

شکل‌دهی پرتو مقاوم در برابر خطای شناسایی زاویه ورود سیگنال اخلاخل همراه با کنترل سطح گلبرگ‌های فرعی

حبیب اله ذبیحی^۲

سید مهدی حسینی اندارگلی^{۱*}

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه امام حسین (ع)

دانشیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰)

چکیده

یکی از راه‌های مقابله با اثر اخلاخل‌گرها مخصوصاً اخلاخل‌گرهای داخل باند، استفاده از شکل‌دهی پرتو در سیستم‌های چندآنتنه است. در این روش بر اساس اطلاعات زاویه ورود سیگنال هدف و سیگنال تداخل، سعی می‌شود تا پیک الگوی پرتو در راستای هدف قرار داده شده و یک نال در پرتو در راستای تداخل قرار داده شود. از آنجاکه عمق نال و محل آن وابسته به اطلاعات زاویه اخلاخل‌گر است و در عمل امکان دستیابی به اطلاعات دقیق از سیستم پشتیبانی الکترونیکی وجود ندارد، در این مقاله یک روش شکل‌دهی پرتو مقاوم در برابر خطای زاویه‌سنجی اخلاخل‌گر پیشنهاد شده است. همچنین کمینه‌کردن دریافتی از جهات خاص (زاویه ورود اخلاخل) منجر به افزایش سطح گلبرگ‌های فرعی الگوی تشعشعی خواهد شد. این موضوع در خیلی از سیستم‌های مخابراتی موجب کاهش کارایی سیستم خواهد شد. به همین منظور علاوه بر ملاحظات خطای زاویه ورود، سطح گلبرگ‌های فرعی در یک محدوده‌های خاص (مثل جهت تپه یا زمین) را کنترل می‌نماییم تا موجب افزایش قابل توجه این نوع اخلاخل‌ها نشود. در این مقاله بر اساس سه دیدگاه مختلف جهت کمینه‌کردن تداخل‌های دریافتی، سه مسئله برای بهینه‌سازی ضرایب شکل‌دهنده پرتو در گیرنده تعریف و مبتنی بر بهینه‌سازی محدب حل می‌گردند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد ضرایب بهینه شده توانسته‌اند مشکل خدادار بودن گزارش زاویه ورود اخلاخل‌گر و دریافت تداخل از گلبرگ‌های فرعی را حل نمایند تا گیرنده بتواند به SINR در حد SNR دست یابد.

کلیدواژه‌ها: اخلاخل‌گر، شکل‌دهی پرتو، خطای زاویه‌سنجی، سیگنال به نویز و تداخل، سامانه پشتیبانی الکترونیکی، گلبرگ فرعی.

Beamforming Robust in Interferer Direction of Arrival Uncertainties with Side lobes Level Control

S.M.Hosseini Andargoli, H.A.Zabih

Shariati s.t., Babol noshiravani university of tec, Babol, Iran, smh_andargoli@nil.ac.ir

Faculty and Research Institute of Electrical Electronic and Cyber Warfare, Imam Hossein University, Tehran, Iran

,habibzabih64@gmail.com

(Received: 2022/March/15; Accepted: 2022/September/01)

Abstract

One of the ways to deal with the effect of jammers, especially intra-band jammers, is to use beamforming (BF) in multi-antenna systems. In this method, based on the DOA of desired signal and DOA of interference, it is tried to design peak of beam pattern in the direction of the desired source and null of pattern in the direction of interferer. Since the depth of null and its location depend on the direction of interferer and in practice, it is not possible to obtain accurate information from electronic support measure (ESM) system, in this paper, a beamforming method which is robust to DOA estimation error has been proposed. Furthermore, nulling the interferer's direction results in side lobes level increment. This can decrease communication systems performance. So, in addition to robust jammer nulling, the side lobe level of considered directions is controlled, too. In this paper, three BF weights optimization from three points of view are defined and solved analytically based on convex optimization framework. Simulation results show that proposed method is more efficient than previous and traditional methods. The proposed method keeps SINR in the order of SNR which can be obtained by DOA estimation error free methods.

keywords: Jammer; Beamforming, DOA estimation error, Signal to Interference plus Noise Ratio, ESM, sidelobe.

۱. مقدمه

سیگنال‌ها با وزن‌های مختلط و مناسب، به شکل پرتو مدنظر دست‌یافت. در واقع خروجی بخش طراحی شکل‌دهنده پرتو^۷، وزن‌های ترکیب سیگنال‌ها است. شکل‌دهی پرتو در واقع یک روش پردازشی است که مانند یک فیلتر فضایی عمل کرده و سیگنال‌های دریافتی در جهت‌های مشخصی (جهت‌های نزدیک به محل پیک پرتو) را تقویت و سیگنال‌های دریافتی در خارج از عرض پرتو را به طور نسبی تضعیف می‌نماید [۱].

در سناریوهایی که وجود اخلاک‌گر عامل اصلی در کاهش کیفیت ارتباط است و با پردازش فرکانسی امکان مقابله با سیگنال اخلاک‌گر داخل باند وجود نداشته باشد، تنها روش، استفاده از فیلترینگ فضایی جهت کاهش دامنه سیگنال اخلاک‌گر دریافتی خواهد بود. در این حالت در سامانه‌های چند آنتنه، سعی می‌شود پرتوی شکل گیرد که تضعیف شدیدی (نال پرتو) در جهت سیگنال اخلاک‌گر ایجاد کرده و در عین حال سیگنال دریافتی در جهت منبع سیگنال پیام (سیگنال مطلوب^۸) را با حداکثر توان ممکن دریافت کند. دو روش کلی جهت تعیین وزن‌های شکل‌دهی پرتو وجود دارد. روش مبتنی بر داده^۹ که در آن بر اساس ذخیره‌سازی سیگنال‌های دریافتی در آرایه و تخمین ماتریس کوواریانس^{۱۰} سیگنال‌های دریافتی در آرایه و با فرض دانستن جهت سیگنال مطلوب، بردار شکل‌دهی پرتو را محاسبه می‌نماید. یکی از اشکالات این روش افزایش پیچیدگی گیرنده جهت ذخیره‌سازی نمونه‌ها و محاسبات ماتریس کوواریانس است [۱۰]. در اکثر سامانه‌های نظامی و اغلب مخابراتی، سامانه‌های شوند مجهز به جهت‌یاب نیز وجود دارند که می‌توانند جهت سیگنال مطلوب و سیگنال اخلاک‌گر را تعیین نمایند. در این حالت می‌توان از زاویه ورود سیگنال (DOA)^{۱۱} مطلوب و زاویه ورود سیگنال اخلاک‌گر که توسط سامانه شوند استخراج شده‌اند، به‌عنوان ورودی بخش طراحی وزن‌های شکل‌دهی پرتو استفاده کرد و از پیچیده‌شدن ساختار گیرنده مخابراتی برای تخمین ماتریس کوواریانس سیگنال‌ها خودداری کرد. در هر صورت خطا در تخمین زاویه ورود سیگنال اخلاک‌گر اجتناب‌ناپذیر است.

۱-۱. کارهای پیشین

در [۲] روشی ارائه شده است که بتواند جهت ورود سیگنال‌های طیف گسترده را در محیط چند مسیره با خطای معقول محاسبه نماید. MVDR^{۱۲} یک شکل‌دهنده پرتو مبتنی بر داده است که

با گسترش فناوری‌های بی‌سیم، وجود اخلاک‌گرها^۱ که با ارسال سیگنال اخلاک‌گر موجب مسدود کردن ارتباطات شبکه‌های بی‌سیم می‌گردد، به یک مشکل مهم تحقیقاتی تبدیل شده است. مخصوصاً در کاربردهای نظامی که دشمن همواره سعی خواهد کرد با ایجاد اخلاک‌گر در ارتباط نیروها دست بالا را در عملیات داشته باشد. اخلاک‌گرها با کاهش نسبت سیگنال به نویز و تداخل در طرف گیرنده، موجب قطع ارتباطات یا کاهش کیفیت ارتباط موجود می‌گردند. به طور معمول سامانه‌های سنتی که امکان به-کارگیری چند آنتن را نداشته‌اند از پرش فرکانسی برای مقابله با اخلاک‌گرها استفاده می‌کرده‌اند. با پیشرفت‌هایی که در سامانه‌های شوند پدید آمد، ردیابی پرش‌های فرکانسی کند توسط سامانه اخلاک‌گر به‌راحتی قابل انجام است و در عمل اخلاک‌گر باند فرکانسی خود را متناسب با تغییر باند سیگنال پیام تغییر خواهد داد و فرار از دست سیگنال اخلاک‌گر امکان‌پذیر نخواهد بود [۱].

اخلاک‌گرها برای مقابله با سامانه‌های مخابراتی پیشرفته‌تر مانند سامانه‌های طیف گسترده رشته مستقیم یا سامانه‌های طیف گسترده با پرش فرکانسی تند، معمولاً از اخلاک‌گر باند پهن^۲ استفاده می‌نمایند که در نتیجه آن، بخشی از توان سیگنال اخلاک‌گر در پهنای باند سیگنال پیام دریافت خواهد شد. در این‌گونه سناریوها نمی‌توان با پردازش‌های فرکانسی از اخلاک‌گر داخل باند در امان ماند.

