع انتشار سیگنال مطلوب با زاویه مشخص θ_0 نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن و منبع اخلالگر در زاویه θ_J نسبت به خط عمود بر صفحه آرایه قرار دارند. مدارهای گیرنده جلویی با عملکرد ایده‌آل فرض می‌شوند که همه سیگنال‌ها در این مسیرها دارای توان و شیفت فاز یکسان می‌شوند که در واقعیت در مرحله واسنجی، یکسان‌سازی دامنه و فاز کانال‌ها به دقت تنظیم می‌شود. خروجی مدارات گیرنده جلویی، نمونه‌برداری شده و ادامه پردازش در پردازشگر دیجیتال انجام می‌شود. فرض می‌شود که زاویه منبع سیگنال مطلوب θ_0 بدون خطا در اختیار است و زاویه اخلالگر نیز که در واقعیت θ_J است با یک خطا توسط سامانه شنود[1] گزارش می‌شود. مقدار گزارش سامانه شنود را با $\hat{\theta}_J$ نمایش می‌دهیم. اغلب با توجه به اینکه سیگنال اخلالگر از جنس نویز و تصادفی است ردگیری زاویه‌ای آن توسط سامانه شنود دشوارتر و احتمال خطای گزارش زاویه ورود اخلالگر محتمل‌تر از گزارش زاویه ورود سیگنال مطلوب است. در این مقاله روی عامل نویز حرارتی در خطای اندازه‌گیری زاویه اخلالگر در سامانه شنود تمرکز شده است و از عوامل دیگر خطا صرف نظر شده است لذا منابع سیگنال ایستا فرض می‌شوند. در سامانه‌های عملی، ایستا فرض کردن منابع با توجه به سرعت مکانیکی حرکت منابع نسبت به سرعت الکترونیکی پردازش سامانه‌ها تا حدود زیادی منطقی است (کمتر از میلی‌ثانیه اندازه‌گیری زاویه اخلالگر و محاسبات وزن‌های شکل‌دهی بیم می‌تواند انجام شود و در این مدت جابجایی منابع سیگنال خیلی کم است). با توجه به زاویه ورود سیگنال مطلوب، زاویه ورود اخلالگر، توان اخلالگر و توان سیگنال مطلوب، بردار $\vec{w}\in C^{M\times 1}$ توسط الگوریتم شکل‌دهنده بیم محاسبه می‌شود که شامل $\vec{w}=[w_1,w_2,...,w_M]^T$ می‌باشد. هر یک از درایه‌های بردار شکل‌دهی بیم با نمونه‌های سیگنال دریافتی آنتن متناظر ضرب شده و سپس حاصل جمع دریافتی وزنی آنتن‌ها، خروجی شکل‌دهنده بیم را به عنوان فیلتر فضایی خطی خواهد ساخت. خروجی فیلتر فضایی، سیگنالی می‌باشد که ممکن است در ادامه بر روی آن پردازش زمان- فرکانس انجام گردد. در این مقاله بحث روی سیگنال خروجی فیلتر فضایی می‌باشد و هدف ما یافتن نسبت سیگنال به تداخل و نویز مناسب در این مرحله است. پارامترهای

[1] Electronic Support Measures

www.SID.ir

Archive of SID

طول موج و فاصله اِلمان‌ها به‌صورت دقیق مشخص می‌باشند و تنها گزارش زاویه ورود سیگنال اخلال دقیق نبوده و دارای خطا می‌باشد. البته لازم به ذکر است دقت تخمین توان سیگنال مطلوب و سیگنال تداخل تأثیر زیادی در کارایی نخواهد داشت.

اگر $\vec{x}(k)=[x_1(k),x_2(k),\ldots,x_M(k)]^T\in C^{M\times 1}$ معرف بردار سیگنال باند پایه دریافتی آرایه و k شاخص زمانی باشد، خروجی شکل‌دهنده بیم را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$y(k)=\vec{w}^H\vec{x}(k) \qquad (۱)$$

که در آن، $\vec{w}=[w_1,w_2,\ldots,w_M]^T\in C^{M\times 1}$ بردار شکل‌دهنده بیم است که با توجه به الگوریتم شکل‌دهنده بیم، به‌صورت تطبیقی محاسبه می‌شود.

بردار سیگنال دریافتی را بر اساس بردار فرمان سیگنال مطلوب و بردار فرمان سیگنال تداخل می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\vec{x}(k)=\vec{a}(\theta_0)s_0(k)+\vec{a}(\theta_J)s_J(k)+\vec{n}(k) \qquad (۲)$$

$s_0(k)$ بیانگر سیگنال مطلوب، $s_J(k)$ سیگنال اخلال، $\vec{n}(k)\in C^{M\times 1}$ معرف بردار نویز گوسی دریافتی با میانگین صفر و ماتریس کواریانس $\sigma^2 I_{M\times M}$ است که $\sigma^2=kTBN_f$ معرف واریانس یا توان سیگنال نویز دریافتی در هر آنتن است که k ثابت بولتزمن، T دمای استاندارد نویز بر حسب کلوین، B پهنای باند گیرنده و N_f عدد نویز گیرنده است. $\vec{a}(\theta_0)$ و $\vec{a}(\theta_J)$ به‌ترتیب بردار فرمان سیگنال مطلوب و بردار فرمان سیگنال اخلال می‌باشند. بردار فرمان آرایه‌های خطی یکنواخت را می‌توان به‌صورت زیر مدل کرد که با فرض صفحه‌ای بودن موج استخراج شده است.

$$\vec{a}(\theta)=[1,\exp\{j\xi\sin(\theta)\},..,\exp\{j(M-1)\xi\sin(\theta)\}]^T \qquad (۳)$$

