

مقاوم سازی الگوریتم شکل دهی پرتو

سجاد دهقانی^(۱) – ناصر پرهیزگار^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس

(۲) استادیار - گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس

تاریخ دریافت: تابستان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۳

خلاصه: عملکرد الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو در شرایط عدم قطعیت در بردار هدایت و یا در ماتریس کوواریانس داده، به شدت خراب می‌شوند. در این مقاله یک روش جدید برای مقاوم سازی الگوریتم شکل‌دهی پرتو وفقی حداقل واریانس ارائه می‌شود که هم نسبت به عدم قطعیت در بردار هدایت و هم نسبت به عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس داده مقاوم می‌باشد. این روش شامل حداقل‌سازی یک مسأله بهینه سازی با تابع هزینه مرتبه دوم و قید غیر محدب است. در این مقاله نشان داده خواهد شد که مسأله بهینه سازی غیر محدب به یک مسأله محدب تبدیل شده و بردار وزن شکل دهنده پرتو مقاوم سازی شده به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، عدم قطعیت، شکل دهنده پرتو حداقل واریانس با پاسخ بدون اعوجاج، Convex Optimization.

Robust Beamforming Algorithms

Sajad Dehqani⁽¹⁾ – Naser Parhizgar⁽²⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Fars, Iran

sajaddehghani@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Fars, Iran

nasserpar@yahoo.com

Adaptive beamforming methods are known to degrade in the presence of steering vector and covariance matrix uncertainty. In this paper, a new approach is presented to robust adaptive minimum variance distortionless response beamforming make robust against both uncertainties in steering vector and covariance matrix. This method minimize a optimization problem that contains a quadratic objective function and a quadratic constraint. The optimization problem is nonconvex but is converted to a convex optimization problem in this paper. It is solved by the interior-point method and optimum weight vector to robust beamforming is achieved.

Index Terms: Robustness, uncertainty, minimum variance distortionless response beamforming, convex optimization.

۱- مقدمه

بردار هدایت، مشخص نیست. این در حالی است که این روش‌ها در شرایط نسبت سیگنال به نویز (SNR) پایین و هنگامی که ابعاد زیر فضای سیگنال تداخل به اضافه نویز بالا است، بسیار حساس هستند. متأسفانه همین امر موجب می‌شود که نتوان از الگوریتم شکل‌دهی پرتو مبتنی بر زیر فضا در شرایطی که ابعاد زیر فضای سیگنال تداخل به اضافه نویز نامشخص و نسبتاً بالا است در مخابرات بی‌سیم استفاده کرد [۱۸-۲۱].

در این مقاله یک روش مقاوم سازی شکل‌دهی پرتو جدید در حضور هرگونه عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس داده ارائه می‌شود. این روش مبتنی بر حداقل‌سازی تابع هزینه مرتبه دوم با توجه به بی‌نهایت قید مرتبه دوم غیر محدب است. با این حال نشان داده می‌شود که این الگوریتم مقاوم سازی را می‌توان به صورت یک مسأله محدب مخروطی مرتبه دوم (SOC) بازنویسی کرد. این مسأله بهینه سازی جدید توسط روش کارآمد Interior-point که از زیرمجموعه روش‌های حل مسائل بهینه سازی محدب است به صورت مؤثری حل می‌شود [۲۲-۲۴]. نشان داده خواهد شد که در بخشی از الگوریتم، که می‌توان آن را شبیه روش بارگذاری قطری دانست، مقدار بهینه ضریب بارگذاری قطری بر اساس حد پایین شناخته شده نرم ماتریس داده دچار عدم انطباق، محاسبه می‌شود.

در بخش II به اختصار روش شکل‌دهی پرتو وفقی حداقل واریانس پاسخ بدون اعوجاج (MVDR) و روش‌های مقاوم سازی مرسوم آن توضیح داده می‌شود. در بخش III روش جدید مقاوم سازی الگوریتم شکل‌دهی پرتو وفقی MVDR نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس ارائه می‌شود. در بخش IV نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار CVX در MATLAB ارائه شده و با روش‌های بیان شده در بخش II مقایسه می‌شوند. بخش V شامل نکات مهم مقاله و نتیجه گیری خواهد بود.

۲- شکل دهنده پرتو وفقی MVDR و مقاوم سازی

خروجی یک شکل دهنده پرتو باند باریک به صورت زیر است

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

که k بر حسب زمان، $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$ بردار مختلط $M \times 1$ مشاهدات آرایه، $w = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$ بردار مختلط وزن $M \times 1$ شکل دهنده پرتو، و M تعداد المان‌های آرایه هستند. $(\bullet)^H$ و $(\bullet)^T$ نیز به ترتیب ترانهاده و مزدوج مختلط هستند. برای بردار مشاهدات خواهیم داشت

$$\begin{aligned} x(k) &= S(k) + i(k) + n(k) \\ &= s(k)a + i(k) + n(k) \end{aligned} \quad (2)$$

که $n(t), i(t), s(t)$ به ترتیب سیگنال مطلوب، تداخل و نویز هستند و $a = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$ بردار هدایت سیگنال است. عناصر بردار هدایت آرایه یکنواخت خطی در حالت ایده‌آل نیز به صورت زیر می‌باشد.