با توجه به پیشرفت‌هایی که در بخش آنتن، گیرنده جلویی^۳ و بخش پردازش حاصل شده، استفاده از سامانه‌های چند آنتنه به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است. در این‌گونه سامانه‌ها می‌توان یک‌شکل پرتو تطبیقی متناسب با سناریو و اهداف مدنظر 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 حداکثر کردن سیگنال به نویز پیام دریافتی سعی می‌شود تا پرتوی شکل گیرد که پیک آن در راستای فرستنده سیگنال پیام قرار گیرد. شکل‌دهی پرتو^۴ به دو روش صورت می‌گیرد. شکل‌دهی پرتو آنالوگ که در آن با کنترل دامنه و فاز سیگنال RF^۵ پشت آنتن‌ها، سعی خواهد شد تا به شکل پرتو مدنظر دست‌یافت [۱].

در شکل‌دهی پرتو دیجیتال، بعد از نمونه‌برداری از سیگنال‌ها (IF^۶ یا باند پایه) سعی خواهد شد در پردازشگر با ترکیب

⁷ beamformer

⁸ signal of interest

⁹ data dependent

¹⁰ covariance matrix

¹¹ Direction of Arrival

¹² Minimum Variance Distortionless Response

¹ jammers

² Barrage Noise

³ Front-end

⁴ beamforming

⁵ Radio Frequency

⁶ Intermediate Frequency

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

در [۱۱] روش شکل‌دهی پرتو مقاوم بر اساس بهینه‌سازی محدب برای کنترل عدم تطابق جهت سیگنال^۴ و گلب‌برگ‌های فرعی ارائه شده است. با حل مسئله بهینه‌سازی محدب^۵ و استفاده از تابع هدف اصلاح شده^۶، توان خروجی شکل‌دهنده پرتو را به حداقل می‌رساند. این روش عملکرد نسبی بهتری در مقایسه با MVDR و روش‌های بارگذاری قطری در کل منطقه گلب‌برگ‌های فرعی دارد. به عبارتی عیب این روش آن است که اگر خطای زاویه‌سنجی نداشته باشیم (در اثر حرکت منبع نویز و...) روش MVDR عملکرد بهتری دارد. البته در مواقعی که تداخل بدون پیش‌بینی از گلب‌برگ‌های فرعی داشته باشیم این روش بهتر عمل می‌کند در حالی که در روش MVDR وقتی تداخل از گلب‌برگ‌های فرعی وارد نشده باشد سطح گلب‌برگ‌های فرعی بالا خواهد بود.

در [۱۳] سعی شده با ارائه الگوریتمی جدید در تعیین زاویه ورود سیگنال‌ها، خطای زاویه‌سنجی کاهش یابد و نوآوری مقاله روی بهبود الگوریتم MVDR نیست و تاکید بیشتر مقاله روی مقاومت روش‌های جهت‌یابی است.

در [۱۴] شکل‌دهی پرتو تطبیقی برای سرکوب گلب‌برگ‌های فرعی با قراردادن نال‌های الگوی تشعشعی اضافی ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم شکل‌دهی پرتو تطبیقی، علاوه بر اینکه گلب‌برگ اصلی را به سمت یک سیگنال مطلوب هدایت می‌کند، نال‌های الگوی تشعشعی را به صورت تکراری به سمت سیگنال‌های تداخل مر بوطه قرار می‌دهد و یک سطح گلب‌برگ فرعی^۷ مطلوب را فراهم می‌کند.

در [۱۵] طراحی و تحلیل معماری حذف کردن گلب‌برگ‌های فرعی (SLB)^۸ تطبیقی ارائه شده که با تداخل تکرارکننده همدوس^۹ در حضور سیگنال‌های اخلال‌کننده پیوسته مقابله می‌کند و برای ترکیب وزن‌های شکل‌دهنده پرتو تا حد امکان قدرت تداخل را در خروجی کانال کمکی تولید شده توسط نویز حرارتی و اخلالگر پیوسته را کاهش دهد و محدودیت‌های پاسخ زاویه‌ای کانال کمکی SLB را برآورده می‌کند و با استفاده از

سعی می‌نماید واریانس خروجی پرتو را حداقل نماید در حالی که پاسخ شکل‌دهنده پرتو در راستای ورود سیگنال مطلوب برابر با یک باشد [۳]؛ اما کارایی این روش زمانی که سیگنال مطلوب در نمونه‌های استفاده شده جهت تخمین ماتریس کوواریانس 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 هدایت^۱ سیگنال تداخل و سیگنال مطلوب است. خطای بردار هدایت 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 [۴].

در [۴] 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 بارگذاری قطری^۲ در [۵] 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 [۸-۶] با استفاده از اضافه کردن قیدهای خطی سعی می‌شود تا عمق نال پهن گردد.

در [۹] با فرض اینکه خطای زاویه‌سنجی دارای توزیع یکنواخت حول گزارش زاویه‌سنجی^۳ است، الگوریتمی ارائه می‌دهد که سعی می‌کند با بهبود تخمین ماتریس کوواریانس و همزمان بکارگیری بارگذاری قطری، مقاومت شکل‌دهنده پرتو 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 بارگذاری قطری، برای این الگوریتم نیز وجود دارد.

در [۱۰] پیشنهاد شده است که برای به دست آوردن ماتریس کوواریانس 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 کوواریانس بر اساس جمع ماتریس کوواریانس هر یک از زوایای در نظر گرفته شده به دست 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

⁴ Signal Direction Mismatch Control

⁵ convex optimization

⁶ modified objective function

⁷ SideLobe Level

⁸ SideLobe Blanking architectures

⁹ Coherent Repeater Interference

¹ Streng vector

² Diagonal Loading

³ DOA estimation report

شکل الگوی تشعشعی گیرنده مخابراتی با کنترل سطح گلبرگ-های فرعی^۱ از طریق شبیه‌سازی‌ها ارزیابی می‌شود. همواره کمینه‌کردن دریافتی از یک جهات خاص (زاویه ورود اخلاخل) منجر به افزایش سطح گلبرگ‌های فرعی پترن تشعشعی خواهد شد. این موضوع در خیلی از سیستم‌های مخابراتی موجب کاهش کارایی سیستم خواهد شد. مثلا در رادارها افزایش سطح گلبرگ-های فرعی موجب افزایش سطح سیگنال کلاتر خواهد شد که عملکرد رادار را تضعیف خواهد کرد. به همین منظور علاوه بر ملاحظات خطای زاویه ورود سیگنال اخلاخل، در نظر داریم سطح گلبرگ‌های فرعی در یک محدوده‌های خاص (مثل جهت تپه یا زمین) را کنترل نماییم تا موجب افزایش قابل توجه این نوع اخلاخلها نشود. در بخش ۴، کارایی روش پیشنهادی بر حسب سیگنال به تداخل و نویز خروجی شکل‌دهنده پرتو 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 معرف طول موج سیگنال است. منبع انتشار سیگنال مطلوب با زاویه مشخص θ_0 نسبت به خط عمود بر صفحه آنتن و منبع اخلاخل در زاویه θ_r نسبت به خط عمود بر صفحه آرایه و θ_p زاویه تداخل فرعی معرف زاویه‌ای است که یک کپی ناخواسته از سیگنال منبع مطلوب از آن جهت دریافت می‌گردد. مدارهای گیرنده جلویی با عملکرد ایده‌آل فرض می‌شوند که همه سیگنال‌ها در این مسیرها دارای توان و شیفیت فاز یکسان می‌شوند که در واقعیت در مرحله واسنجی^۲، 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 اخلاخل نیز که در واقعیت θ_r است با یک خطا توسط سامانه شنود (ESM)^۳ گزارش می‌شود. مقدار گزارش سامانه شنود را با $\hat{\theta}_r$ نمایش می‌دهیم. تداخل فرعی نیز فرض می‌شود که از راستاهایی در بازه زاویه‌ای معلوم مانند $[\theta_{s-min} \theta_{s-max}]$ دریافت می‌گردند. اغلب با توجه به اینکه سیگنال اخلاخل از جنس نویز و تصادفی است ردگیری^۴

فیلترهای فضایی متعدد افزایش عملکرد مطمئنی را ایجاد می‌کند.

با توجه به تصادفی بودن خطای گزارش زاویه‌سنجی سامانه شنود، جهت مقاوم‌سازی شکل‌دهی پرتو، حل مسئله حداقل‌سازی متوسط توان دریافتی اخلاخل (متوسط آماری روی متغیر تصادفی زاویه ورود سیگنال اخلاخل) پیشنهاد می‌گردد. از آنجاکه حداقل‌سازی متوسط توان تداخلی دریافتی، منجر به استفاده از متوسط آماری ماتریس کوواریانس اخلاخل در محاسبات وزن‌های شکل‌دهی پرتو خواهد شد، در این مقاله یک چارچوب کلی جهت محاسبه متوسط ماتریس کوواریانس اخلاخل و نحوه به‌کارگیری آن در محاسبه وزن‌های شکل‌دهی پرتو ارائه می‌گردد. در این چارچوب کلی با توجه به عدم وجود جواب بسته برای متوسط آماری ماتریس کوواریانس اخلاخل 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 پرتو ارائه می‌گردد. با فرض این‌که خطای زاویه‌سنجی سامانه شنود دارای توزیع نرمال با واریانس مشخص است، متوسط ماتریس کوواریانس اخلاخل محاسبه شده و با به‌کارگیری آن در محاسبه ضرایب شکل‌دهی پرتو، عمق نال متناسب با احتمال وقوع خطای زاویه‌سنجی پهن خواهد شد و همین موضوع به بهبود مقاومت الگوریتم MVDR کمک خواهد کرد. موضوعی که در این مقاله ارائه شده یکی از نوآوری‌های موجود در عرصه فناوری اطلاعات و ارتباطات می‌باشد و سه روش پیشنهادی برای بهبود عملکرد آن را مطرح می‌نماییم.

