

## طراحی آنتن آرایه‌ای با شکل‌دهی بیم دیجیتال به منظور مقابله با تداخل‌های نامعین

سید حسن صدیقی<sup>۱\*</sup>، ملیحه رسولی امیرحاجلو<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، موسسه آموزش عالی پویا

(دریافت: ۹۴/۰۶/۱۷، پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۳)

**چکیده:** در این مقاله طراحی یک آنتن آرایه‌ای با شکل‌دهی بیم دیجیتال به منظور مقابله با تداخل‌های نامعین ارائه شده است. امروزه با توجه به تقاضای روزافزون برای برقراری ارتباطات بی‌سیم، نیاز به انتقال حجم بالای اطلاعات با سرعت و کیفیت مناسب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است که استفاده از روش‌های شکل‌دهی بیم دیجیتال می‌تواند در برآورده شدن این نیاز تاثیر موثر باشد. در روش ارائه‌شده در این مقاله، نیازی به شناخت موقعیت قرارگیری منابع تداخل نبوده و آرایه آنتنی الگوی خود را به نحوی تنظیم می‌کند که در راستای مطلوب و معین بهترین بهره را داشته باشد و در سایر راستاها، ناهمسانی بهره آنتن کمینه باشد. با توجه به تاثیر بسزای اثر تزویج متقابل بین آنتن‌ها، از الگوی تشعشی فعال برای ماتریس جهتی در این روش استفاده شده است. همچنین این روش بر روی یک آرایه آنتنی ۸ عنصری با المان پچ پیاده‌سازی شده است. اثر تعداد موقعیت‌های قرارگیری منابع تداخل و تعداد آنتن‌های آرایه از مواردی هستند که در تحلیل به آنها پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی تاییدکننده روش شکل‌دهی بیم ارائه‌شده می‌باشند.

**کلید واژه‌ها:** آنتن آرایه‌ای، تزویج متقابل، شکل‌دهی بیم دیجیتال، تداخل نامعین، الگوی تشعشی فعال.

### ۱- مقدمه

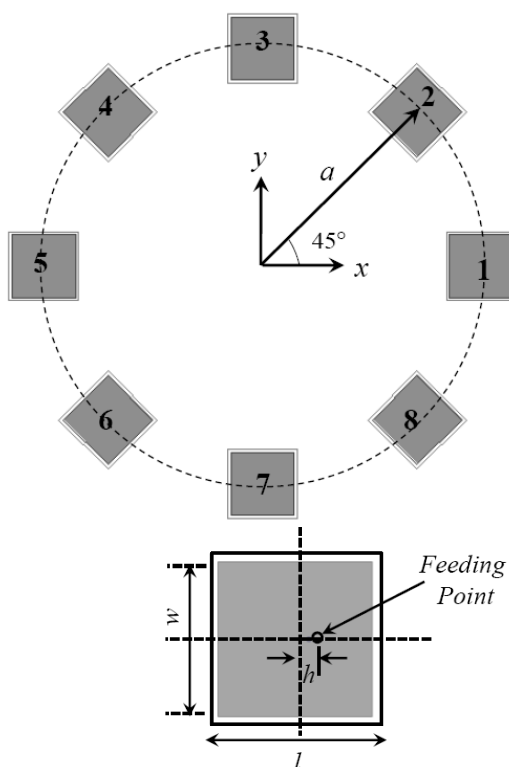
مراجع ذکر شده است [۱-۲]. روش کمینه کردن واریانس نویز یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های شکل‌دهی بیم دیجیتال می‌باشد. در این روش، فرض بر آن است که منبع اصلی سیگنال و موقعیت آن به همراه منابع تداخل و موقعیت آن‌ها شناخته شده است [۳-۵]. در نتیجه با استفاده از روش‌های تحلیلی ارائه امکان کاهش اثر منابع تداخل خواهد بود. محدودیت این روش، نیاز به شناسایی منابع تداخل و موقعیت آنها می‌باشد که اشکالات زیادی را در عمل به همراه خواهد داشت. برای شناسایی موقعیت سیگنال‌های تداخل نیاز به اجرای روش‌های تعیین جهت سیگنال می‌باشد که مستلزم افزایش چشمگیر حجم پردازش در آنتن خواهد بود [۶]. در مرجع [۷]، یک آنتن آرایه‌ای با شکل‌دهی بیم دیجیتال برای دریافت سیگنال GPS با استفاده از روش کمینه کردن واریانس ارائه شده است. در این طرح با توجه به عدم اطلاع از تعداد و موقعیت منابع تداخل، وضعیت آن‌ها به صورت تصادفی در نظر گرفته شده و آنتن، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۸] نیز یک آنتن برای کاربرد شبکه‌های بی‌سیم با استفاده از روش‌های شکل‌دهی دیجیتال پیشنهاد شده است. اگرچه در آنتن طراحی شده اثر تزویج متقابل بین عنصرهای آنتنی لحاظ شده است، اما در محاسبات تنها دو کانال تداخل در نظر گرفته شده است. شکل‌دهی بیم دیجیتال برای یک آنتن آرایه‌ای