در دهه‌های اخیر شکل‌دهی پرتو وفقی به طور گسترده‌ای در مخابرات بی‌سیم، پردازش گفتار آرایه میکروفون، رادار، سونار، تصویر برداری پزشکی، اخترشناسی رادیویی، و دیگر حوزه‌ها کاربرد داشته است. در روش مرسوم در طراحی شکل‌دهنده پرتو وفقی فرض بر این است که بسته داده دریافتی توسط آرایه صرفاً شامل سیگنال مطلوب می‌باشد [۱]. در این مورد چندین روش با همگرایی سریع ارائه شده است که در مسائلی با تعداد کم نمونه برداری از سیگنال (مثل رادار) قابل استفاده هستند [۱-۵]. با این حال حوزه‌هایی مانند مخابرات سیار، پردازش گفتار آرایه میکروفون، و تصویر برداری پزشکی وجود دارند که بسته داده دریافتی توسط آرایه، نه تنها شامل سیگنال مطلوب بوده بلکه توسط تداخل‌گرها نیز آغشته شده است. در [۶] نشان داده شده است که حتی اگر بردار هدایت آرایه دقیقاً شناخته شده باشد، سرعت همگرایی الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو در حالتی که تداخل وجود دارد کمتر از حالتی است که صرفاً سیگنال مطلوب توسط آرایه دریافت می‌شود. در این شرایط میان بردار هدایت آرایه در حالت ایده‌آل و بدون تداخل و حالت عملی یک عدم انطباق صورت می‌گیرد. این وضعیت برای ماتریس کوواریانس داده نیز رخ خواهد داد. این شرایط را عدم قطعیت گویند. چنانچه بردار وزن آرایه نتواند با سرعت مناسب خود را با عدم قطعیت تطبیق دهد عملکرد شکل دهنده‌های پرتو وفقی مرسوم به شدت کاهش می‌یابد [۷-۱۱]. این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از تداخل گرها، تزویج متقابل بین آنتن‌ها، لرزش آنتن، کالیبراسیون نامناسب آرایه، مدل کردن نامناسب بردار هدایت آرایه و یا تغییرپذیری کانال انتشار باشد [۱۲]. در نتیجه مقاوم‌سازی الگوریتم شکل‌دهی پرتو در این زمینه امری ضروری است.

چندین روش برای مقاوم‌سازی شکل‌دهنده پرتو وفقی وجود دارد. پرکاربردترین آنها شکل‌دهنده پرتو حداقل واریانس با قید خطی (LCVM) است که مقاوم‌سازی را نسبت به عدم قطعیت در زاویه ورود سیگنال مطلوب به آرایه انجام می‌دهد. با این حال کاربرد این روش‌ها تنها محدود به عدم انطباق در زاویه ورود سیگنال به آرایه است. اگر حالت‌های دیگر عدم انطباق در بردار هدایت رخ دهد (مانند عدم انطباق به علت اختلال در آرایه، مدل کردن نامناسب بردار هدایت، و...) نمی‌توان انتظار داشت که این روش‌ها مقاوم‌سازی مطلوبی ارائه دهند [۱۳].

چندین روش شناخته شده دیگر وجود دارد که تا حدی می‌توانند بر مشکل عدم انطباق در بردار هدایت غلبه کنند. معروفترین این روش‌ها شکل دهنده پرتو با قید مرتبه دوم است که عملکرد آن به صورت بارگذاری قطری ماتریس کوواریانس داده است [۱۴، ۱۵].

روش دیگر شکل دهنده پرتو مبتنی بر فضای ویژه است [۱۶، ۱۷]. با این حال مهمترین عیب این روش‌ها این است که چگونگی انتخاب ضریب بارگذاری قطری در آنها، با وجود معلوم بودن نوع عدم قطعیت

مساوی یا نامساوی با توجه به عدم قطعیت در بردار هدایت مقاوم سازی صورت می گیرد.

الگوریتم NECCB یک قید تساوی اضافی روی نرم اقلیدسی w اعمال می کند. مساله NECCB را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \min_w w^H R w \\ \text{subject to } w^H a = 1 \\ \|w\|^2 = \zeta \end{aligned} \quad (9)$$

در روش NICCB یک قید نامساوی اضافی روی نرم اقلیدسی w جهت بهبود مقاوم سازی اعمال می شود.

$$\begin{aligned} \|w\|^2 < \zeta \\ \text{که } \zeta \text{ پارامتر قید نرم است. در نتیجه مساله NICCB به صورت رابطه ذیل خواهد بود.} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \min_w w^H R w \\ \text{subject to } w^H a = 1 \\ \|w\|^2 < \zeta \end{aligned} \quad (11)$$

برای حل NECCB باید از نتایج به دست آمده در مورد NICCB استفاده کنیم. نتایجی همچون کاهش و یا افزایش نامساوی که تنها برای مقدار حقیقی مثبت در حل NICCB صادق هستند. مساله NECCB را می توان مانند مساله NICCB به وسیله ضرایب لاگرانژ حل نمود. همچنین ساختار بردار وزن بهینه در NECCB مانند الگوریتم NICCB است. تفاوت بین NICCB و NECCB تنها در ضرایب لاگرانژ $\hat{\lambda}$ است به طوری که برای NICCB ضرایب لاگرانژ $\hat{\lambda} \geq 0$ است ولی برای NECCB یک مقدار حقیقی دلخواه است. با اینکه حل NICCB و NECCB شبیه یکدیگر است اما محدوده ضرایب لاگرانژ آنها متفاوت است [۲۹]. جهت بررسی کامل این روش ها می توان به [۲۵] رجوع کرد.