که در آن، $\xi=\dfrac{2\pi d}{\lambda}$ و λ معرف طول موج است. ماتریس کواریانس بردار سیگنال دریافتی آرایه (با فرض مستقل بودن سیگنال مطلوب، سیگنال اخلال و سیگنال نویز) به‌صورت ذیل به‌دست می‌آید:

$$R=E\{\vec{x}\vec{x}^H\}=R_d+R_{J+n} \qquad (۴)$$

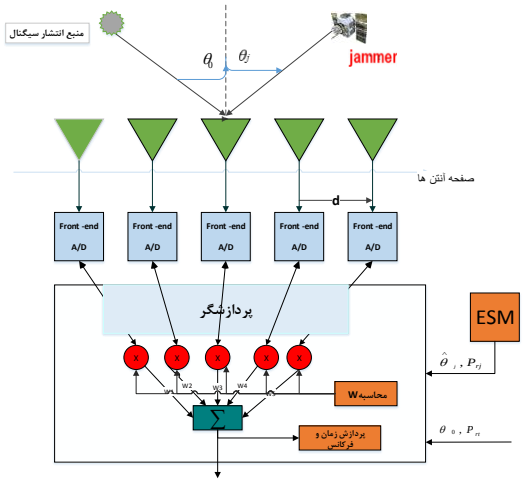
که در آن، R_d ماتریس کواریانس سیگنال مطلوب و با فرض توان دریافتی σ_0^2 برای سیگنال مطلوب، برابر است با

$$R_d=\sigma_0^2\vec{a}(\theta_0)\vec{a}^H(\theta_0) \qquad (۵)$$

و R_{J+n} معرف ماتریس کواریانس سیگنال اخلال به‌علاوه نویز است که با توجه به مستقل بودن سیگنال اخلال و نویز و با فرض صفر بودن dc آن‌ها برابر است با:

$$R_{J+n}=\sigma_J^2\vec{a}(\theta_J)\vec{a}^H(\theta_J)+\sigma^2 I \qquad (۶)$$

که در آن، σ_J^2 معرف توان دریافتی سیگنال اخلال است. عبارت اول معرف ماتریس کواریانس سیگنال اخلال و عبارت دوم معرف ماتریس کواریانس نویز است



شکل (۱): ساختار گیرنده سامانه مخابراتی مبتنی‌بر شکل‌دهی پرتو بر اساس گزارش سامانه حمایت الکترونیکی

در این‌صورت، نسبت سیگنال به نویز و تداخل (SINR)[1] بعد از شکل‌دهنده بیم به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$SINR\overset{\Delta}{=}\frac{\vec{w}^H R_d\vec{w}}{\vec{w}^H R_{J+n}\vec{w}}=\frac{\sigma_0^2\left|\vec{w}^H\vec{a}(\theta_0)\right|^2}{\vec{w}^H R_{J+n}\vec{w}} \qquad (۷)$$

با توجه به تعریف نسبت سیگنال به نویز و تداخل، حداکثرسازی نسبت سیگنال به نویز و تداخل معادل حل مسئله بهینه‌سازی زیر است [۲]:

$$\vec{w}_{opt}=\arg\min_{\vec{w}}\ \vec{w}^H R_{J+n}\vec{w}$$
$$\vec{w}^H\vec{a}(\theta_0)=1 \qquad (۸)$$

قید $\vec{w}^H\vec{a}(\theta_0)=1$ تضمین می‌کند که جهت پیک الگوی تشعشعی در راستای سیگنال مطلوب باشد. بردار شکل‌دهی پرتو بهینه براساس فرم بسته MVDR به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۲].

$$\vec{w}_{MVDR}=\frac{1}{\vec{a}^H(\theta_0)R_{J+n}^{-1}\vec{a}(\theta_0)}R_{J+n}^{-1}\vec{a}(\theta_0) \qquad (۹)$$

حال فرض کنیم که راستای واقعی اخلالگر θ_J و گزارش سامانه شنود، $\hat{\theta}_J$ باشد، اغلب یک بخش مهمی از منابع خطای زاویه‌سنجی سامانه‌های شنود، نویز حرارتی و تفکیک‌پذیری محدود آنها است که وابسته به عرض بیم آنتن شنودگر می‌باشد.

[1] Signal to Interference plus Noise Ratio

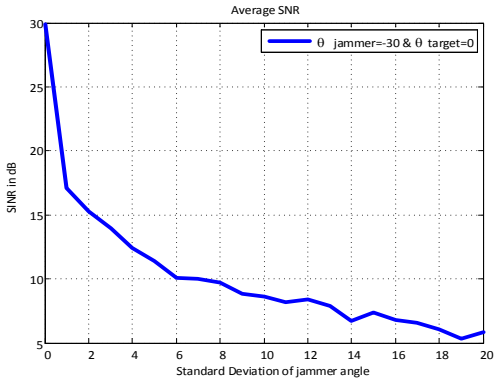
www.SID.ir

Archive of SID

در این حالت آماره‌های خطا بسته به سیگنال به نویز شنودگر و عرض بیم آنتن آن و روش پردازش آن قابل محاسبه است. این نوع خطای زاویه‌سنجی در هر بار گزارش سامانه شنود، یک متغیر تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس معلوم است که از سامانه‌ای به سامانه دیگر متفاوت است؛ بنابراین، می‌توان گزارش سامانه شنود در مورد زاویه اخلالگر را به‌صورت زیر مدل کرد:

$$\hat{\theta}_J = \theta_J + \theta_n \qquad (۱۰)$$

که در آن، θ_n یک متغیر تصادفی گوسی میانگین صفر با واریانس σ_θ^2 است. حال می‌خواهیم اثر گزارش خطادار سامانه شنود در عملکرد شکل‌دهی پرتو MVDR را بررسی نماییم. برای این منظور یک منبع سیگنال مطلوب در راستای صفر درجه و یک منبع اخلالگر در زاویه ۳۰- درجه با نسبت سیگنال به نویز $SNR = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}$ [۱] برابر با ۳۰ dB و نسبت تداخل به نویز $INR = \frac{\sigma_J^2}{\sigma^2}$ [۲] برابر با ۷۰ dB در نظر می‌گیریم. سپس به زاویه منبع اخلالگر یک خطای تصادفی با توزیع نرمال که میانگین آن صفر و واریانس آن مشخص است اضافه می‌کنیم. با توجه به رابطه (۶) و بر اساس زاویه خطادار اخلالگر، ماتریس کواریانس سیگنال اخلالگر به اضافه نویز محاسبه شده و با جایگذاری آن در رابطه (۹) بردار شکل‌دهی بیم MVDR بر اساس زاویه خطادار محاسبه می‌شود. با جایگذاری بردار شکل‌دهی بیم در رابطه (۷) مقدار سیگنال به تداخل و نویز (SINR) به‌دست می‌آید و ذخیره می‌گردد. این کار به‌ازای ۱۰ هزار بار تحقق تصادفی خطای گزارش زاویه سیگنال اخلال تکرار شده و متوسط SINR در این ۱۰ هزار بار رسم می‌گردد. این کار به‌ازای واریانس‌های مختلف خطای تخمین زاویه سیگنال اخلال تکرار می‌گردد. متوسط SINR بر حسب انحراف معیار خطای گزارش، σ_θ، در شکل (۲) رسم شده است.