در بخش ۲، مدل یک سامانه مخابراتی چند آنتنه که از گزارش سامانه شنود برای طراحی شکل‌دهی پرتو استفاده می‌نماید و محاسبات مربوط به سیگنال به تداخل و نویز توضیح داده خواهد شد. در این بخش همچنین تأثیر خطادار بودن گزارش سامانه شنود بر روی روش‌های شکل‌دهی پرتو که اثر خطای زاویه ورود سیگنال اخلاخل را در نظر نمی‌گیرند بررسی خواهد شد. چارچوب روش پیشنهادی جهت مقاوم‌سازی شکل‌دهی پرتو 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 پرتو ارائه شده است. همچنین، کارایی روش پیشنهادی بر حسب سیگنال به تداخل و نویز خروجی شکل‌دهنده پرتو و

¹ Sidelobes level control

² Calibration

³ Electronic Support Measures

⁴ tracking

$$\bar{x}(k) = \bar{a}(\theta_0)s_0(k) + \bar{a}(\theta_j)s_j(k) + \sum_{\theta_{s_i} \in [\theta_{s-\min}, \theta_{s-\max}]} \bar{a}(\theta_{s_i})s_i(k) + \bar{n}(k) \quad (2)$$

$s_0(k)$ بیانگر سیگنال مطلوب، $s_j(k)$ سیگنال اخلاخل و $s_i(k)$ سیگنال تداخل داخلی فرعی و $\bar{n}(k) \in C^{M \times 1}$ معرف بردار نویز گوسی دریافتی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس $\sigma^2 I_{M \times M}$ 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 کلونین، B پهنای باند گیرنده و N_f عدد نویز گیرنده است. $\bar{a}(\theta_0)$ و $\bar{a}(\theta_j)$ و $\bar{a}(\theta_{s_i})$ به ترتیب بردار هدایت سیگنال مطلوب و بردار هدایت سیگنال اخلاخل و بردار هدایت تداخل داخلی فرعی می‌باشند. بردار هدایت آرایه‌های خطی یکنواخت را می‌توان به صورت زیر مدل کرد که با فرض صفحه‌ای بودن موج استخراج شده است.

$$\bar{a}(\theta) = [1, \exp\{j\xi \sin(\theta)\}, \dots, \exp\{j(M-1)\xi \sin(\theta)\}]^T \quad (3)$$

که در آن، $\xi = \frac{2\pi d}{\lambda}$ و λ معرف طول موج است. ماتریس کوواریانس بردار سیگنال دریافتی آرایه (با فرض مستقل بودن سیگنال مطلوب، سیگنال اخلاخل و سیگنال نویز) به صورت ذیل به دست می‌آید [۱۰]:

$$R = E\{\bar{x}\bar{x}^H\} = R_d + R_{J+n} + R_s \quad (4)$$

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

$$R_d = \sigma_0^2 \bar{a}(\theta_0) \bar{a}^H(\theta_0) \quad (5)$$

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

$$R_{J+n} = \sigma_J^2 \bar{a}(\theta_J) \bar{a}^H(\theta_J) + \sigma^2 I \quad (6)$$

که در آن، σ_J^2 معرف توان دریافتی سیگنال اخلاخل است. عبارت اول معرف ماتریس کوواریانس سیگنال اخلاخل و عبارت دوم معرف ماتریس کوواریانس نویز است. R_s ماتریس کوواریانس تداخل فرعی برابر است با:

$$R_s = \sum_{\theta_{s_i} \in [\theta_{s-\min}, \theta_{s-\max}]} \bar{a}(\theta_{s_i}) s_i(k) \sum_{\theta_{s_i} \in [\theta_{s-\min}, \theta_{s-\max}]} \bar{a}^H(\theta_{s_i}) s_i^H(k)$$

زاویه‌ای آن توسط سامانه شنود دشوارتر و احتمال خطای گزارش زاویه ورود اخلاخلگر محتمل‌تر از گزارش زاویه ورود سیگنال مطلوب است. در این مقاله روی عامل نویز حرارتی در خطای اندازه‌گیری زاویه اخلاخلگر 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 اخلاخلگر و محاسبات وزن‌های شکل‌دهی پرتو می‌تواند انجام شود و در این مدت جابجایی منابع سیگنال خیلی کم است). با توجه به زاویه ورود سیگنال مطلوب، زاویه ورود اخلاخلگر، بازه زاویه ورود تداخل فرعی، توان اخلاخلگر، توان تداخل فرعی و توان سیگنال مطلوب، بردار $\bar{w} \in C^{M \times 1}$ توسط الگوریتم شکل‌دهنده پرتو محاسبه می‌شود که شامل $\bar{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ می‌باشد. هر یک از درایه‌های بردار شکل‌دهی پرتو با نمونه‌های سیگنال دریافتی آنتن متناظر ضرب شده و سپس حاصل جمع وزنی دریافتی آنتن‌ها، خروجی شکل‌دهنده پرتو 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 دستیابی به نسبت سیگنال به تداخل و نویز مناسب در این مرحله است. پارامترهای طول موج و فاصله اِلمان‌ها به صورت دقیق مشخص می‌باشند و تنها گزارش زاویه ورود سیگنال اخلاخل دقیق نبوده و دارای خطا می‌باشد. البته لازم به ذکر است دقت تخمین توان سیگنال مطلوب، سیگنال تداخل فرعی و سیگنال تداخل تأثیر زیادی در کارایی نخواهد داشت.

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

$$y(k) = \bar{w}^H \bar{x}(k) \quad (1)$$

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

بردار سیگنال دریافتی را بر اساس بردار هدایت سیگنال مطلوب و بردار هدایت سیگنال تداخل می‌توان به صورت زیر نوشت:

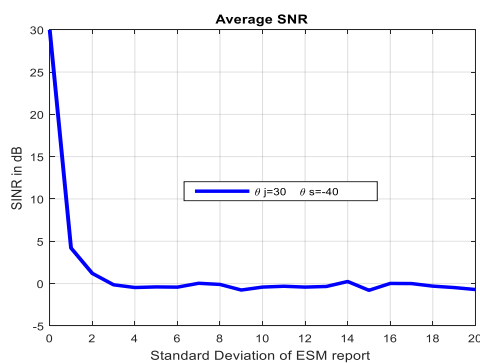
در این حالت آماره‌های خطا بسته به سیگنال به نویز شنودگر و عرض پرتو آنتن آن و روش پردازش آن قابل محاسبه است. این نوع خطای زاویه‌سنجی در هر بار گزارش سامانه شنود، یک متغیر تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس معلوم است که از سامانه‌ای به سامانه دیگر متفاوت است؛ بنابراین، می‌توان گزارش سامانه شنود در مورد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

$$\hat{\theta}_J = \theta_J + \theta_n \quad (11)$$

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 اخلاگر در زاویه ۳۰ درجه و زاویه تداخل فرعی را ۴۰- درجه با نسبت سیگنال به نویز $SNR = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}$ برابر با ۳۰ dB و

نسبت تداخل به نویز $INR = \frac{\sigma_J^2}{\sigma^2}$ برابر با ۷۰ dB در نظر

می‌گیریم. سپس به زاویه منبع اخلاگر 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 اخلاگر، ماتریس کوواریانس سیگنال اخلاگر به اضافه نویز محاسبه شده و همچنین با استفاده از ماتریس کوواریانس تداخل فرعی (R_s) و جایگذاری آن در رابطه (۱۰) بردار شکل‌دهی پرتو MVDR بر اساس زاویه خطادار محاسبه می‌شود. با جایگذاری بردار شکل‌دهی پرتو در رابطه (۸) مقدار سیگنال به تداخل و نویز (SINR) به دست می‌آید و ذخیره می‌گردد. این کار به ازای ۱۰۰ هزار بار تحقق تصادفی خطای گزارش زاویه سیگنال اخلا تکرار شده و متوسط SINR در این ۱۰۰ هزار بار رسم می‌گردد. این کار به ازای واریانس‌های مختلف خطای تخمین زاویه سیگنال اخلا تکرار می‌گردد. متوسط SINR بر حسب انحراف معیار خطای گزارش، σ_θ ، در شکل (۲) رسم شده است.

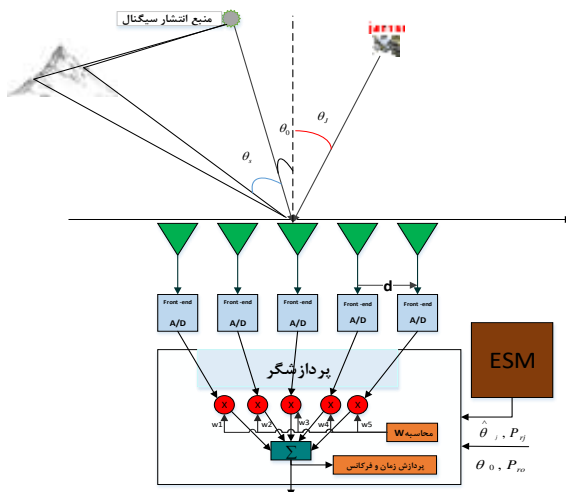


شکل (۲): نسبت سیگنال به نویز و تداخل خروجی شکل‌دهنده پرتو بر

² Signal to noise Ratio

³ Interference to Noise Ratio

(۷)



شکل (۱): ساختار گیرنده سامانه مخابراتی مبتنی بر شکل‌دهی پرتو بر

اساس گزارش سامانه پشتیبانی الکترونیکی

در این صورت، نسبت سیگنال به نویز و تداخل (SINR)^۱ بعد از شکل‌دهنده پرتو به صورت زیر به دست می‌آید.