۳- مقاوم سازی شکل دهی پرتو به روش پیشنهادی

شکل دهی پرتو MVDR با فرض هیچگونه عدم انطباق در خروجی آرایه، نه در بردار هدایت و نه در داده های دریافتی، می باشد. حال فرض می کنیم که هم بردار هدایت آرایه و هم ماتریس داده دچار عدم انطباق شده اند. عدم انطباق را به صورت یک خطای جمع شونده برای بردار هدایت و بردار داده دریافتی توسط آرایه نشان می دهیم.

$$\tilde{a} = a + \delta \quad (12)$$

که δ بردار خطای $M \times 1$ است.

$$\tilde{X} = X + \Delta \quad (13)$$

و Δ ماتریس خطای $M \times N$ است.

فرض می کنیم که نرم این عدم انطباق ها تحت قیدهای شناخته شده محدود شده باشد.

$$\|\delta\| \leq \varepsilon \quad (14)$$

$$\|\Delta\|_F \leq \gamma \quad (15)$$

$$a_i = e^{j \frac{2\pi(i-1)d}{\lambda} \sin(\theta)} ; i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

بردار وزن را می توان از حداکثر کردن SINR به دست آورد.

$$SINR = \frac{\sigma_s^2 |w^H a|^2}{w^H R_{i+n} w} \quad (4)$$

که $R_{i+n} = E\{[i(t)+n(t)][i(t)+n(t)]^H\}$ یک ماتریس $M \times M$ ، ماتریس کوواریانس سیگنال تداخل و نویز می باشد و σ_s^2 توان سیگنال است. هدف ما در بحث شکل دهی پرتو، حداکثر شدن رابطه (۴) است یعنی نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز حداکثر شود و این معادل حداقل شدن مخرج با فرض $w^H a = 1$ است.

$$\begin{aligned} \min_w w^H R_{i+n} w \\ \text{subject to } w^H a = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

در عمل چون نمی توان نمونه های نویز و تداخل را از سیگنال اصلی جدا کرد لذا با فرض ارگادیک بودن فرآیند، می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\hat{R} = \frac{1}{N} X X^H \quad (6)$$

که $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]_{M \times N}$ ماتریس $M \times N$ داده ی آرایه و N نمونه های سیگنال دریافتی است [۲۵].

عدم قطعیت در بردار هدایت، a ، و ماتریس کوواریانس داده ها، R ، موجب می شود نتوان با حل مساله بهینه سازی رابطه (۵) به بردار وزن مطلوب دست یافت. لذا روش هایی برای مقاوم سازی این الگوریتم، بطور مجزا، نسبت به عدم قطعیت در بردار هدایت و یا عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس داده ارائه شده است که در ادامه به اختصار در مورد آنها صحبت می شود.

معروف ترین روش مقاوم سازی نسبت به عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس داده، روش بارگذاری قطری (Diagonal Loading) است. در این روش ماتریس کوواریانس داده را بارگذاری قطری می کنند.

$$\hat{R} \rightarrow \hat{R} + \lambda I \quad (7)$$

که λ ضریب بار گذار قطری و I ماتریس یکه است. با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۵) بردار وزن مطلوب به دست می آید.

$$w = (\hat{R} + \lambda I)^{-1} a \quad (8)$$

یک ویژگی بارگذاری قطری این است که قابلیت معکوس پذیری ماتریس بارگذاری شده قطری $\hat{R} + \lambda I$ را صرف نظر از اینکه منفرد است یا خیر، تضمین می کند. مشکل اساسی روش بارگذاری قطری این است که راه حل مشخصی برای تعیین ضریب بارگذاری قطری ارائه نشده است [۴] و [۲۶-۲۸].

روش های دیگر مقاوم سازی بر اساس عدم قطعیت در بردار هدایت به طور کلی عبارتند از شکل دهنده پرتو کاپون تحت قید نرم مساوی (NECCB) و شکل دهنده پرتو کاپون تحت قید نرم نامساوی [۲۵] (NICCB). در این دو روش با اعمال قیدهای اضافی به صورت نرم

$$\begin{aligned} \min_w \|X^H w\| + \gamma \|w\| \\ \text{subject to } w^H a \geq \varepsilon \|w\| + 1 \\ \text{Im}\{w^H a\} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

در مورد محاسبه γ یک نکته مهم وجود دارد و آن نامشخص بودن نوع اثر تخریبگری عدم قطعیت بر روی داده دریافتی از آرایه است. از این رو به طور مستقیم از رابطه (۱۵) نمی توان مقدار این اثر تخریبگری را محاسبه کرد. بنابر این برای آن یک حد پایین محاسبه می کنیم.

$$\|\tilde{X}\|_f = \|X + \Delta\|_f \quad (26)$$

$$\|X + \Delta\|_f \leq \|X\|_f + \|\Delta\|_f \quad (27)$$

با استفاده از رابطه (۱۵) داریم:

$$\gamma \geq \|X + \Delta\|_f - \|X\|_f \quad (28)$$

و بدین ترتیب در محاسبات می توان از این حد پایین استفاده کرد. برای محاسبه ε تحقیقات فراوانی ارائه شده است که در همه آنها در نهایت برای ε یک ناحیه بیضیگون متصور شده اند [۲۵، ۳۲-۳۴]. در اینجا ما از آخرین روشی که بهترین محدوده برای ε را جهت مقاوم سازی ارائه داده است استفاده می کنیم [۳۵].