شکل (۲): نسبت سیگنال به نویز و تداخل خروجی شکل‌دهنده پرتو MVDR بر حسب انحراف معیار خطای زاویه سنجی

همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، با افزایش انحراف معیار خطای زاویه‌سنجی از ۰ به ۱ درجه، نسبت سیگنال به نویز و تداخل حدود ۱۵ dB افت پیدا خواهد کرد که عدد بسیار بزرگی است و در عمل خطای زاویه‌سنجی سامانه شنود هم بیشتر از ۱ درجه است. افزایش انحراف معیار خطای زاویه‌سنجی به ۶ درجه باعث افت نسبت سیگنال به نویز و تداخل حدود ۲۰ dB خواهد شد. لذا در عمل، کارایی شکل‌دهی پرتو به روش MVDR خیلی حساس به خطای تخمین زاویه اخلالگر است و در سناریوهای واقعی که خطای زاویه‌سنجی اجتناب‌ناپذیر است نمی‌توان از آن استفاده نمود.

در مقالات مختلفی سعی در ارائه روش مقاوم در برابر خطای زاویه‌سنجی شده است که در مرجع [۱۰] بعد از بررسی آنها، روش جدیدی پیشنهاد شده است و نشان داده شده که این روش نسبت به روش‌های قبلی بهتر عمل کرده و تا حدودی شکل‌دهی پرتو را مقاوم نموده است. در روش پیشنهادی [۱۰]، برای این‌که منطقه نال را گسترش دهند تا در صورت خطادار بودن گزارش، همچنان زاویه واقعی منبع اخلالگر در منطقه نال پهن شده قرار گیرد پیشنهاد شده است که اطراف گزارش دریافتی محل اخلالگر، چندین منبع اخلالگر فرض شود. با اضافه کردن منابع اخلال مجازی در زوایای اطراف گزارش، ماتریس همبستگی اخلالگر که تاکنون فقط براساس زاویه گزارش شده سامانه شنود تشکیل داده می‌شد، تغییر خواهد کرد. این روش پیشنهادی باعث گسترش منطقهٔ نال اطراف زاویهٔ گزارش سامانه شنود خواهد شد به‌طوری‌که احتمال قرارگیری زاویهٔ واقعی اخلالگر در این منطقه بسیار افزایش می‌یابد. دراین روش، در منطقه وسیع‌تری از اطراف منبع مطلوب اگر اخلالگر قرار گیرد نسبت سیگنال به نویز و تداخل تا حدودی افت پیدا خواهد کرد که این یکی از معایب روش‌های مقاوم در برابر خطای زاویه‌سنجی است. یکی از اشکالات روش پیشنهادی در [۱۰] این است که توان اخلالگرهای مجازی در اطراف گزارش سامانه شنود را یکسان در نظر می‌گیرد و هیچ طرحی در مورد نحوهٔ انتخاب تعداد منابع اخلالگر مجازی، فاصله زاویه‌ای آنها و وزن ترکیب ماتریس کواریانس آن‌ها ارائه نمی‌دهد.

در روش مبتنی‌بر داده که در مرجع [۱۰] تحت عنوان الگوریتم SMI[۳] بررسی شده است، با استفاده از نمونه‌های سیگنال دریافتی آرایه، ماتریس کواریانس سیگنال دریافتی که شامل ماتریس کواریانس سیگنال مطلوب به اضافه ماتریس کواریانس سیگنال تداخل به اضافه ماتریس کواریانس نویز است تخمین‌زده می‌شود و از ماتریس کواریانس داده دریافتی $\hat{R}_x$ در رابطه (۹)

[1] Signal to noise Ratio
[2] Interference to Noise Ratio
[3] Sample Matrix Inversion

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده می‌گردد.

$$\hat{R}_x = \frac{1}{K_s}\sum_{k=1}^{K_s}\vec{x}(k)\vec{x}^H(k) \qquad (۱۱)$$

در این رابطه، K_s معرف تعداد مشاهدات یا همان تعداد نمونه‌های زمانی[1] است. با توجه به این‌که روش مبتنی‌بر داده از خود داده‌های دریافتی استفاده می‌کند و زاویه ورود واقعی سیگنال تداخل مستقیم در نمونه‌های دریافتی اثر می‌گذارد، در این روش مشکلات خطای سامانه شنود وجود ندارد؛ اما در عوض سخت افزار پیچیده‌تری جهت ذخیره‌سازی نمونه‌ها و محاسبه تخمین ماتریس کواریانس داده نیاز است. علاوه‌بر این، وجود ماتریس کواریانس سیگنال مطلوب در داخل ماتریس تخمینی در حالتی که سیگنال تداخل خیلی قوی‌تر از سیگنال مطلوب نباشد الگوریتم را دچار مشکل خواهد کرد.

۳- روش شکل‌دهی بیم مبتنی بر احتمال خطای تخمین (EEPBF)

در این بخش با تحلیل ریاضی عامل کاهش کارایی که همان خطای تخمین زاویه ورود سیگنال اخلال در سامانه شنود است، چارچوبی ریاضی برای مقاوم‌سازی شکل‌دهی بیم در سامانه مخابراتی ارائه خواهیم داد.

از آنجا که مدل خطای گزارش زاویه‌سنجی سامانه شنود براساس تابع چگالی احتمال گوسی با واریانس مشخص (بر اساس مشخصات سامانه شنود) است لذا داریم:

$$\hat{\theta}_J = \theta_J + \theta_n \Rightarrow \theta_J = \hat{\theta}_J - \theta_n \qquad (۱۲)$$

در این‌صورت به‌ازای $\hat{\theta}_J$ گزارش شده و معلوم، تابع چگالی احتمال θ_J یک تابع چگالی احتمال گوسی با میانگین $\hat{\theta}_J$ و واریانس σ_θ^2 خواهد بود.