$$SINR = \frac{\bar{w}^H R_s \bar{w}}{\bar{w}^H R_{J+n+s} \bar{w}} = \frac{\sigma_0^2 |\bar{w}^H \bar{a}(\theta_0)|^2}{\bar{w}^H R_{J+n} \bar{w} + \bar{w}^H R_s \bar{w}} \quad (8)$$

با توجه به تعریف نسبت سیگنال به نویز و تداخل، حداکثرسازی نسبت سیگنال به نویز و تداخل معادل حل مسئله بهینه‌سازی زیر است [۳]:

$$\begin{aligned} \bar{w}_{opt} &= \arg \min_{\bar{w}} \bar{w}^H R \bar{w} \\ \bar{w}^H \bar{a}(\theta_0) &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

قید $\bar{w}^H \bar{a}(\theta_0) = 1$ تضمین می‌کند که جهت پیک الگوی تشعشعی در راستای سیگنال مطلوب باشد. بردار شکل‌دهی پرتو بهینه بر اساس فرم بسته MVDR به صورت زیر به دست می‌آید [۳]:

$$\bar{w}_{MVDR} = \frac{1}{\bar{a}^H(\theta_0) R^{-1} \bar{a}(\theta_0)} R^{-1} \bar{a}(\theta_0) \quad (10)$$

در صورتی که خطایی از گزارش زاویه اخلاگر وجود نداشته باشد، با جایگزینی ماتریس کوواریانس در معادله (۱۰) جواب مسئله به دست آمده و سیگنال به نویز مناسبی ایجاد می‌نماید، ولی در واقعیت زاویه گزارش اخلاگر تصادفی بوده و احتمال خطا وجود دارد. حال فرض کنیم که راستای واقعی اخلاگر θ_r و گزارش سامانه شنود، $\hat{\theta}_r$ باشد، اغلب یک بخش مهمی از منابع خطای زاویه‌سنجی سامانه‌های شنود، نویز حرارتی و تفکیک‌پذیری محدود آنها است که وابسته به عرض پرتو آنتن شنودگر می‌باشد.

¹ Signal to Interference plus Noise Ratio

حسب انحراف معیار خطای گزارش ESM

می‌شود و از ماتریس کوواریانس داده دریافتی \hat{R}_x در رابطه (۹) استفاده می‌گردد.

$$\hat{R}_x = \frac{1}{K_s} \sum_{k=1}^{K_s} \bar{x}(k) \bar{x}^H(k) \quad (۱۲)$$

در این رابطه، K_s معرف تعداد مشاهدات یا همان تعداد نمونه‌های زمانی^۲ است. با توجه به این‌که روش مبتنی بر 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 شوند وجود ندارد؛ اما در عوض سخت‌افزار پیچیده‌تری جهت ذخیره‌سازی نمونه‌ها و محاسبه تخمین ماتریس کوواریانس داده نیاز است. علاوه بر این، وجود ماتریس کوواریانس سیگنال مطلوب در داخل ماتریس تخمینی در حالی که سیگنال تداخل خیلی قوی‌تر از سیگنال مطلوب نباشد الگوریتم را دچار مشکل خواهد کرد.

۳. روش پیشنهادی با کنترل سطح گلبرگ‌های فرعی

در این روش همانند سناریو عملیاتی واقعی که معمولاً یک دستگاه کمکی مانند سیستم پشتیبانی الکترونیکی (ESM) در اختیار داریم، می‌توانیم از اطلاعات زاویه ورود سیگنال‌ها که از طرف ESM گزارش شده‌اند، برای بهینه‌سازی وزن‌های شکل‌دهی پرتو استفاده نماییم. همان‌طور که می‌دانیم در مورد اطلاعات ESM مانند زوایای اخلاخلرها خطا وجود دارد که این موضوع کمتر در طراحی شکل‌دهی پرتو مورد توجه قرار گرفته است. پس اطلاعاتی که از زاویه اخلاخلر وجود دارد دارای خطا بوده، همچنین مشخص است مقدار واقعی زاویه اخلاخلر حول همین زاویه می‌باشد که مقدار واقعی را یک متغیر تصادفی با توزیع معلوم در نظر می‌گیریم، حال با فرض اینکه این توزیع مشخص است یک شکل‌دهی پرتوی طراحی می‌کنیم که با وجود این خطا، بهترین نتیجه را در برداشته باشد. از طرف دیگر همواره کمینه‌کردن دریافتی از یک جهات خاص (زاویه ورود اخلاخل)، منجر به افزایش سطح گلبرگ‌های فرعی پترن تشعشی خواهد شد. این موضوع در خیلی از سیستم‌های مخابراتی موجب کاهش کارایی سیستم خواهد شد. مثلاً در رادارها افزایش سطح گلبرگ‌های فرعی موجب افزایش سطح سیگنال کلاتر خواهد شد که عملکرد رادار را تضعیف خواهد کرد و یا در سیستم‌های مخابراتی دریافت انعکاس سیگنال از جهات‌های مختلف که تحت عنوان چند مسیری شناخته می‌شود باعث فیدینگ یا اعوجاج سیگنال خواهد شد. به همین منظور علاوه بر ملاحظات خطای زاویه ورود

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 ۲۵ dB افت پیدا خواهد کرد که عدد بسیار بزرگی است و در عمل خطای زاویه‌سنجی سامانه ششود هم بیشتر از ۱ درجه است. افزایش انحراف معیار خطای زاویه‌سنجی به ۴ درجه باعث افت نسبت سیگنال به نویز و تداخل حدود ۳۰ dB خواهد شد. لذا در عمل، کارایی شکل‌دهی پرتو به روش MVDR خیلی حساس به خطای تخمین زاویه اخلاخلر 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 اخلاخلر در منطقه نال پهن شده قرار گیرد پیشنهاد شده است که اطراف گزارش دریافتی محل اخلاخلر، چندین منبع اخلاخلر فرض شود. با اضافه کردن منابع اخلاخلر مجازی در زوایای اطراف گزارش، ماتریس همبستگی اخلاخلر که تاکنون فقط براساس زاویه گزارش شده سامانه ششود تشکیل داده می‌شود، تغییر خواهد کرد. این روش پیشنهادی باعث گسترش منطقه نال اطراف زاویه گزارش سامانه ششود خواهد شد به طوری که احتمال قرارگیری زاویه واقعی اخلاخلر در این منطقه بسیار افزایش می‌یابد. در این روش، در منطقه وسیع-تری از اطراف منبع مطلوب اگر اخلاخلر 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 اخلاخلرهای مجازی در اطراف گزارش سامانه ششود را یکسان در نظر می‌گیرد و هیچ طرحی در مورد نحوه انتخاب تعداد منابع اخلاخلر مجازی، فاصله زاویه‌ای آنها و وزن ترکیب ماتریس کوواریانس آنها ارائه نمی‌دهد.

در روش مبتنی بر داده که در مرجع [۱۰] تحت عنوان الگوریتم SMI^۱ بررسی شده است، با استفاده از نمونه‌های سیگنال دریافتی آرایه، ماتریس کوواریانس سیگنال دریافتی که شامل ماتریس کوواریانس سیگنال مطلوب به‌اضافه ماتریس کوواریانس سیگنال تداخل به‌اضافه ماتریس کوواریانس نویز است تخمین زده

^۲ Snapshot numbers

^۱ Sample Matrix Inversion

واقعی اخلاخل در دسترس نبود به ناچار از محدوددهای خاص (مثل جهت یک تپه یا زمین) را کنترل نماییم تا سطح این نوع اخلاخل‌ها نیز مدیریت شود. اگر فرض نماییم که زاویه منبع سیگنال مطلوب و راستاهای تداخل فرعی وجود دارد و زاویه منبع سیگنال تداخل با خطا توسط ESM (معمولاً ESM اطلاعات سیگنال‌های دشمن را در اختیار قرار می‌دهد و اطلاعات سیگنال مطلوب را خود گیرنده بادقت بالایی استخراج می‌نماید) فراهم شده باشد در این صورت وزن‌های شکل‌دهنده پرتو بر اساس حل مسئله بهینه‌سازی حداکثرسازی نسبت سیگنال به نویز و تداخل، به دست می‌آید.

$$\bar{R}_J = E_{\theta_J | \hat{\theta}_J} \{R_J\} \quad (15)$$

$$= \int R_J(\theta_J) f_{\theta_J | \hat{\theta}_J}(\theta_J | \hat{\theta}_J) d\theta_J$$

اگر درایه‌های ماتریس $R_J(\theta_J)$ را در نظر بگیریم درایه سطر i ام و ستون k ام عبارتی به صورت $\exp(j(i-k)\zeta \sin(\theta_J))$ خواهد بود که برای محاسبه امید ریاضی ماتریس کوواریانس، باید از اینگونه عبارات‌ها روی تابع چگالی احتمال شرطی θ_J ، امید ریاضی گرفته شود.

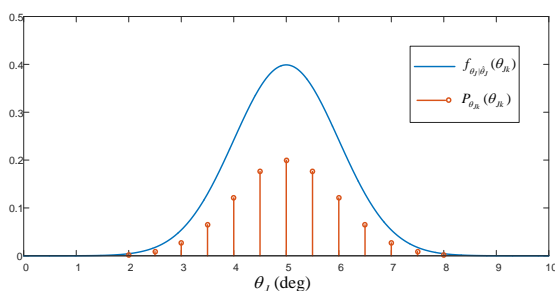
$$E\{\exp(jl\zeta \sin(\theta_J))\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{jl\zeta \sin(\theta_J)} f_{\theta_J | \hat{\theta}_J}(\theta_J) d\theta_J$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{jl\zeta \sin(\theta_J)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta_J}} e^{-\frac{(\theta_J - \hat{\theta}_J)^2}{2\sigma_{\theta_J}^2}} d\theta_J \quad (16)$$

مطابق جستجوهای 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 گزارش‌های سامانه نشود 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 به-

ازای $K+1$ مقدار از θ_J در اطراف $\hat{\theta}_J$ در نظر می‌گیریم اما 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.