در این روش فرض می شود که حداکثر محدوده مجاز برای بردار هدایت با عدم انطباق یک بیضی گون باشد.

$$\tilde{a} \in \zeta \quad ; \quad \zeta = \{a + \delta \mid \|\delta\| \leq \varepsilon\} \quad (29)$$

سپس برای مقاوم سازی تغییرات زاویه ورود را منحصر به محدوده بین دو سر قطر بزرگ ناحیه بیضی گون می کند.

$$\tilde{a} \in \{\tilde{a}(\theta) \mid \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2\} \quad (30)$$

در این حالت برای به دست آوردن ε ، با یک سری ساده سازی ها که به کلیت موضوع آسیبی وارد نمی کند، دو مقدار برای حد بالا و پایین \tilde{a} به دست می آید.

$$\delta(\theta_1) = \tilde{a}(\theta_1) - a(\theta_1) \quad (31)$$

$$\delta(\theta_2) = \tilde{a}(\theta_2) - a(\theta_2) \quad (32)$$

که با توجه به رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\varepsilon = \max\{\|\delta(\theta_1)\|, \|\delta(\theta_2)\|\} \quad (33)$$

باید توجه داشت که در خارج از این محدوده، مسأله بهینه سازی واگرا شده و جوابی برای بردار وزن بهینه به دست نمی آید.

واضح است که رابطه (۲۵) از نظر فرمول نویسی بسیار ساده تر از (۱۶) بوده و همچنین محدب است. این مسأله بهینه سازی محدب به روش Barrier از مجموعه روش های Interior-point که برای حل مسائل محدب به کار می رود قابل حل می باشد. این روش یک روش تقریبی با دقت بسیار بالاست که توسط نرم افزار CVX تحت نرم افزار MATLAB قابل اجراست [۳۱].

$\|\bullet\|_f$ نرم فربنیوس (برای ماتریس) است. باید توجه کرد که Δ و δ به ترتیب بدلیل خطای بردار هدایت و غیر ایستا بودن داده ها رخ می دهند.

برای دستیابی به یک الگوریتم مقاوم شده نسبت به هر دو خطای بردار هدایت سیگنال و غیر ایستا بودن داده، وزن های شکل دهنده پرتو را با حل معادله بهینه سازی ذیل به دست می آوریم:

$$\min_w \max_{\|\Delta\|_f \leq \gamma} \|\tilde{X}^H w\| \quad (16)$$

$$\text{Subject to } |w^H \tilde{a}| \geq 1 \quad \forall \|\delta\| \leq \varepsilon$$

باید توجه داشت که وزن های شکل دهنده پرتو در (۱۶) با میانگین گیری از حداقل توان خروجی، در بدترین حالت عدم تطابق Δ با اندازه محدود، و به شرط ارضا قید پاسخ اوجاچ یافته بردار هدایت در بدترین حالت خطای δ با اندازه محدود به دست می آید.

معادله (۱۶) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\min_w \max_{\|\Delta\|_f \leq \gamma} \|X^H w + \Delta^H w\|$$

$$\text{Subject to } \min_{\|\delta\| \leq \varepsilon} |w^H (a + \delta)| \geq 1 \quad (17)$$

برای تابع هزینه و قید، نتایجی به دست می آیند که قابل اثبات هستند. فرض زیر را برای قید مسأله بهینه سازی در نظر می گیریم [۳۰]:

$$|w^H a| \geq \varepsilon \|w\| \quad (18)$$

پس

$$\min_{\|\delta\| \leq \varepsilon} |w^H (a + \delta)| = |w^H a| - \varepsilon \|w\| \quad (19)$$

می توان برای تابع هزینه هم فرض زیر را اعمال کرد.

$$f(w) = \max_{\|\Delta\|_f \leq \gamma} \|X^H w + \Delta^H w\| \quad (20)$$

و از این فرض به نتیجه قابل اثبات زیر رسید.

$$f(w) = \|X^H w\| + \gamma \|w\| \quad (21)$$

با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۱) مسأله بهینه سازی (۱۷) را بازنویسی می کنیم.

$$\min_w \|X^H w\| + \gamma \|w\|$$

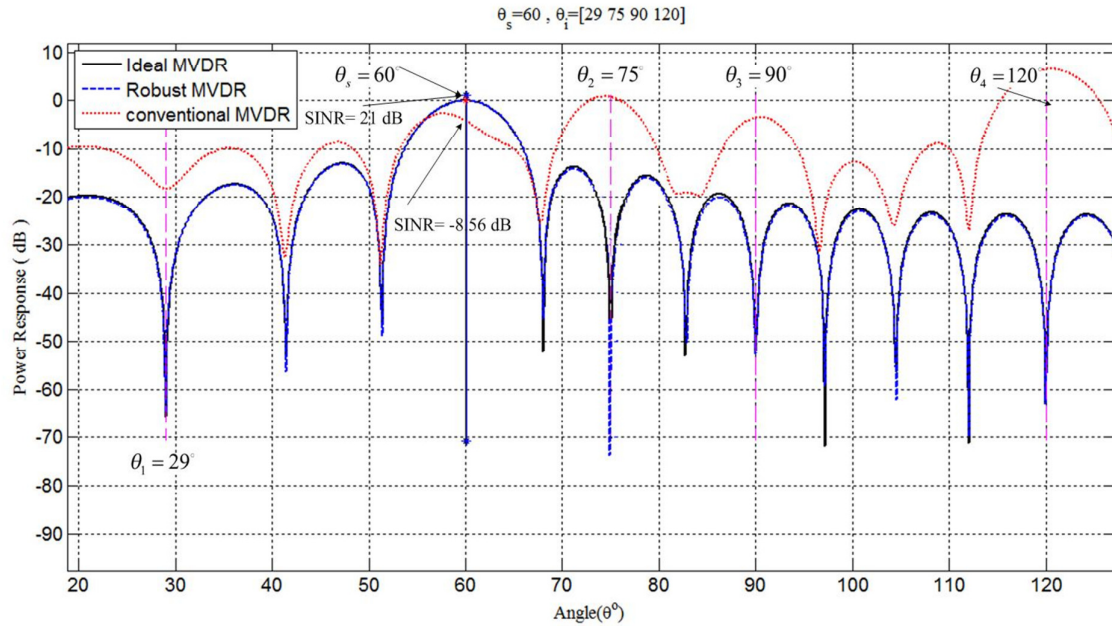
$$\text{subject to } |w^H a| \geq \varepsilon \|w\| + 1 \quad (22)$$