تقاضا برای افزایش ظرفیت در ارتباطات مخابراتی به ویژه شبکه‌های سلولی به صورت گسترده‌ای در حال افزایش می‌باشد. در این راستا، آنتن به کاررفته در شبکه نقش به‌سزایی خواهد داشت. چنانچه آنتن بتواند بهره را در راستای مدنظر افزایش دهد و از ورود سیگنال‌های ناخواسته که موقعیتی متفاوت با منبع اصلی دارند جلوگیری کند، حاشیه لینک مخابراتی افزایش خواهد یافت که منجر به امکان افزایش ظرفیت انتقال داده در شبکه نیز خواهد شد. در این راستا آنتن‌های هوشمند نقش مهمی را ایفا می‌کنند. آنتن‌های هوشمند با قابلیت شکل‌دهی بیم یا فیلترینگ فضایی، قابلیت آن را دارند تا براساس نیازمندی‌های شبکه، الگوی تشعشی آنتن را در راستای موردنظر شکل‌دهی کنند. در واقع این آنتن‌ها از روش‌های پردازش سیگنال برای تعیین ضرایب وزن‌دهی آنتن به صورت هوشمند استفاده می‌کنند [۱]. این آنتن‌ها بایستی توان جهت‌دهی الگوی تشعشی آنتن در راستای مطلوب را داشته باشد و همچنین همزمان بایستی اثر تداخل‌های پیرامونی که می‌تواند ناشی از کارکرد سایر کاربران شبکه باشد را نیز کاهش دهند. به این منظور روش‌های متعددی مانند روش افزایش سطح سیگنال به نویز و کمینه‌سازی واریانس نویز در

بخش دوم اعمال شده است. در این بخش اثر پله‌های قرارگیری محل تداخل‌ها و نیز اثر تعداد المان‌های آنتنی در عملکرد الگوریتم مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه‌شده در این بخش تاییدکننده روش ارائه‌شده می‌باشد.

## ۲- طراحی آنتن

آنتن آرایه‌ای مورد استفاده در این مقاله در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در ساختار آرایه از ۸ آنتن پیچ مشابه استفاده شده است که بر روی یک دایره با شعاع  $15/7$  cm به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند.



شکل (۱): ساختار آنتن آرایه‌ای و تک المان

تمامی آنتن‌های پیچ بر روی زیرلایه RO4003 با ضخامت  $3.0$  mil و ضریب دی‌الکتریک  $3.35$  طراحی شده‌اند. مشخصات دقیق‌تر یک آنتن پیچ مربعی منفرد مورد استفاده در طرح در شکل (۲) نشان داده شده است. عرض المان تشعشی  $4.45$  mm و عرض زمین  $50$  mm در نظر گرفته شده است. همچنین محل تغذیه آنتن در راستای  $x$  با فاصله  $h=4.1$  mm از مرکز انتخاب شده است. نمودار  $|S_{11}|$  آنتن منفرد پیچ در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر تزویج متقابل، الگوی تشعشی یک المان پیچ منفرد و آنتن پیچ قرار گرفته در آرایه (المان شماره ۱) در دو صفحه  $\varphi=0^\circ$  و  $\varphi=90^\circ$  در شکل (۳) مقایسه شده است. مقایسه نتایج به سادگی میزان تاثیر بالای تزویج متقابل بر روی مشخصات تشعشی آنتن را نشان می‌دهد.