حال برای مقاوم‌سازی در برابر خطای تخمین سامانه شنود، در مسئله MVDR یا همان مسئله کاهش سطح سیگنال تداخل و نویز در خروجی شکل‌دهنده بیم به جای تابع هدف $\vec{w}^H R_{J+n}\vec{w}$ (که این تابع هدف به دلیل نداشتن زاویه واقعی اخلالگر در دسترس نیست و در روش MVDR وقتیکه زاویه واقعی اخلال در دسترس نبود به ناچار از $R_{J+n} = \sigma_J^2\vec{a}(\hat{\theta}_J)\vec{a}^H(\hat{\theta}_J) + \sigma^2 I$ استفاده می‌شده است)، تابع هدف $\vec{w}^H E_{\theta|\hat{\theta}_J}\{R_{J+n}\}\vec{w} = \vec{w}^H \bar{R}_{J+n}\vec{w}$ پیشنهاد می‌گردد که $E\{\}$ معرف اپراتور امید ریاضی است. با تغییر تابع هدف در مسئله، لازم است در رابطه (۹) که جواب مسئله و نحوه تعیین وزن‌های شکل‌دهی بیم است به‌جای R_{J+n} از $E_{\theta|\hat{\theta}_J}\{R_{J+n}\}$ استفاده شود. برای محاسبه امید ریاضی ماتریس کواریانس سیگنال اخلال داریم:

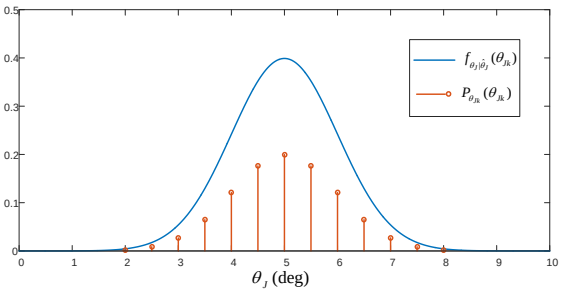
$$\begin{aligned}\bar{R}_J &= E_{\theta J|\hat{\theta}_J}\{R_J\} \\ &= \int R_J(\theta_J) f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_J \mid \hat{\theta}_J) d\theta_J\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

اگر درایه‌های ماتریس $R_J(\theta_J)$ را در نظر بگیریم درایه سطر i ام و ستون k ام عبارتی به‌صورت $\exp(j(i-k)\zeta\sin(\theta_J))$ خواهد بود که برای محاسبه امید ریاضی ماتریس کواریانس، باید از اینگونه عبارت‌ها روی تابع چگالی احتمال شرطی θ_J، $f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_J)$ امید ریاضی گرفته شود.

$$\begin{aligned}&E\{\exp(jl\zeta\sin(\theta_J))\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{jl\zeta\sin(\theta_J)} f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_J) d\theta_J \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{jl\zeta\sin(\theta_J)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta_J}} e^{-\frac{(\theta_J-\hat{\theta}_J)^2}{2\sigma_{\theta_J}^2}} d\theta_J\end{aligned} \qquad (۱۴)$$

مطابق جستجوهایی که انجام دادیم این انتگرال جواب به فرم بسته ندارد و باید از طریق روش‌های عددی که عملیات نسبتاً پیچیده‌ای است محاسبه شود. در عمل که گزارشات سامانه شنود دائماً با یک ثابت زمانی مشخصی در حال تغییر هستند، محاسبه سریع این انتگرال نیاز به سخت‌افزار پیچیده‌ای دارد.

لذا به جای محاسبه انتگرال، امید ریاضی را می‌توان بصورت گسسته و براساس طرح پیشنهادی زیر اجرا کرد. در طرح پیشنهادی به جای تابع چگالی گوسی که در آن θ_J از $-\infty$ تا $+\infty$ احتمال رخ دادن دارد، یک تابع جرم احتمال گسسته به‌ازای $K+1$ مقدار از θ_J در اطراف $\hat{\theta}_J$ در نظر می‌گیریم امّا مقدار تابع جرم احتمال گسسته در هر یک از مقادیر θ_J که احتمال رخ دادن دارند متناسب با مقدار همان تابع چگالی احتمال گوسی نقطه مورد نظر انتخاب می‌شود.



شکل (۳): تابع چگالی احتمال خطای زاویه‌سنجی گزارش سامانه شنود و تابع جرم احتمال پیشنهادی جهت محاسبه امید ریاضی

برای متغیر تصادفی گوسی می‌توان زوایای گسسته را در محدوده $\hat{\theta}_J - 3\sigma_\theta \le \theta_J \le \hat{\theta}_J + 3\sigma_\theta$ در نظر گرفت زیرا:

$$\begin{aligned}&P(\hat{\theta}_J - 3\sigma_\theta \le \theta_J \le \hat{\theta}_J + 3\sigma_\theta) \\ &= 1 - 2Q(3) \cong 0.98\end{aligned} \qquad (۱۵)$$

[1] Snapshot numbers

www.SID.ir

Archive of SID

تعداد زوایای گسسته $K+1$ را می‌توان به‌گونه‌ای در نظر گرفت که:

$$\Delta\theta = \frac{6\sigma_\theta}{K} << \Delta\theta_{\min} \qquad (۱۶)$$

که در این رابطه، $\Delta\theta_{\min}$ معرف عرض بیم آرایه بوده و وابسته به تعداد اِلمان و فاصله بین اِلمان‌ها است. از طرفی عرض بیم نیز از رابطه ذیل به‌دست می‌آید و برای تعداد المان ۱۰ برابر با ۲۲ درجه خواهد شد [۱۱].

$$\Delta\theta_{\min} = \frac{2}{d}\cdot\frac{\lambda}{N} = \frac{4}{N} = 0.4\ rad = 22^\circ \qquad (۱۷)$$

در این‌صورت زوایای گسسته به شکل زیر انتخاب می‌شوند.

$$\theta_{Jk} = \hat{\theta}_J + k.\Delta\theta \ \ , \ k = -\frac{K}{2},.....,\frac{K}{2} \qquad (۱۸)$$

بعد از انتخاب زوایای گسسته، مقدار تابع جرم احتمال گسسته در هر زاویه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) = \frac{f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_{Jk})}{\sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_{Jk})} \quad k = -\frac{K}{2},.....,\frac{K}{2} \qquad (۱۹)$$