به دلیل وجود عملگر قدر مطلق در قید رابطه (۲۲) این قید هنوز محدب نیست. برای محدب کردن آن دقت می کنیم که اگر w تحت یک زاویه دلخواه دوران یابد، تابع هزینه بدون تغییر باقی خواهد ماند. بنابراین بدون از دست دادن کلیت موضوع ما می توانیم w را به صورت زیر انتخاب کنیم.

$$\text{Re}\{w^H a\} > 0 \quad (23)$$

$$\text{Im}\{w^H a\} = 0 \quad (24)$$

با اعمال روابط (۲۳) و (۲۴) به عنوان قیدهای اضافی در رابطه (۱۷)، می توان آن را به صورت یک مسأله محدب بازنویسی کرد.



شکل (۱): مقایسه بین پترن‌های شکل‌دهی پرتو MVDR
Fig. (1): MVDR beamformer pattern comparison

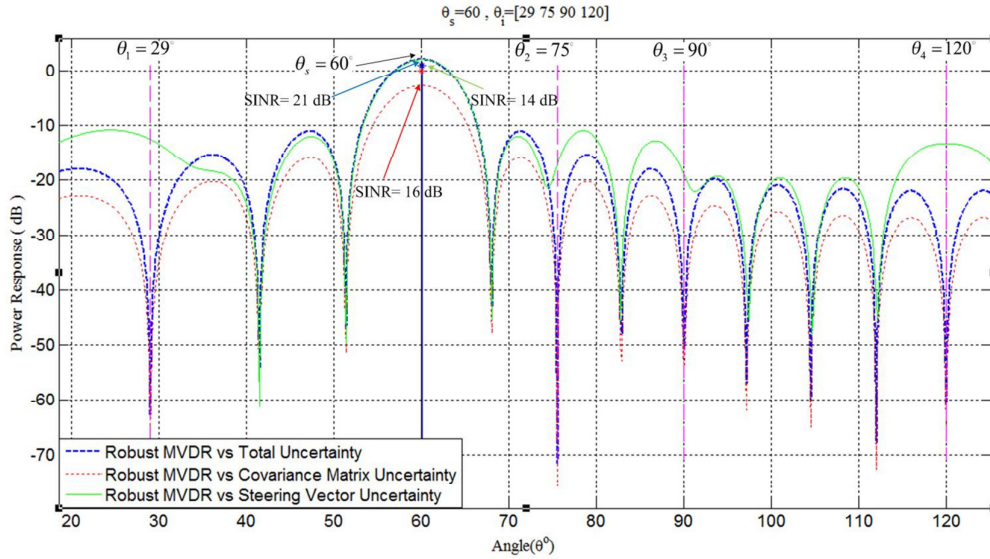
ماتریس کوواریانس را مورد بررسی قرار دهیم. این بررسی شامل مقایسه عملکرد شکل‌دهی پرتو با دیگر الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو MVDR مقاوم سازی شده، از لحاظ تشخیص زاویه ورود سیگنال مطلوب و صفرگذاری در زوایای ورود سیگنال‌های تداخل و داشتن حداکثر SINR در زاویه ورود سیگنال مطلوب می‌باشد. شبیه‌سازی‌های ارائه شده مبتنی بر داده‌های به دست آمده از شبیه‌ساز الکترو مغناطیسی می‌باشد که برنامه آن در نرم افزار MATLAB نوشته شده است.

۴- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی، یک آرایه آنتن خطی متشکل از ۱۶ آنتن دوقطبی با فرکانس کاری $f = 2.4 \text{ GHz}$ با فاصله بین المانی $d = \frac{\lambda}{2} = 6.25 \text{ cm}$ ، به طوری که $\lambda = 12.5 \text{ cm}$ در نظر می‌گیریم. زاویه‌های ورود برای سیگنال مطلوب $\theta_s = 60^\circ$ و برای سیگنال‌های تداخل $\theta_1 = 27^\circ$ ، $\theta_2 = 75^\circ$ ، $\theta_3 = 90^\circ$ و $\theta_4 = 120^\circ$ می‌باشند. هدف ما در این شبیه‌سازی این است که عملکرد الگوریتم شکل‌دهی پرتو MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و

Table (1): SINR and depth of the nulls comparison in the MVDR beamforming algorithms
جدول (۱): مقایسه SINR و عمق صفرگذاری الگوریتم شکل‌دهی پرتو MVDR

صفر گذاری (dB)				SINR (dB)	
29°	75°	90°	120°		
-63.32	-45.24	-52.65	-62.1	24	MVDR ایده آل
-18.3	+0.7	-3.46	+6.44	-8.56	MVDR بدون مقاوم سازی
-63.27	-42.58	-52.11	-61.47	21	MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس داده