سیگنال اخلاخلگر، در نظر داریم سطح گلبرگ‌های فرعی در یک محدوده‌های خاص (مثل جهت یک تپه یا زمین) را کنترل نماییم تا سطح این نوع اخلاخل‌ها نیز مدیریت شود. اگر فرض نماییم که زاویه منبع سیگنال مطلوب و راستاهای تداخل فرعی وجود دارد و زاویه منبع سیگنال تداخل با خطا توسط ESM (معمولاً ESM اطلاعات سیگنال‌های دشمن را در اختیار قرار می‌دهد و اطلاعات سیگنال مطلوب را خود گیرنده بادقت بالایی استخراج می‌نماید) فراهم شده باشد در این صورت وزن‌های شکل‌دهنده پرتو بر اساس حل مسئله بهینه‌سازی حداکثرسازی نسبت سیگنال به نویز و تداخل، به دست می‌آید.

۳-۱. کمینه‌سازی مجموع جمینگ و تداخل گلبرگ فرعی با وجود خطای زاویه‌سنجی ESM (MJSI)^۱

همان‌طور که قبلاً مطرح کردیم به دنبال بیشینه‌کردن SINR هستیم که از رابطه ذیل به دست می‌آید.

$$SINR = \frac{\bar{w}^H R_d \bar{w}}{\bar{w}^H R_{J+n+S} \bar{w}} = \frac{\sigma_0^2 |\bar{w}^H a(\theta_0)|^2}{\bar{w}^H \bar{R}_{J+n+S} \bar{w}} = \frac{\sigma_0^2 |\bar{w}^H a(\theta_0)|^2}{\bar{w}^H \bar{R}_{J+n} \bar{w} + \sum_k \sigma_s^2 |\bar{w}^H a(\theta_s)|^2} \quad (13)$$

قبل از تشریح مسئله بالا، ابتدا با تحلیل ریاضی یکی از عامل کاهش کارایی که همان خطای تخمین زاویه ورود سیگنال اخلاخل در سامانه نشود است، چارچوبی ریاضی برای مقاوم‌سازی شکل‌دهی پرتو در سامانه مخابراتی ارائه خواهیم داد.

ازآنجا که مدل خطای گزارش زاویه‌سنجی سامانه نشود بر اساس تابع چگالی احتمال گوسی با واریانس مشخص (بر اساس مشخصات سامانه نشود) است لذا داریم:

$$\hat{\theta}_J = \theta_J + \theta_n \Rightarrow \theta_J = \hat{\theta}_J - \theta_n \quad (14)$$

در این صورت 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 نشود، در مسئله MVDR یا همان مسئله کاهش سطح سیگنال تداخل و نویز در خروجی شکل‌دهنده پرتو به جای تابع هدف $\bar{w}^H R_{J+n} \bar{w}$ (که این تابع هدف به دلیل نداشتن زاویه واقعی اخلاخلگر در دسترس نیست و در روش MVDR وقتیکه زاویه

¹ Minimum Jamming and Side lobe Interference

$$\bar{w}_{proposed} = \frac{1}{\bar{a}^H(\theta_0)(\bar{R}_{J+n} + R_s) \bar{a}(\theta_0)} \bar{R}_{J+n}^{-1} (\bar{R}_{J+n} + R_s) \bar{a}(\theta_0) \quad (24)$$

وقتی که سامانه شود وجود چندین منبع اخلاخلگر داخل باند N_J منبع اخلاخلگر را گزارش نماید، به راحتی می‌توان الگوریتم پیشنهادی را به شکل زیر تعمیم داد. برای منبع اخلاخل i ام مشابه روش پیشنهادی بالا امید ریاضی ماتریس کوواریانس محاسبه می‌گردد.

$$\bar{R}_{Ji}(\hat{\theta}_{Ji}) = \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Ji,k}}(\theta_{Ji,k}) R_J(\theta_{Ji,k}) \quad (25)$$

$$= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Ji,k}}(\theta_{Ji,k}) \sigma_{J,i}^2 \bar{a}(\theta_{Ji,k}) \bar{a}^H(\theta_{Ji,k})$$

و سپس \bar{R}_J مورد نیاز در روش پیشنهادی (برای رابطه (۲۲)) را می‌توانیم به صورت زیر محاسبه نماییم.

$$\bar{R}_J = \sum_{i=1}^{N_J} \bar{R}_{Ji}(\hat{\theta}_{Ji}) \quad (26)$$

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



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

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

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

$$P(\hat{\theta}_J - 3\sigma_\theta \leq \theta_J \leq \hat{\theta}_J + 3\sigma_\theta) = 1 - 2Q(3) \cong 0.99 \quad (17)$$

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

$$\Delta\theta = \frac{6\sigma_\theta}{K} \ll \Delta\theta_{min} \quad (18)$$

که در این رابطه، $\Delta\theta_{min}$ معرف عرض پرتو آرایه بوده و وابسته به ، تعداد المان و فاصله بین المانها d است. از طرفی عرض پرتو نیز از رابطه ذیل به دست می‌آید [۱۲].

$$\Delta\theta_{min} = \frac{2}{d} \cdot \frac{\lambda}{M} \quad (19)$$

در این صورت زوایای گسسته به شکل زیر انتخاب می‌شوند.

$$\theta_{Jk} = \hat{\theta}_J + k \cdot \Delta\theta, \quad k = -\frac{K}{2}, \dots, \frac{K}{2} \quad (20)$$

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

$$P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) = \frac{f_{\theta_J, \hat{\theta}_J}(\theta_{Jk})}{\sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} f_{\theta_J, \hat{\theta}_J}(\theta_{Jk})} \quad k = -\frac{K}{2}, \dots, \frac{K}{2} \quad (21)$$

در رابطه 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 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{R}_J(\hat{\theta}_J) = \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) R_J(\theta_{Jk}) \quad (22)$$

$$= \sum_{k=-\frac{K}{2}}^{\frac{K}{2}} P_{\theta_{Jk}}(\theta_{Jk}) \sigma_{Jk}^2 \bar{a}(\theta_{Jk}) \bar{a}^H(\theta_{Jk})$$

بعد از محاسبه امید ریاضی ماتریس همبستگی تداخل، ماتریس همبستگی تداخل و نویز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{R}_{J+n} = \bar{R}_J(\hat{\theta}_J) + \sigma^2 I \quad (23)$$

سپس بر اساس رابطه (۱۰) و با جایگذاری \bar{R}_{J+n} به جای R_{J+n} بردار بهینه شکل‌دهی پرتو محاسبه می‌شود.

(۳۱)

برای برآورده‌سازی فیود مسئله، کافی است مقادیر λ و ξ_i ها در دستگاه معادلات ذیل صدق نمایند:

$$w^H \bar{a}(\theta_0) = -\frac{1}{2} (\lambda^* \bar{a}^H(\theta_0) + \sum_k \xi_k^* \bar{a}^H(\theta_{s_k})) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_0) = 1$$

$$w^H \bar{a}(\theta_{s_i}) = -\frac{1}{2} (\lambda^* \bar{a}^H(\theta_0) + \sum_i \xi_i^* \bar{a}^H(\theta_{s_i})) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_{s_i}) = 0, \quad (32)$$

معادلات (۳۲) بیانگر یک دستگاه معادلات خطی $L+1$ متغذله و $L+1$ مجهول می‌باشد، به عبارتی یک مجهول λ و L مجهول ξ_i ها می‌باشند. در صورتیکه معادلات را بر حسب ضرایب مجولات و معلومات مرتب نماییم میتوانیم دستگاه معادلات خطی را به شکل ماتریسی (۳۳) بیان نماییم. برای حل دستگاه معادلات خطی (۳۳) می‌توان از روش معکوس ماتریس ضرایب استفاده نمود.

$$-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \bar{a}(\theta_0)^H \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_0) & \bar{a}^H(\theta_{s_1}) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_0) & \dots \\ \bar{a}^H(\theta_0) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_{s_1}) & \bar{a}^H(\theta_{s_1}) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_{s_1}) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \bar{a}^H(\theta_0) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_{s_L}) & \bar{a}^H(\theta_{s_L}) \bar{R}_{J+n}^{-1} \bar{a}(\theta_{s_L}) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

پس از به‌دست‌آوردن مجهول‌ها که همان ضرایب لاگرانژ هستند، می‌توان ضریب وزنی شکل‌دهی پرتو را از فرمول اصلی (۳۱) به دست آورد.