دررابطه فوق، $f_{\theta_J|\hat{\theta}_J}(\theta_{Jk})$ همان تابع چگالی احتمال گوسی با میانگین $\hat{\theta}_J$ و واریانس σ_θ^2 است. سپس امید ریاضی ماتریس همبستگی تداخل به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\bar{R}_J(\hat{\theta}_J) &= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) R_J(\theta_{Jk}) \\ &= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) \sigma_J^2 \vec{a}(\theta_{Jk}) \vec{a}^H(\theta_{Jk})\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

بعد از محاسبه امید ریاضی ماتریس همبستگی تداخل، ماتریس همبستگی تداخل و نویز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{R}_{J+n} = \bar{R}_J(\hat{\theta}_J) + \sigma^2 I \qquad (۲۱)$$

سپس براساس رابطهٔ (۳) و با جایگذاری $\bar{R}_{J+n}$ به‌جای R_{J+n} ، بردار بهینه شکل‌دهی پرتو محاسبه می‌شود.

$$\vec{w}_{proposed} = \frac{1}{\vec{a}^H(\theta_0)\bar{R}_{J+n}^{-1}\vec{a}(\theta_0)}\bar{R}_{J+n}^{-1}\vec{a}(\theta_0) \qquad (۲۲)$$

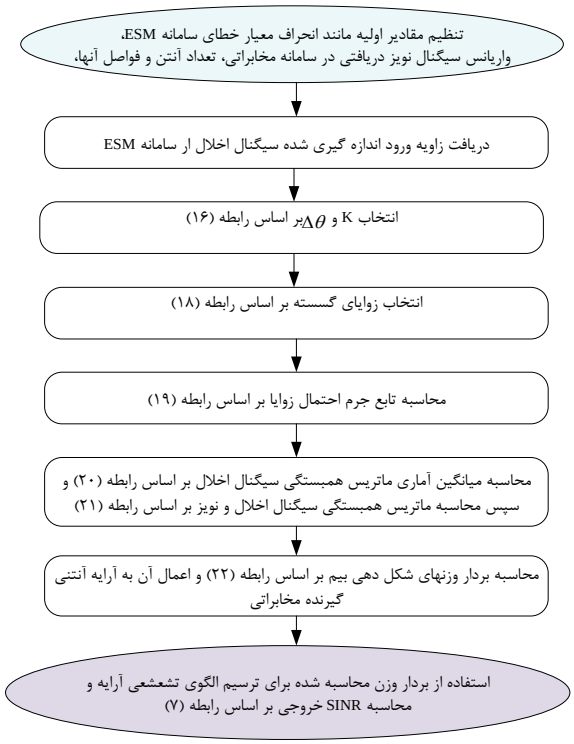
وقتی‌که سامانه شنود وجود چندین منبع اخلالگر داخل باند (N_J منبع اخلالگر) را گزارش نماید، به‌راحتی می‌توان الگوریتم پیشنهادی را به‌شکل زیر تعمیم داد. برای منبع اخلال iام مشابه روش پیشنهادی بالا امید ریاضی ماتریس کواریانس محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned}\bar{R}_{Ji}(\hat{\theta}_{Ji}) &= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Ji,k}}(\theta_{Ji,k}) R_J(\theta_{Ji,k}) \\ &= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Ji,k}}(\theta_{Ji,k}) \sigma_{J,i}^2 \vec{a}(\theta_{Ji,k}) \vec{a}^H(\theta_{Ji,k})\end{aligned} \qquad (۲۳)$$

و سپس $\bar{R}_J$ مورد نیاز در روش پیشنهادی (برای رابطه (۲۱)) را می‌توانیم به‌صورت زیر محاسبه نماییم.

$$\bar{R}_J = \sum_{i=1}^{N_J} \bar{R}_{Ji}(\hat{\theta}_{Ji}) \qquad (۲۴)$$

مجموعه اقداماتی که برای شکل‌دهی بیم در روش پیشنهادی EEPBF انجام خواهد شد در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی برای شکل‌دهی بیم گیرنده مخابراتی

بخش بنفش رنگ فقط برای ارزیابی در شبیه‌سازها استفاده می‌شود و جزو سامانه محاسبه ضرایب شکل‌دهی بیم نیست. بخش سفید رنگ هر T_s ثانیه فرآیند دریافت اطلاعات زاویه ورود اخلالگر از سامانه شنود و محاسبه وزن‌های شکل‌دهی بیم را تکرار می‌نماید و وزن‌های محاسبه‌شده را در گیرنده سامانه مخابراتی اعمال می‌نماید. مقدار T_s معمولا به نرخ به‌روزرسانی اطلاعات سامانه شنود ارتباط دارد که معمولا در طراحی سامانه شنود بر اساس حداکثر سرعت جابه‌جایی پلت‌فرم حامل اخلالگر طراحی می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

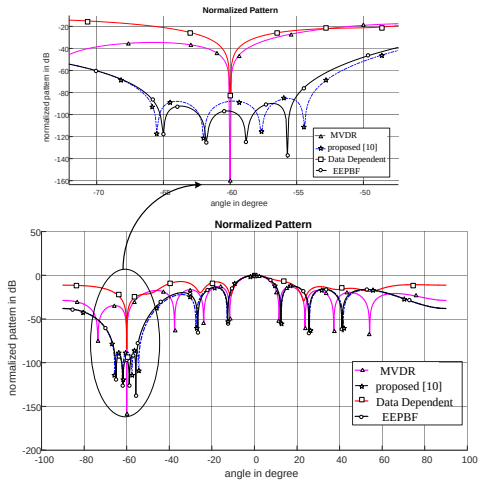
۳-۱- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارائی روش پیشنهادی یک آرایه خطی با ۱۰ اِلمان که فاصله بین اِلمان‌ها $\frac{\lambda}{2}$ باشد و نسبت سیگنال به نویز $SNR=20dB$ و نسبت تداخل به نویز $INR=70dB$ در نظر گرفته شده است که معادل تداخل به سیگنال $ISR=\frac{\sigma_J^2}{\sigma_0^2}=50dB$ [1] است. در روش مبتنی‌بر داده برای محاسبه ماتریس کواریانس، ۳۰ نمونه زمانی گرفته شده است. فرض شده که منبع سیگنال مطلوب در زاویه صفر درجه قرار دارد و گزارش سامانه شنود در مورد راستای اخلالگر ۶۰- درجه باشد.