شکل (۲): مقایسه بین شکل دهی پرتو MVDR مقاوم شده
 Fig (2): Robust MVDR beamformer pattern comparison

داده شد. در ادامه این روند را برای الگوریتم‌های مقاوم سازی شده فقط در برابر عدم قطعیت در بردار هدایت و همچنین برای الگوریتم‌های مقاوم سازی شده فقط در برابر عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس داده، R ، نشان می‌دهیم. ابتدا فقط عدم قطعیت را در بردار هدایت در نظر می‌گیریم. در این حالت قید مساله بهینه سازی تغییر کرده و اثر عدم قطعیت در قید مساله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

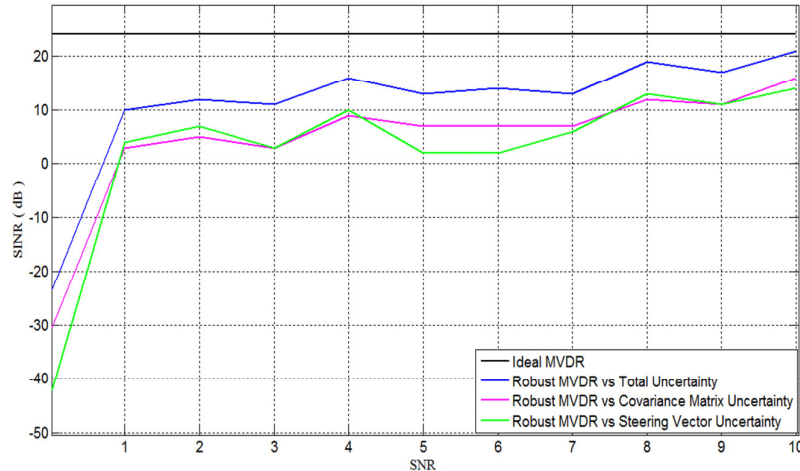
$$\begin{aligned} & \min_w w^H R w \\ & \text{subject to} \quad |w^H a| \geq \epsilon \|w\| + 1 \end{aligned} \quad (34)$$

همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود زاویه ورود سیگنال مطلوب به شکل ایده آلی، توسط الگوریتم شکل دهی پرتو مقاوم‌سازی شده به روش پیشنهادی، تشخیص داده شده است. عمل صفرگذاری در زوایای ورود سیگنال‌های تداخل به خوبی صورت گرفته و نیز SINR این الگوریتم شکل‌دهی پرتو مقاوم سازی شده برابر 21 dB می‌باشد که تفاوت بارز آن با SINR در حالت بدون مقاوم سازی که -8.56 dB است بیانگر عملکرد مطلوب مقاوم سازی الگوریتم می‌باشد. نتایج شبیه سازی در جدول (۱) آورده شده است.

تا اینجا عملکرد الگوریتم شکل دهی پرتو MVDR مقاوم سازی شده در برابر عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس، نسبت به الگوریتم شکل دهی پرتو MVDR مقاوم سازی نشده بررسی و نشان

جدول (۲): مقایسه SINR و عمق صفرگذاری الگوریتم شکل دهی پرتو MVDR مقاوم سازی شده
 Table (2) depth of the nulls and SINR comparison in the robust MVDR beamformer

صفر گذاری (dB)				SINR (dB)	
29°	75°	90°	120°		
-63.27	-42.58	-52.11	-61.47	21	MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس داده
-65.47	-40.12	-51.37	-60.26	16	MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس داده
-12.56	-19.51	-19.29	-13.3	14	MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت در بردار هدایت



شکل (۳): SINR خروجی نسبت به تغییرات SNR (Snapshot=100)

Fig. (3): Output SINR versus SNR (Snapshot=100)

یکی دیگر از معیارهای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو مقاوم سازی شده، نمودار تغییرات SINR به ازای تغییرات SNR می‌باشد.

در شکل (۳) نمودار تغییرات SINR در ازای تغییرات SNR در حالت تعداد ثابت نمونه‌های سیگنال $N=100$ ، برای هر سه الگوریتم مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و نسبت به عدم قطعیت ماتریس کوواریانس داده‌ها و نیز عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس دیده می‌شود.

نمودار آبی رنگ مربوط به الگوریتم شکل‌دهی پرتو MVDR مقاوم سازی شده نسبت به عدم قطعیت بردار هدایت و ماتریس کوواریانس است و در $SNR=10$ dB مقدار SINR آن، نزدیکترین مقدار به حالت ایده آل و برابر $SINR=21$ dB است.

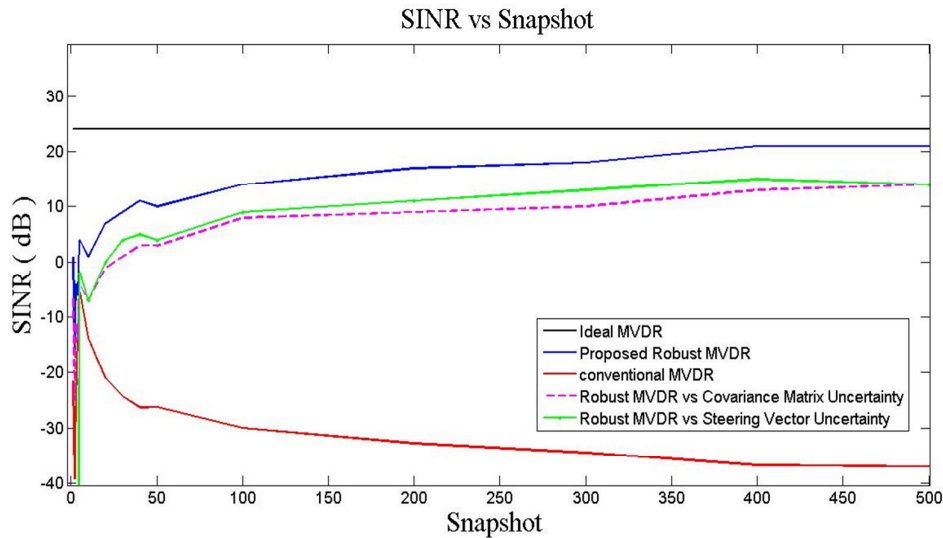
تغییرات SINR الگوریتم‌های مقاوم سازی در حالت $SNR=10$ dB و به ازای تغییر تعداد نمونه‌های سیگنال دریافتی در شکل (۴) نشان داده شده است.