۳-۳. کمینه‌سازی تداخل فرعی و نال کردن جمینگ با وجود خطای زاویه‌سنجی (MSINJ) ESJ

در این حالت برای بیشینه‌کردن SINR خروجی، توان تداخل دریافتی از زوایای مربوط به تداخل فرعی را کمینه می‌نماییم و سعی می‌کنیم شکل‌دهی پرتو را به گونه‌ای انجام دهیم که نال پرتو در راستای تداخل دریافتی از اخلاگر و نویز باشد که معادل مساله بهینه‌سازی مقید زیر می‌باشد. برای این کار می‌توان مسئله بهینه‌سازی را براساس کمینه‌کردن $\bar{w}^H \bar{R}_s \bar{w}$ و صفرکردن $\bar{w}^H \bar{R}_{J+n} \bar{w}$ از طریق فیود ذیل تعریف نمود:

$$\bar{w}_{opt} = \arg \min_{\bar{w}} \bar{w}^H \bar{R}_s \bar{w}$$

$$\bar{w}^H \bar{a}(\theta_0) = 1$$

$$\bar{w}^H \bar{a}(\theta_{JK}) = 0, \quad k = 1, \dots, L \quad (34)$$

۲-۳. کمینه‌سازی جمینگ و نال کردن تداخل فرعی با وجود خطای زاویه‌سنجی (MJNSI) ESJ

در این حالت برعکس روش MJSI برای بیشینه‌کردن SINR خروجی، مجموع تداخل اخلاگر و نویز را کمینه می‌نماییم و سعی می‌کنیم شکل‌دهی پرتو را به گونه‌ای انجام دهیم که نال پرتو در راستای زوایای مربوط به تداخل فرعی باشد که معادل مسئله بهینه‌سازی مقید زیر و اعمال قید لازم جهت کنترل گلبرگ‌های فرعی می‌باشد.

$$\bar{w}_{opt} = \arg \min_{\bar{w}} \bar{w}^H \bar{R}_{J+n} \bar{w}$$

$$\bar{w}^H \bar{a}(\theta_0) = 1$$

$$\bar{w}^H \bar{a}(\theta_{s_i}) = 0, \quad i = 1, \dots, L \quad (27)$$

$\bar{a}(\theta_{s_i})$ بردار هدایت زوایای تداخل فرعی و به تعداد L زاویه در بازه $[\theta_{s-\min}, \theta_{s-\max}]$ می‌باشد که مقدار L به گونه‌ای انتخاب می‌شود که رابطه (۲۸) برقرار گردد:

$$(28) \frac{\theta_{s-\max} - \theta_{s-\min}}{L} \ll \Delta \theta_{\min}$$

جهت کنترل سطح گلبرگ‌های فرعی و جلوگیری از تخریب سیگنال دریافتی لازم است مسئله بهینه‌سازی (۲۷) را تحلیل نماییم.

مسئله بهینه‌سازی (۲۷) را می‌توان در فرم بسته با استفاده از روش لاگرانژ حل کرد. برای مسئله تابع لاگرانژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(w, \lambda, \{\xi_i\}) = w^H \bar{R}_{J+n} w + \lambda (w^H \bar{a}(\theta_0) - 1) + \sum_{i=1}^L \xi_i w^H \bar{a}(\theta_{s_i}) \quad (29)$$

که ضریب لاگرانژ متناسب با قید اول مسئله و ξ_i ها ضرایب لاگرانژ مربوط به قیود سطح گلبرگ‌های فرعی است، با صفر قراردادن گرادیان لاگرانژ و اعمال شرایط KKT داریم [۱۱].

$$\nabla_w L(w, \lambda, \{\xi_i\}) = 2 \bar{R}_{J+n} w + \lambda \bar{a}(\theta_0) + \sum_i \xi_i \bar{a}(\theta_{s_i}) = 0 \quad (30)$$

که می‌توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد:

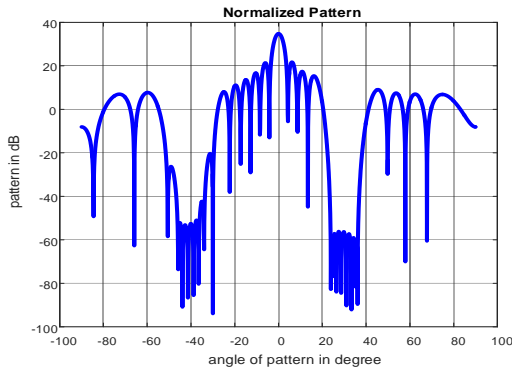
$$w = -\frac{1}{2} \bar{R}_{J+n}^{-1} (\lambda \bar{a}(\theta_0) + \sum_k \xi_k \bar{a}(\theta_{s_k}))$$

² Minimum Side lobe Interference and Nulling Jamming

¹ Minimum Jamming and Nulling Side lobe Interference

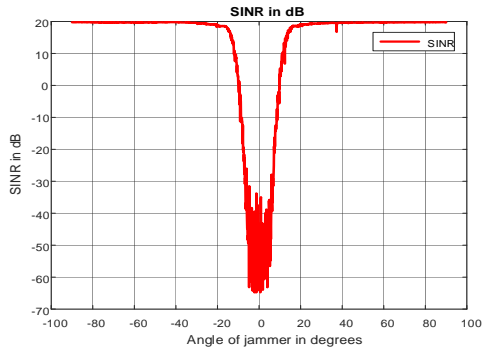
که در این شبیه‌سازی $\Delta\theta=1$ درجه و k اعداد صحیح از ۶ تا ۶ انتخاب شده است.

سپس هر یک از روش‌های پیشنهادی بردار شکل‌دهی پرتو گیرنده را بر اساس چارچوب تعریف شده برای آن روش محاسبه می‌نماید. سپس الگوی تشعشعی بردار شکل‌دهی پرتو محاسبه شده و متوسط نسبت سیگنال به مجموع تداخل هر یک از روش‌ها بر حسب محل اخلاخلر رسم می‌گردد. برای محاسبه متوسط نسبت سیگنال به مجموع تداخل از متوسط‌گیری روی ۱۰۰۰ بار تحقق تصادفی گزارش ESM استفاده شده است. در شکل (۵) الگوی تشعشعی شکل‌دهنده پرتو روش MJSI بر حسب زوایای مختلف نمایش داده شده است.



شکل (۵): الگوی تشعشعی روش MJSI بر حسب زوایای مختلف

همان‌طور که در شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد نال در جهت اخلاخلر مناسب بوده و همچنین سطح گلبرگ‌های فرعی تحت کنترل و پایین بوده و شرایط مطلوبی را ایجاد کرده است. در شکل (۶) متوسط SINR از متوسط‌گیری روی ۱۰۰۰ بار تحقق تصادفی گزارش ESM به ازای هر زاویه اخلاخلر به دست آمده است.



شکل (۶): SINR خروجی روش MJSI بر حسب زاویه اخلاخلر

برای محاسبه ماتریس کوواریانس تداخل فرعی می‌توان مشابه تخمین ماتریس کوواریانس سیگنال اخلاخل به علاوه نویز عملکرد.

$$\bar{R}_S = \sum_{i=1}^q \sigma_i^2 \bar{a}(\theta_{s_i}) \bar{a}^H(\theta_{s_i}) + \sigma^2 I \quad (35)$$

$$\hat{\theta}_J - 3\sigma_\theta \leq \theta_J \leq \hat{\theta}_J + 3\sigma_\theta$$

$$\theta_{JK} \leq \hat{\theta}_J - 3\sigma + (K-1) \frac{6\sigma(\theta)}{L}$$

\bar{R}_S ماتریس کوواریانس تداخل فرعی می‌باشد. می‌توان برای حل مسئله، همانند راه‌حل مسئله بهینه‌سازی (۲۷) بقیه موارد را به طور مشابه با آن به کاربرد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد روش‌های پیشنهادی و کارایی آنها در کاهش اثر اخلاخلر و تداخل فرعی از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است. یک آرایه خطی با ۳۰ المان که فاصله بین المان‌ها $\frac{\lambda}{2}$ و نسبت سیگنال به نویز $SNR=20dB$ و نسبت تداخل به نویز $JNR=70dB$ در نظر گرفته شده است که معادل تداخل به سیگنال^۱ $SR=\frac{\sigma_J^2}{\sigma_0^2}=50dB$ و نسبت تداخل فرعی به نویز^۲ $CNR=\frac{\sigma_C^2}{\sigma^2}=70dB$ است.

یک منبع سیگنال مطلوب در زاویه صفر درجه و یک اخلاخلر در زاویه ۳۰ درجه فرض می‌شوند و زوایای تداخل فرعی در محدوده [۳۴- و -۴۶] درجه می‌باشد. فرض که زاویه اخلاخلر از طریق یک سامانه ESM با خطای مبتنی بر مدل تصادفی گوسی میانگین صفر و با انحراف معیار ۲ درجه در اختیار است.

از طرفی فرض می‌کنیم که می‌خواهیم یک منطقه ۱۲ درجه‌ای حول $\hat{\theta}_S$ را به عنوان محل مهم گلبرگ‌های فرعی کنترل نماییم. حال θ_{JK} ها و θ_{SK} را براساس رابطه ذیل بیان می‌نماییم:

$$\theta_{SK} = \hat{\theta}_S + k\Delta\theta \quad (36)$$

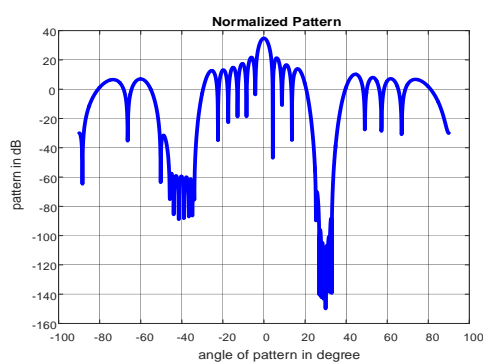
$$\theta_{JK} = \hat{\theta}_J + k\Delta\theta$$

¹ Interference to Signal Ratio

² Clutter -to Noise ratio

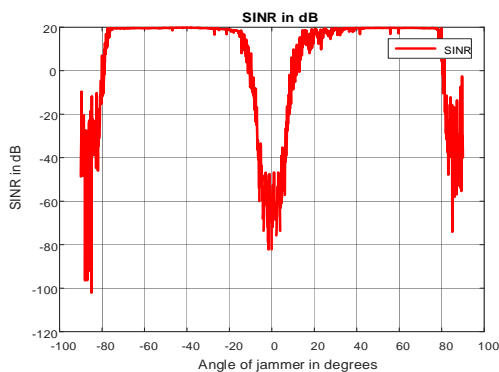
شکل (۸) مقدار سیگنال به نویز و تداخل بعد از شکل‌دهنده پرتو را برحسب محل منبع اخلاگر نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای زوایای بیشتر از ۴۰ درجه و کمتر از ۴۰- درجه از محل منبع مطلوب، SINR تقریباً برابر SNR شده است و وقتی موقعیت اخلاگر به موقعیت منبع مطلوب از نظر زاویه‌ای نزدیک می‌گردد SINR تا حدود ۶۵dB- افت پیدا خواهد کرد.