حال θ_{jk}ها را در روش پیشنهادی براساس رابطه (۱۵)، تولید می‌نماییم:

$$\theta_{jk}=\hat{\theta}_j+k\Delta\theta \qquad (۲۵)$$

در این شبیه‌سازی، $\Delta\theta=1$ درجه و k اعداد صحیح از ۶- تا ۶ انتخاب شده است (تنظیمات مناسب برای سامانه شنودی با $\sigma_\theta=2^o$). سپس بر اساس الگوریتم پیشنهادی $P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk})$ محاسبه‌شده و سپس بردار شکل‌دهی پرتو محاسبه می‌گردد. اگر چه روش معرفی‌شده در [۱۰] نحوه انتخاب زاویه‌ها را توضیح نداده است؛ اما برای مقایسه عادلانه همان زاوایای استفاده شده در روش پیشنهادی را برای الگوریتم [۱۰] استفاده می‌نماییم تنها با این تفاوت که $P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk})$ برای همه زوایای یکسان فرض می‌شود. در شکل (۵) الگوی تشعشعی نرمالیزه به‌دست‌آمده در روش‌های مختلف نمایش داده شده است.



شکل (۵): الگوی تشعشعی شکل‌دهنده‌های بیم و بزرگ‌نمایی شده آن به‌ازای منبع سیگنال مطلوب در صفر درجه و گزارش سامانه شنود ۶۰- درجه برای زاویه اخلالگر

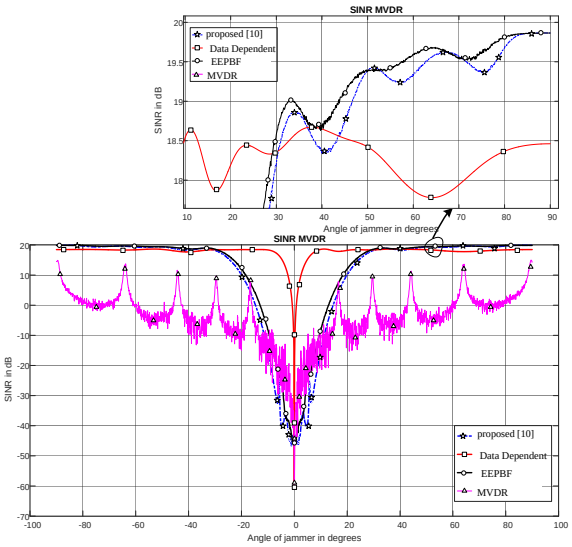
البته باید به این نکته اشاره کرد که الگوی تشعشعی روش مبتنی برداده با فرض این‌که منبع اخلالگر در زاویه ۶۰- درجه باشد استخراج شده است. الگوی تشعشعی روش MVDR بر اساس گزارش سامانه شنود یک نال قوی (۱۶۰ dB-) در زاویه گزارش ایجاد می‌نماید اما در عوض پهنای نال بسیار باریک است و ازآنجاکه راستای واقعی منبع اخلالگر با گزارش یکسان نیست (به دلیل خطای سامانه شنود) سیگنال اخلالگر در عمق نال قرار نخواهد گرفت و هرچه فاصله بین راستای واقعی و گزارش سامانه شنود بیشتر باشد سیگنال اخلال تضعیف کمتری دچار خواهد شد که همین موضوع باعث کاهش شدید کارایی روش MVDR خواهد شد. اگرچه محل نال الگوی تشعشعی روش مبتنی‌بر داده با محل واقعی منبع اخلالگر یکسان خواهد شد اما همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق نال آن (حدود ۸۰ dB-) خیلی کمتر از روش‌های دیگر است. از مقایسه الگوی تشعشعی روش پیشنهادی EEPBF و روش معرفی‌شده در [۱۰] درمی‌یابیم که هر دو روش برای مقابله با عدم قطعیت گزارش سامانه شنود از پهن کردن عمق نال استفاده کرده‌اند. اگرچه عمق نال نسبت به MVDR بالاتر می‌آید اما در عوض پهن‌شده است. یکی از برتری‌های الگوی تشعشعی روش پیشنهادی نسبت به روش [۱۰] این است که عمق نال آن در اطراف گزارش بیشتر است اما در عوض وقتی بیشتر از $3\sigma_\theta$ (معادل ۶ درجه در راست و ۶ درجه در چپ) از محل گزارش فاصله می‌گیریم توان الگوی تشعشعی آن بیشتر از الگوی تشعشعی روش [۱۰] است. درواقع محل‌های نزدیک به گزارش، عمق بیشتری دارند و با دور شدن از محل گزارش توان با شیب بیشتری افزایش می‌یابد (در شکل (۵) به الگوی تشعشعی زوم شده اطراف زاویه ۶۰- درجه به‌عنوان گزارش سامانه شنود دقت شود). نتیجه پیاده‌سازی روش [۱۰] بر اساس زوایای گسسته پیشنهادی ما نسبت به خود نتایج آورده شده در مقاله [۱۰] حدود ۴۰ دسی‌بل بهبود دارد

در ادامه محل منبع تداخل‌گر از ۹۰- تا ۹۰ درجه تغییر داده می‌شود و به‌ازای هر محل گزارش تصادفی سامانه شنود تولید شده و بردار شکل‌دهی بیم در روش‌های مستقل از داده بر اساس گزارش سامانه شنود و در روش مبتنی‌بر داده بر اساس ۳۰ نمونه زمانی از سیگنال دریافتی آرایه محاسبه می‌گردند. فرض می‌نماییم که سامانه شنود دارای خطایی با انحراف معیار ۲ درجه است و بر همین اساس گزارش خطادار سامانه شنود به‌صورت تصادفی و با توزیع نرمال تولید می‌شود. سپس مقدار سیگنال به تداخل و نویز در خروجی شکل‌دهنده بیم محاسبه می‌شود. این کار برای ۱۰۰۰ بار تحقق متغیرهای تصادفی انجام‌شده و متوسط سیگنال به تداخل و نویز در این ۱۰۰۰ بار در شکل (۶) نمایش داده شده است.