بر اساس شکل‌های (۳) و (۴) می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت به صورت کلی هم در تابع هزینه و هم در قید مسأله بهینه سازی جهت به دست آوردن بردار وزن بهینه، نسبت به دیگر الگوریتم‌ها که عدم قطعیت را به صورت جزئی بررسی می‌کنند عملکرد بهتری از نظر شکل‌دهی پرتو و همچنین حداکثر کردن SINR دارد.

در این روش عملکرد الگوریتم شکل‌دهی پرتو نسبت به حالت مقاوم سازی نشده خیلی بهتر می‌شود و زاویه‌های ورود سیگنال مطلوب و تداخل بهتر از حالت مقاوم سازی نشده تخمین زده می‌شوند اما بازهم بعضی از زوایای ورود سیگنال‌های تداخل به عنوان زاویه ورود سیگنال مطلوب تشخیص داده می‌شوند. به عبارت دیگر عمل صفرگذاری فقط برای برخی از منابع سیگنال تداخل صورت می‌گیرد. در مورد SINR می‌توان گفت که تغییرات مشهود بوده و مقدار آن برابر 14 dB است.

حال عدم قطعیت را تنها برای ماتریس کوواریانس داده‌ها در نظر می‌گیریم و نتایج مقاوم‌سازی را نسبت به آن مورد بررسی قرار می‌دهیم. این حالت به صورت کلی اشاره به روش‌هایی دارد که در آنها به منظور مقاوم سازی، تنها تابع هزینه تغییر می‌کند. روش بارگذاری قطری نیز بخشی از همین نوع الگوریتم‌های مقاوم سازی می‌باشد. در این حالت عملکرد مقاوم‌سازی بسیار خوب بوده و علاوه بر تخمین زاویه ورود سیگنال مطلوب با دقت مناسب، عمل صفرگذاری در زوایای ورود سیگنال‌های تداخل نیز به نحو بهینه صورت گرفته است و مقدار SINR در زاویه ورود سیگنال مطلوب برابر 16 dB می‌باشد.

اما هنوز تفاوت مشهودی بین مقدار SINR در حالت ایده‌آل و حالت مقاوم سازی فقط نسبت به عدم قطعیت در ماتریس کوواریانس وجود دارد. نتایج حاصل از مقاوم سازی به روش پیشنهادی و نیز روش‌های مقاوم سازی قبلی، در جدول (۲) دیده می‌شود.



شکل (۴): SINR خروجی در مقابل تغییرات تعداد نمونه سیگنال دریافتی (SNR=10dB)
 Fig. (4): Output SINR versus snapshot number (SNR=10dB)

۵- نتیجه گیری

بارگذاری قطری که در آن راه حل مشخصی برای به دست آوردن ضریب بارگذاری تعریف نمی‌شود، در این روش پیشنهادی این ضریب به سادگی بر اساس حد شناخته شده ماتریس داده، قابل محاسبه است. با حل کامپیوتری این مسأله بهینه سازی محدب توسط نرم افزار CVX، بردار وزن بهینه الگوریتم مقاوم سازی به دست می‌آید که شبیه سازی کامپیوتری عملکرد بهتر این روش نسبت به دیگر روش‌های مقاوم سازی را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت در این روش، محاسبات ساده و سریع در حل مسأله بهینه سازی توسط نرم افزار CVX است که به روش Interior-point آن را حل می‌کند.

در این مقاله یک الگوریتم شکل‌دهی پرتو مقاوم سازی شده بهبود یافته پیشنهاد شده است که نسبت به عدم قطعیت در بردار هدایت آرایه و ماتریس کوواریانس داده دارای بهترین عملکرد می‌باشد. روش پیشنهادی شامل یک مسأله بهینه‌سازی غیرمحدب می‌باشد که بدترین تأثیرات عدم قطعیت در آن لحاظ شده است. با تبدیل این مسأله به یک مسأله بهینه سازی محدب با تابع هزینه‌ای شبیه روش بارگذاری قطری و قیدی شبیه روش‌های مقاوم‌سازی با قید مرتبه دوم نرم نامساوی الگوریتم مقاوم سازی شده حاصل می‌شود. برخلاف روش