نصب‌شده بر روی یک برج نیز در [۹]، بحث و بررسی شده است. در طرح این آنتن اثر تزویج متقابل بین المان‌های تشعشی در نظر گرفته شده است، اما مقابله با اثر تداخل‌ها در طراحی لحاظ نشده است. در [۱۰-۱۱] آرایه آنتنی با در نظر گرفتن تزویج متقابل بین آنتن‌ها ارائه شده است. در این آرایه‌ها که شکل‌دهی بیم با روش کمینه کردن واریانس نوین انجام شده است، تنها موقعیت سیگنال مطلوب در صفحه افقی مورد نظر قرار گرفته است.

در این مقاله از روش پیشنهادی تغییر یافته کمینه‌کردن واریانس به منظور مقابله با تداخل‌هایی با جهت نامعین استفاده شده است. در این روش، با توجه به ناشناخته بودن جهت منابع تداخل، فضای پیرامونی آنتن در دو راستای  $\theta$  و  $\varphi$  به پله‌های زاویه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود و در هر یک از این بخش‌ها یک منبع تداخل فرض می‌گردد. سپس الگوریتم به نحوی تغییر می‌یابد که علاوه بر دریافت سیگنال اصلی با سطح مناسب، امکان کاهش حداکثری اثر این تداخل‌ها را نیز داشته باشد. نکته حائز اهمیت در روش ارائه شده، نحوه محاسبه ماتریس هدایت آرایه می‌باشد. در بسیاری از مراجع به منظور محاسبه ماتریس هدایت، المان‌های تشعشی آرایه به صورت منابع ایده‌آل با الگوی تشعشی همه‌جهته فرض شده است، حال آن‌که المان‌های آنتنی در حالت واقعی دارای الگوی تشعشی همه‌جهته نمی‌باشند که این موضوع خود تاثیر به‌سزایی در عملکرد آرایه خواهد داشت. علاوه بر این، اثرات تزویج متقابل آنتن‌ها و اثرات اشیا پیرامونی آنتن نیز می‌تواند باعث تغییر الگوی آنتن‌ها گردد. بررسی‌های انجام شده نشان دهنده آن است که عدم در نظر گرفتن این اثرات باعث کاهش چشمگیر عملکرد آنتن می‌گردد [۱۲]. به منظور در نظر گرفتن این موارد، روش‌های مختلفی در مراجع ذکر شده است. در این مقاله از روش الگوی تشعشی فعال آنتن‌ها استفاده می‌شود [۱۳]. در این روش که ماتریس هدایت براساس تحلیل تمام موج آنتن استخراج می‌شود، الگوی واقعی آنتن‌ها در محاسبات ضرایب وزن دهی لحاظ می‌گردند. به عبارت دیگر اثرات تزویج متقابل بین آنتن‌ها، اشیا پیرامونی آنتن و ... که در شبیه‌سازی لحاظ شده باشند در محاسبات به صورت دقیق وارد خواهند شد. البته می‌توان به‌جای استفاده از نتایج شبیه‌سازی از نتایج اندازه‌گیری استفاده نمود که طبعاً محاسبات واقعی‌تر خواهد کرد [۱۱ و ۱۴].