[1] Interference to Signal Ratio

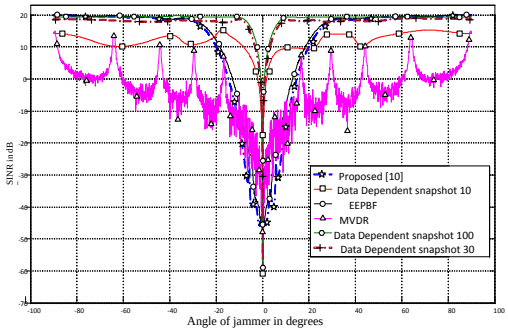
www.SID.ir

Archive of SID



شکل (۶): نسبت سیگنال به نویز و تداخل خروجی شکل‌دهنده‌های بیم و بزرگ‌نمایی‌شده آن برحسب زاویه ورود اخلالگر

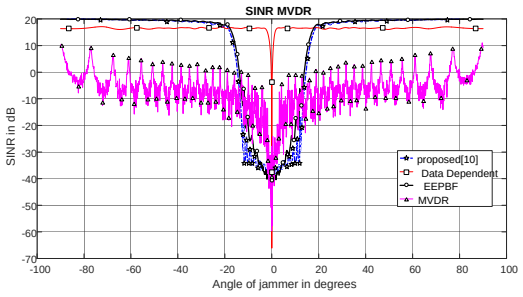
همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود وقتی اخلالگر فاصله زاویه‌ای کافی از منبع سیگنال مطلوب را دارد سیگنال اخلال شدیداً تضعیف‌شده و نسبت سیگنال به نویز و تداخل به نسبت سیگنال به نویز نزدیک می‌شود و وقتی موقعیت اخلالگر به موقعیت منبع مطلوب ازلحاظ زاویه‌ای نزدیک می‌شود امکان ایجاد نال قوی وجود نخواهد داشت و مقدار نسبت سیگنال به نویز و تداخل به نسبت سیگنال به تداخل یعنی ۵۰dB- همگرا می‌شود. البته در عمل سناریوهایی اتفاق می‌افتد که محل منبع اخلالگر (که در موقعیت دشمن است) دارای فاصله زاویه‌ای زیادی از فرستنده سیگنال مطلوب (که در محل نیروهای خودی است) است لذا این منطقه بزرگنمایی شده است تا کارایی روش‌ها بهتر قابل‌مقایسه باشد. درنتیجه کارایی روش MVDR به‌صورت کامل زیر سؤال است. مقدار نسبت سیگنال به نویز و تداخل روش پیشنهادی EEPBF در منطقه مدنظر حدود ۰٫۵ دسی‌بل و در مناطق نزدیک به محل منبع سیگنال مطلوب حدود ۵ دسی‌بل بیشتر از روش مطرح‌شده در [۱۰] است. اختلاف زیاد روش پیشنهادی با روش معرفی‌شده در [۱۰] در محل‌های نزدیک به منبع مطلوب از پهن شدن زیاد از حد عمق نال در روش [۱۰] نشأت می‌گیرد که توان الگو با شیب کمتری به مقادیر بالا برمی‌گردد. روش مبتنی برداده در زمانی که محل منبع اخلالگر نزدیک محل منبع سیگنال مطلوب قرار دارد کارایی به‌مراتب بهتری از روش‌های دیگر دارد زیرا این روش عمق نال را پهن نخواهد کرد و عمق نال آن در همان موقعیت واقعی تداخل‌گر شکل می‌گیرد. عمق نال باریک باعث خواهد شد که برای فواصل زاویه‌ای کم بین تداخلگر و منبع مطلوب، سیگنال منبع مطلوب در عمق نال قرار نگیرد و بدون علت تضعیف نشود. البته کارایی روش مبتنی‌بر داده در نواحی که در عمل بیشتر اتفاق می‌افتد حدود ۱ dB تا ۱/۵ dB بدتر از روش پیشنهادی است. البته باید به این نکته اشاره کرد که کارایی روش مبتنی برداده خیلی وابسته به تعداد نمونه‌های زمانی، مقدار نسبت تداخل به نویز و نسبت سیگنال به تداخل است که خود این موضوع در کنار پیچیدگی زیاد از ضعف‌های این روش می‌باشند. در شکل (۷) کارایی روش مبتنی‌بر داده به‌ازای تعداد نمونه زمانی ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ با روش‌های دیگر مقایسه شده است.



شکل (۷): کارایی روش مبتنی‌بر داده به‌ازای تعداد نمونه زمانی مختلف و مقایسه آن با دیگر روش‌ها

در شکل (۷) با افزایش تعداد نمونه‌ها کارایی روش مبتنی‌بر داده بهبود می‌یابد اما از یک حدی به بالا این بهبود بسیار ناچیز است. در ناحیه موردعلاقه، هنوز کارایی روش مبتنی‌بر داده با ۱۰۰ نمونه کمتر از روش پیشنهادی است. در واقعیت به دلیل تغییرات موقعیت اخلالگر یا منبع مطلوب، نمونه‌گیری در یک بازه زمانی محدود انجام خواهد شد که نمی‌تواند تعداد نمونه خیلی زیاد را فراهم نماید.

حال شبیه‌سازی را به‌ازای آرایه‌ای با ۴۰ المان، خطای زاویه سنجی با انحراف معیار ۴ درجه و تعداد نمونه زمانی ۱۰۰ برای روش مبتنی برداده تکرار می‌کنیم. متوسط نسبت سیگنال به نویز و تداخل خروجی شکل‌دهنده بیم در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل (۸): نسبت سیگنال به نویز و تداخل خروجی شکل‌دهنده‌های بیم برحسب زاویه ورود اخلالگر