الگوی تشعشی شکل‌دهنده پرتو روش MSINJ برحسب زوایای مختلف در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل (۹): الگوی تشعشی روش MSINJ برحسب زوایای مختلف

همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد نال خوبی در ۳۰ درجه وجود دارد همچنین سطح گلبرگ‌های فرعی پایین بوده و شرایط مطلوبی را ایجاد کرده است. برای به دست آوردن خروجی SINR در این روش و مقایسه آن با روش‌های دیگر زاویه منبع اخلاگر را از ۹۰- درجه تا ۹۰ درجه در نظر می‌گیریم و خروجی آن به دست می‌آوریم.

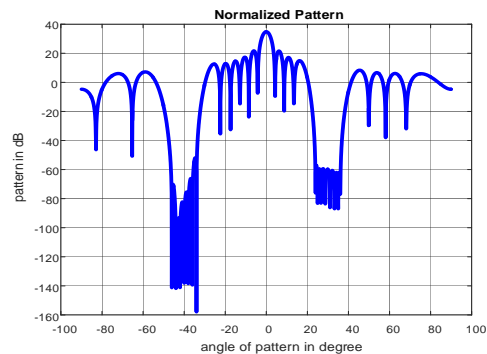


شکل (۱۰): SINR خروجی روش MSINJ برحسب زوایای اخلاگر

شکل (۱۰) مقدار سیگنال به نویز و تداخل بعد از شکل‌دهنده پرتو را برحسب محل منبع اخلاگر نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای زوایای بیشتر از ۴۰ درجه و کمتر از

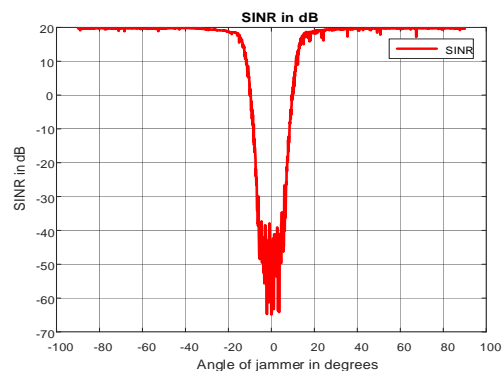
همان‌طور که در شکل (۶) می‌توان مشاهده کرد SINR خروجی شرایط مطلوبی را ایجاد کرده است و در نقاطی که اخلاگر و هدف فاصله زاویه‌ای کافی دارند SINR خروجی در حد SNR بوده، همچنین وقتی موقعیت اخلاگر به موقعیت منبع مطلوب از نظر زاویه‌ای نزدیک می‌گردد SINR تا حدود ۶۵dB- افت پیدا خواهد کرد.

برای ارزیابی روش MJNSI یک آرایه مشابه روش MJSI و با زوایای تداخل فرعی در بازه [۳۶- و ۴۶-] درجه در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه زاویه اخلاگر از طریق یک سامانه ESM با خطای مبتنی بر مدل تصادفی گوسی میانگین صفر و با انحراف معیار ۲ درجه در اختیار است. در این شبیه‌سازی $\Delta\theta=1$ درجه و k اعداد صحیح از ۶- تا ۶ انتخاب شده است. الگوی تشعشی شکل‌دهنده پرتو روش MJNSI برحسب زوایای مختلف در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۷): الگوی تشعشی روش MJNSI برحسب زوایای مختلف

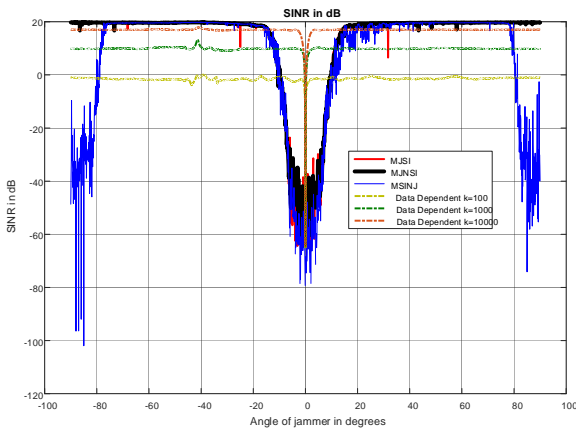
همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد پهنای نال خوبی را حول زاویه ۳۰ درجه و اطراف آن ایجاد شده، همچنین سطح گلبرگ‌های فرعی در اطراف زاویه ۴۰- درجه هم نسبتاً پایین بوده و شرایط مطلوبی را فراهم می‌آورد. برای به دست آوردن خروجی SINR در این روش و مقایسه آن با روش‌های دیگر زاویه منبع اخلاگر را از ۹۰- درجه تا ۹۰ درجه تغییر می‌دهیم و خروجی آن به صورت ذیل به دست می‌آید.



شکل (۸): SINR خروجی روش MJNSI برحسب زوایای اخلاگر

اخلاص‌گر بوده و در روش MJNSI نال پهن شده است، با توجه به آن به نظر می‌رسد شکل الگوی تشعشعی روش پیشنهادی MJNSI به مراتب بهتر از روش مبتنی بر داده می‌باشد.

حال سه روش پیشنهادی را با روش مبتنی بر داده از لحاظ خروجی SINR شکل‌دهنده پرتو، برای حالتی که انحراف معیار خطای زاویه‌ای ESM، ۲ درجه و طول بازه ۱۲ درجه‌ای حول $\hat{\theta}_s$ را به عنوان محل مهم گلبرگ‌های فرعی در نظر گرفته‌ایم و با تعداد نمونه‌های زمانی ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مقایسه می‌نماییم.



شکل (۱۲): مقایسه SINR خروجی سه روش MJNSI، MJNSI، MSINJ و روش مبتنی بر داده در تعداد نمونه‌های زمانی متفاوت

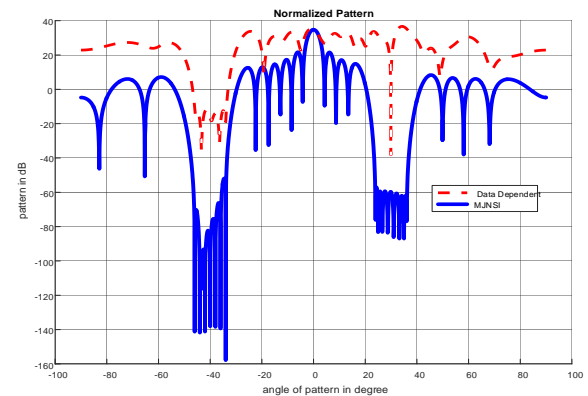
همان‌طور که در شکل (۱۲) می‌توان مشاهده کرد SINR خروجی روش MJNSI (سیاه‌رنگ) نسبت به روش MJNSI (قرمز-رنگ) و MSINJ (آبی‌رنگ) و روش مبتنی بر داده شریط بهتری را داشته است روش MSINJ به خاطر آن که نال انداختن در زاویه نزدیک به ۹۰ یا ۹۰- کار بسیار سختی برای آرایه است در گوشه‌ها شرایط مطلوبی ندارد. روش مبتنی بر داده خیلی به تعداد نمونه‌های زمانی وابسته می‌باشد بگونه‌ای که به‌ازای ۱۰۰ نمونه حدود ۲۰ دسی بل حتی با افزایش تعداد نمونه‌های زمانی به ۱۰۰۰۰ هم حدود ۳ دسی بل کمتر از روش پیشنهادی است که به SINR، ۲۰dB دست می‌یابد.

حال سه روش پیشنهادی را با روش مبتنی بر داده از لحاظ خروجی SINR شکل‌دهنده پرتو، برای حالتی که انحراف معیار خطای زاویه‌ای ESM، ۱ درجه و طول بازه ۶ درجه‌ای حول $\hat{\theta}_s$ را به عنوان محل مهم گلبرگ‌های فرعی در نظر گرفته‌ایم و با تعداد نمونه‌های زمانی ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مقایسه می‌نماییم.

۴۰- درجه از محل منبع مطلوب، SINR تقریباً برابر SNR شده و وقتی موقعیت اخلاص‌گر به موقعیت منبع مطلوب از نظر زاویه‌ای نزدیک می‌گردد SINR تا حدود ۸۰dB- افت پیدا خواهد کرد و شرایط بدتری نسبت به روش اول پیدا می‌کند، همچنین در نقاط خیلی دورتر از منبع سیگنال به دلیل عدم پوشش آرایه آنتن خروجی SINR مطلوب نمی‌باشد که روندی طبیعی می‌باشد و این به خاطر آن است که نال انداختن در زاویه نزدیک به ۹۰ یا ۹۰- کار بسیار سختی برای آرایه است.