References

- [1] S. Reed, J.D. Mallett, L.E. Brennan, "Rapid convergence rate in adaptive arrays", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-10, pp. 853-863, Nov. 1974.
- [2] L.J. Griffiths, C.W. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. A P-30, pp. 27-34, Jan. 1982.
- [3] E.K. Hung, R.M. Turner, "A fast beamforming algorithm for large arrays", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-19, pp. 598-607, July 1983.
- [4] B.D. Carlson, "Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sys., Vol. 24, pp. 397-401, July 1988.
- [5] R.A. Monzingo, T.W. Miller, "Introduction to Adaptive Arrays", New York: Wiley, 1980.
- [6] D.D. Feldman, L.J. Griffiths, "A projection approach to robust adaptive beamforming", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 42, pp. 867-876, Apr. 1994.
- [7] S.D. Hayward, "Effects of motion on adaptive arrays", IEE Pmc. Ruhr Sonar and Navigation, Vol. 144, pp. 15-20, Feb. 1997.
- [8] A.B. Gershman, G.V. Serebryakov, J.F. Bohme, "Constrained hung-tumer adaptive beamforming algorithm with additional robustness to wideband and moving jammers", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 44, pp. 361-367, March 1996.
- [9] A.B. Gershman, U. Nickel, J.F. Bohme, "Adaptive beamforming algorithms with robustness against jammer motion", IEEE Trans. Signdl Processing, Vol. 45, pp. 1878-1885, July. 1997.
- [10] R.I. Goldberg, G. Vazquez, "Robust beamforming. for interference rejection in mobile communications", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 45, pp. 271-275, Jan. 1997.

- [11] J.R. Guerci, "Theory and application of covariance matrix tapers for robust adaptive beamforming", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 47, pp. 997-985, Apr. 1999.
- [12] N.K. Jablon, "Adaptive beamforming with the generalized sidelobe canceller in the presence of array imperfections", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-34, pp. 996-1012, Aug. 1986.
- [13] A.B. Gershman, "Robust adaptive beamforming in sensor arrays", Int. J. Electron. Commun., Vol. 53, pp. 305-314, Dec. 1999.
- [14] H. Cox, R.M. Zeskind, M.H. Owen, "Robust adaptive beamforming", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-35, pp. 1365-1376, Oct. 1987.
- [15] M.H. Er, T. Cantoni, "An alternative formulation for an optimum beamformer with robustness capability", Proc. Inst. Elect. Eng. Radar, Sonar, Navig., pp. 447-460, Oct. 1985.
- [16] D.D. Feldman, L.J. Griffiths, "A projection approach to robust adaptive beamforming", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 42, pp. 867-876, Apr. 1994.
- [17] L. Chang, C.C. Yeh, "Performance of DMI and eigenspace-based beamformers", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 40, pp. 1336-1347, Nov. 1992.
- [18] K.I. Pedersen, P.E. Mogensen, B.H. Fleury, "A stochastic model of the temporal and azimuthal dispersion seen at the base station in outdoor propagation environments", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 49, pp. 437-447, Mar. 2000.
- [19] J. Goldberg, H. Messer, "Inherent limitations in the localization of a coherently scattered source", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 46, pp. 3441-3444, Dec. 1998.
- [20] O. Besson, P. Stoica, "Decoupled estimation of DOA and angular spread for a spatially distributed source", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 48, pp. 1872-1882, July 2000.
- [21] D. Astely, B. Ottersten, "The effects of local scattering on direction of arrival estimation with MUSIC", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 47, pp. 3220-3234, Dec. 1999.
- [22] Y. Nesterov, A. Nemirovsky, "Interior point polynomial algorithms in convex programming", Philadelphia, PA: SIAM, 1994.
- [23] M. Lobo et al., "Applications of second-order cone programming", Linear Algebra Applicat., pp. 193-228, Nov. 1998.
- [24] J.F. Sturm, "Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones", Optim. Meth. Softw., Vol. 11-12, pp. 625-653, Aug. 1999.
- [25] J. Li, P. Stoica, "Robust adaptive beamforming", John Wiley, Inc. Hoboken, New Jersey, 2006.
- [26] A. Elnashar, S.M. Elnoubi, H.A. El-Mikati, "Further study on robust adaptive beamforming with optimum diagonal loading", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. AP-54, No.12, pp. 3647-3658, Dec.2006.
- [27] F. Vincent, O. Besson, "Steering vector errors and diagonal loading", IEE Proceedings.- Radar Sonar Navig., Vol. 151, No.6, pp. 337-343, Dec. 2004.
- [28] J. Li, P. Stoica, Z. Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading", IEEE Trans. on Sig. Proc., Vol. 51, pp. 1702-1715, 2003.
- [29] L. Congfeng, "Robust Beamforming and DOA Estimation, Fourier Transform Applications", Dr Salih Salih (Ed.), ISBN: 978-953-51-0518-3, InTech, 2012.
- [30] R.A. Monzingo, T.W. Miller, "Introduction to adaptive arrays", New York: Wiley, 1980.
- [31] S.P. Boyd, L. Vandenberghe, "Convex Optimization", Cambridge University Press, 2011.
- [32] S.A. Vorobyov, A.B. Gershman, Z-Q. Luo, "Robust adaptive Beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem", IEEE Trans. Signal Processing. Vol.51, No.2, pp. 313-324, Feb. 2003.
- [33] Z.L. Yu, M.H. Er, "A robust capon beamformer against uncertainty of nominal steering vector", Hindawi Publishing Corporation, EURASIP J. on App. Sig. Proc., Article ID 62327, pp. 1-8, 2006.
- [34] R.G. Lorenz, S.P. Boyd, "Robust minimum variance beamforming", Sig. Proc. IEEE Trans. on, Vol. 53, No.5, pp.1684,1696, May 2005.
- [35] C.Y.Chen, P.P.Vaidyanathan, "Quadratically constrained beamforming robust against direction-of- arrival mismatch", IEEE Trans. Sig. Proc., Vol.55, No.8, pp: 4139-4150, Aug.2007.