www.SID.ir

Archive of SID

در ایـن حالـت نسـبت سـیگنال بـه نـویز و تـداخل روش پیشـنهادی در ناحیـه مـورد علاقـه حـدود dB ۳ بیشـتر از روش مبتنی‌بر داده است درحالی‌که برتری خود نسبت به دیگر روش‌هـا را نیز حفظ می‌نماید. علاوه‌بر ایـن، بـا توجـه بـه ایـن‌کـه زوایـای گسسته مجازی بر اساس احتمال رخ دادن خطـای زاویـه‌سـنجی انتخاب شده است با وجود انحراف معیار زیاد خطـا، کـارایی افـت چندانی نخواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک چارچوب کلی برای شـکل‌دهـی بـیم مقـاوم در برابر خطای گزارش زاویه ورود سیگنال اخلال ارائـه شـده اسـت. برای مقاوم‌سازی شکل‌دهی بیم، در محاسبات وزن‌های شکل‌دهی بیم استفاده از امید ریاضـی مـاتریس کواریـانس سـیگنال اخـلال نسبت به متغیـر تصـادفی زاویـه ورود سـیگنال اخـلال پیشـنهاد می‌گردد. بر اساس مشخصـات سـامانه حمایـت الکترونیکـی و بـا توجه به تابع چگالی احتمال خطای زاویـه‌سنجی،روشـی تحلیلـی برای محاسبه امید ریاضی مـاتریس کوواریـانس سـیگنال اخـلال ارائه می‌گردد. لحاظ کـردن تـابع چگـالی احتمـال خطـای زاویـه سنجی موجب خواهد شد که عمق نال متناسب با احتمـال وقـوع خطاها پهن گردد تا در صورت خطادار بودن گزارش سامانه شنود بازهم راستای واقعی منبع تداخل در منطقه نال قرار گیرد. نتـایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش شکل‌دهنده بـیم مبتنـی‌بـر احتمال خطا باوجود خطـای زاویـه سـنجی، مقـدار سـیگنال بـه تداخل و نویز برابر با سیگنال به نویز را در خروجی شـکل‌دهنـده بیم فراهم خواهد کرد و این به معنای حذف سیگنال اخلال است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده بـود، خطـای تخمـین زاویه ورود در ESM، می‌تواند SINR خروجـی شـکل‌دهنـده بـیم MVDR را تـا dB ۲۵ نسـبت بـه SNR کـاهش دهـد. امـا در شکل‌های (۷-۶) مشاهده می‌شود که SINR خروجی شکل‌دهنده بیم پیشنهادی وقتی کـه زاویـه ورود سـیگنال اخـلال حـدود ۱۰ درجه از راویه ورود سـیگنال اصـلی فاصـله دارد حـدود dB ۲۰ و برابر با مقدار SNR ورودی است. به عبارت دیگر سـیگنال اخـلال که خیلی قوی‌تر (dB ۵۰) از سیگنال اصـلی بـوده اسـت آن‌قـدر تضعیف شده است که که از سیگنال نویز نیز ضعیف‌تر شده اسـت و مقدار SINR خروجی با مقـدار SNR ورودی برابـر شـده اسـت. روش پیشـنهادی در مقایسـه بـا روش [۱۰] بـه‌خصـوص بـرای شرایطی که راستای منبع اخلال به راستای منبع مطلوب نزدیـک می‌شود کارایی به‌مراتب بالاتری را ارائه مـی‌دهـد. در مقایسـه بـا روش مبتنی‌بر داده در شرایطی که راستای منبع اخـلال و منبـع مطلوب فاصله زیادی دارند کارایی روش پیشنهادی بهتر است امـا برای شرایطی که راستای منبع اخلال نزدیـک بـه راسـتای منبـع مطلوب است، روش مبتنی‌بر داده کارایی بهتری را نتیجه خواهـد داد. البته این نتیجه بهتـر، هزینـه‌اش پیچیـدگی بیشـتر سـاختار گیرنده شامل نمونه‌برداری سـیگنال‌هـای آرایـه، ذخیـره‌سـازی و محاسبات ماتریس کوواریانس است.

۵- منابع

[1] F. Samsami-Khodadad and F. Nazari, "A Novel and Efficient DS/CDMA Direction of Arrival Algorithm for Multipath Fading Channel," Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 3, no. 3, 2016. (In Persian)

[2] J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.

[3] J. Li and P. Stoica, "Robust Adaptive Beamforming," Wiley, New York, 2006.

[4] B. D. Carlson, "Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 4, pp. 397–401, Jul. 1988.

[5] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," Proceedings of the IEEE, vol. 60, no. 8, pp. 926–935, Aug. 1972.

[6] S. Applebaum and D. Chapman, "Adaptive arrays with main beam constraints," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 5, pp. 650–662, Sep. 1976.

[7] C. Y. Tseng and L. J. Griffiths, "A unified approach to the design of linear constraints in minimum variance adaptive beamformers," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 40, no. 12, pp. 1533–1542, Dec. 1992.

[8] J. B. Liu, X. C. Cong, W. Xie, Q. Wan, and G. Gui, "robust adaptive beamforming for noncircular signal against array steering vector mismatch and interference nonstationary," proceeding of ChinaSIP, pp. 89-93, 2015.

[9] C. Zhou, Y. Gu, W. Song, Y. Xie, and Z. Shi, "Robust Adaptive Beamforming Based on DOA Support Using Decomposed Coprime Subarrays," proceeding of 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 2986-2990, 2016.

[10] W. Guo, P. Mu, Q. Yin, and W. Wang, "A New Robust Beamforming Method Against Signal Steering Vector Errors And Moving Jammers," 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1-5, 2011.

[11] V. Rabinovich and N. Alexandrov, "Antenna Arrays and Automotive Applications," Springer, New York, Chapter 2, 2013.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Electronical & Cyber Defence
Vol. 7, No. 3, 2019, Serial No. 27

Robust Adaptive Beamforming Against Interferer's Direction Of Arrival Estimation Error

S. M. Hosseeini Andargoli*, H. Zabihi

*Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 20/05/2018, Accepted: 05/03/2019)

ABSTRACT

One of the ways to deal with the effect of jammers, especially intra-band jammers, is to use beamforming in multi-antenna systems. In this method, based on the direction of arrival (DOA) of the desired signal and DOA of the interferer, it is tried to design a beam pattern which has a peak in the direction of the desired source and a null in the direction of interferer. Depth of the null and its location depend on the information obtained about the angle of interferer from electronic support measure (ESM) system. In practice, it is not possible to obtain accurate information from the electronic support measure (ESM) system. In this paper, a beamforming method named estimation error probability based beamformer (EEPBF)which is robust to DOA estimation error has been proposed. Data dependent methods may be more efficient than the proposed method with the cost of more complexity of receiver structure required to extract information from the desired and interference signals, whilst for confronting the interferer our proposed method uses existing systems' information, taking into account their errors. The proposed method keeps signal to interference plus noise ratio (SINR) in the order of signal to noise ratio (SNR) which can be obtained by error free DOA estimation methods. Simulation results show that the proposed method is more efficient than previous methods and traditional approaches.

Keywords: Jammer; Beamforming, DOA estimation error, Signal to Interference plus Noise Ratio, ESM

* Corresponding Author Email: smh_andargoli@nit.ac.ir

www.SID.ir