برای مقایسه عادلانه روش‌های پیشنهادی، سه روش ارائه شده را با روش مبتنی بر داده مقایسه می‌نماییم. در شکل‌دهی پرتو مبتنی بر داده، با توجه به اینکه رفتار منبع اخلاص و منبع مطلوب در سیگنال دریافتی قابل‌استخراج است می‌توان از ماتریس همبستگی به دست آمده از خود داده‌های دریافتی برای تعیین شکل‌دهی پرتو استفاده کرد. آماره ماتریس همبستگی روش مبتنی بر داده از رابطه (۱۲) محاسبه شده و بر اساس رابطه (۱۰) بردار وزنی آن به دست می‌آید [۱۰].

برای مقایسه در شکل (۱۱) پرتو تشکیل شده در روش MJNSI و پرتو تشکیل شده در روش مبتنی بر داده با ۱۰۰ نمونه زمانی مطابق شرایط یکسان اشاره شده قبلی، برحسب زوایای مختلف نشان داده شده است.



شکل (۱۱): مقایسه الگوی تشعشعی روش MJNSI و روش مبتنی بر داده به ازای ۱۰۰ نمونه زمانی

با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌کنیم عمق نال در محدوده گلبرگ فرعی روش MJNSI تقریباً ۱۴۰dB- بوده؛ ولی روش مبتنی بر داده ۲۵dB- می‌باشد و عمق نال در منطقه اخلاص‌گر روش MJNSI تقریباً ۸۰dB- بوده؛ ولی روش مبتنی بر داده ۴۰dB- می‌باشد و نال در روش مبتنی بر داده دقیقاً روی محل

همان‌طور که در شکل (۱۴) می‌توان مشاهده کرد با تعیین بازه ۱۸ درجه می‌توان مشاهده کرد SINR خروجی روش MJNSI روش MJSI، MSINJ و روش مبتنی بر داده شریط بهتری را داشته است و روش MSINJ در گوشه‌ها شرایط بدتری دارد. روش مبتنی بر داده حتی با افزایش تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه زمانی هم به مقدار SNR، ۲۰dB دست نمی‌یابد.

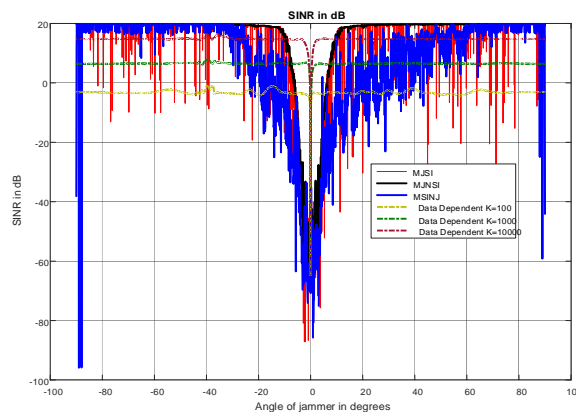
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جهت‌دهی پرتو بر اساس مشخصات سامانه پشتیبانی الکترونیکی پیشنهاد شده است که بر اساس میزان خطای زاویه‌سنجی سامانه پشتیبانی الکترونیکی به‌گونه‌ای بردار شکل‌دهی پرتو را محاسبه می‌نماید که امید ریاضی تداخل دریافتی کمینه گردد. در ادامه بر اساس اطلاعاتی که از زوایای تداخل فرعی داریم سعی می‌نماییم سطح الگوی تشعشعی در یک منطقه زاویه‌ای خاص را کنترل نماییم تا سیگنال تداخل زیادی از آن سمت دریافت ننماییم. برای این موضوع سه استراتژی مختلف برای تنظیم وزن‌های شکل‌دهی پرتو پیشنهاد می‌گردد که بر اساس آنها سه مسئله بهینه‌سازی وزن‌های شکل‌دهنده پرتو تعریف و حل می‌گردد. با شبیه‌سازی‌های انجام شده و مقایسه SINR خروجی سه روش پیشنهادی با روش مبتنی بر داده می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی MJNSI نسبت به روش‌های پیشنهادی MJSI، MSINJ و روش مبتنی بر داده در بازه‌های متفاوت شرایط بهتری را ایجاد می‌کند و تقریباً هر سه روش پیشنهادی می‌توانند جمینگ و تداخل دریافت شده از گلبرگ‌های فرعی را آن‌قدر کاهش دهند که به SINR در حد دست یابیم. ولی روش مبتنی بر داده برای دستیابی به شرایط مطلوب نیاز به افزایش بسیار زیاد تعداد نمونه زمانی دارد که این موضوع از لحاظ حجم حافظه و پیچیدگی محاسباتی یک چالش محسوب می‌شود. همچنین می‌توان گفت وقتی در محیطی هستیم که اخلاگر و انعکاس‌هایی از جنس سیگنال خودی مانند پدیده چند مسیری و غیره وجود دارد، با تکنیک ارائه شده در این مقاله می‌توانیم به طور هم‌زمان با تمامی این سیگنال‌های مزاحم مقابله نماییم و سیستم ارتباطی باکیفیت سیگنال به نوبز مناسب را ارائه دهیم.

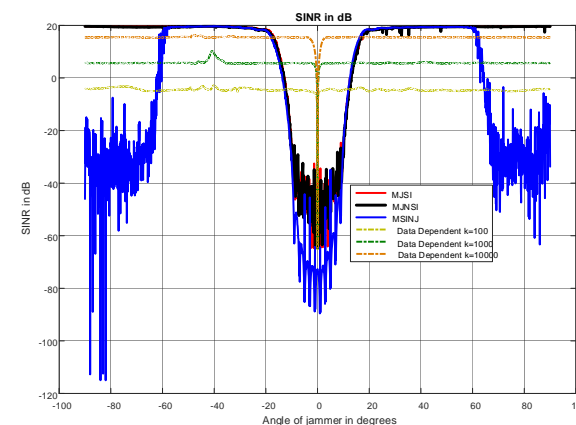
۶. مراجع

[1] M. Sargazi Moghaddam and kh. Sadeghi, "Beam forming and DOA estimation in smart antenna systems," Faculty and Research Institute of Electrical, sharif university, 2007. (In Persian).

[2] F. Samsami-Khodadad and F. Nazari, "A Novel and Efficient DS/CDMA Direction of Arrival Algorithm for Multipath Fading



شکل (۱۳): مقایسه SINR خروجی سه روش MJNSI، MJNSI، MSINJ و روش مبتنی بر داده در تعداد نمونه‌های زمانی متفاوت همان‌طور که در شکل (۱۳) می‌توان مشاهده کرد SINR خروجی روش MJNSI نسبت به روش MSINJ، MJNSI و روش مبتنی بر داده شریط بهتری را داشته است به خاطر آن که نال‌انداختن در زاویه نزدیک به ۹۰ یا -۹۰ کار بسیار سختی برای آرایه است در گوشه‌ها شرایط مطلوبی ندارد و در نزدیکی هدف عمق نال -۸۵dB ایجاد شده است. روش مبتنی بر داده حتی با افزایش تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه زمانی هم به مقدار SNR، ۲۰dB دست نمی‌یابد. در مقایسه به شکل (۱۲)، روش مبتنی بر داده چون کارایی آن وابسته به گزارش سیستم پشتیبانی الکترونیکی و خطای آن نیست تغییر محسوسی ندارد. حال سه روش پیشنهادی را با روش مبتنی بر داده از لحاظ SINR خروجی شکل‌دهنده پرتو، را برای حالتی که انحراف معیار خطای زاویه‌ای ESME، ۳ درجه و طول بازه ۱۸ درجه‌ای حول $\hat{\theta}_s$ به عنوان محل مهم گلبرگ‌های فرعی در نظر گرفته‌ایم، با تعداد نمونه‌های زمانی ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ مقایسه می‌نماییم.



شکل (۱۴): مقایسه SINR خروجی سه روش MJNSI، MJNSI، MSINJ و روش مبتنی بر داده در تعداد نمونه‌های زمانی متفاوت

- vector mismatch and interference nonstationary,” proceeding of ChinaSIP, pp. 89-93, 2015.
- [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] M. Ashouri and B. Mozaffari, “Robust Beamforming Based on Convex Programming with Sidelobe and Signal Direction Mismatch Control”, Amirkabir University of Technology, Tehran, IRAN, 2015.
- [12] V. Rabinovich and N. Alexandrov, “Antenna Arrays and Automotive Applications,” Springer, New York, Chapter 2, 2013.
- [13] 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.
- [14] Ioannis. P. Gravas, D. Zaharis, V. Yioultsis, “Adaptive Beamforming with Side Lobe Suppression by Placing Extra Radiation Pattern Nulls”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018.
- [15] A. Aubry, “Design and Analysis of Adaptive Sidelobe Blanking Architectures”, 2020.
- Channel,” Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 3, no. 3, 2016. (In Persian).
- [3] J. Capon, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis,” Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug, 1969.
- [4] J. Li and P. Stoica, “Robust Adaptive Beamforming,” Wiley, New York, 2006.
- [5] 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.
- [6] O. L. Frost, “An algorithm for linearly constrained adaptive array processing,” Proceedings of the IEEE, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Aug. 1972. 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.
- [7] 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.
- [8] C. Y. Tseng and L. J. Griffiths, “A unified approach to the design of linear constraints in minimum variance adaptive Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, beamformers,” vol. 40, no. 12, pp. 1533-1542, Dec, 1992.
- [9] J. B. Liu, X. C. Cong, W. Xie, Q. Wan, and G. Gui, “robust adaptive beamforming for noncircular signal against array steering