در ادامه، ساختار مقاله به این شرح می‌باشد: ابتدا یک آرایه آنتنی با المان‌های آنتنی پیچ طراحی و شبیه‌سازی شده است. نتایج ارائه‌شده در این بخش نشانگر اهمیت اثر تزویج متقابل در الگوی آنتن‌ها می‌باشد. سپس در بخش دوم، الگوریتم محاسباتی ارائه شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در نهایت در بخش چهارم، الگوریتم مورد بحث بر روی آرایه معرفی شده در

مرکز انتخاب شده است. نمودار  $|S_{11}|$  آنتن منفرد پچ در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر تزویج متقابل، الگوی تشعشی یک المان پچ منفرد و آنتن پچ قرار گرفته در آرایه (المان شماره ۱) در دو صفحه  $\varphi = 0^\circ$  و  $\varphi = 90^\circ$  در شکل (۳) مقایسه شده است. مقایسه نتایج به سادگی میزان تاثیر بالای تزویج متقابل بر روی مشخصات تشعشی آنتن را نشان می‌دهد.

### ۳- الگوریتم شکل‌دهی بیم با در نظر گرفتن اثر تزویج متقابل

در این بخش الگوریتم شکل‌دهی بیم آرایه به منظور مقابله با تداخل با جهت نامعین مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که الگوریتم مورد بحث هیچگونه محدودیتی در شکل هندسی آرایه، نوع المان آن و الگوی تشعشی آن اعمال نمی‌کند. یک آنتن آرایه‌ای با  $N$  المان تشعشی را در نظر بگیرید. خروجی این آرایه که هر المان آن وزن‌دهی مناسب شده‌اند را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]$  بردار مشاهده خروجی المان‌ها بر حسب زمان و  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]$  نیز ضرایب وزنی مختلط اعمال شده به آنتن‌ها می‌باشد. در این مقاله نماد  $(\cdot)^H$  برای نمایش عملگر هرمیتین استفاده شده است. همچنین حروف توپر نشان‌گر ماتریس می‌باشند.

در یک محیط با تداخل‌های ناشناخته و متعدد می‌توان ماتریس مشاهده آرایه را به صورت زیر نوشت:

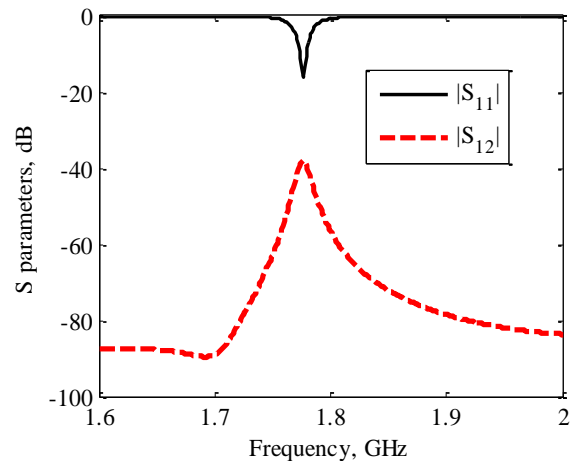
$$\mathbf{X}(t) = S(t)\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) + \sum_i^M I_i(t)\mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

که در آن،  $S(t)$  معرف سیگنال مطلوبی است که از جهت شناخته شده  $(\theta_0, \varphi_0)$  دریافت می‌شود.  $I_i(t)$  مبین سیگنال تداخلی و نامطلوبی است که از جهت ناشناخته  $(\theta_i, \varphi_i)$  به آرایه وارد می‌شوند و  $\mathbf{N}(t)$  نیز ماتریس نویز سفیدی است که در سیگنال مشاهده شده در هر المان لحاظ شده است. همچنین در این آرایه معرف بردار هدایت آرایه در راستای سیگنال مطلوب  $(\theta_0, \varphi_0)$  می‌باشد.

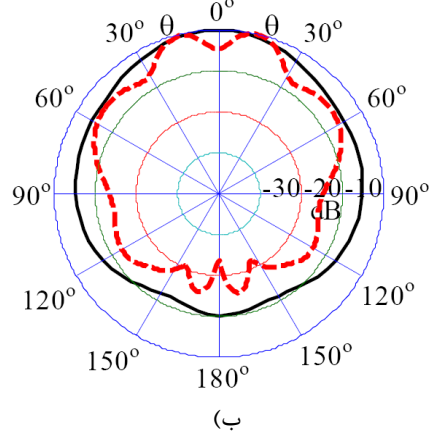
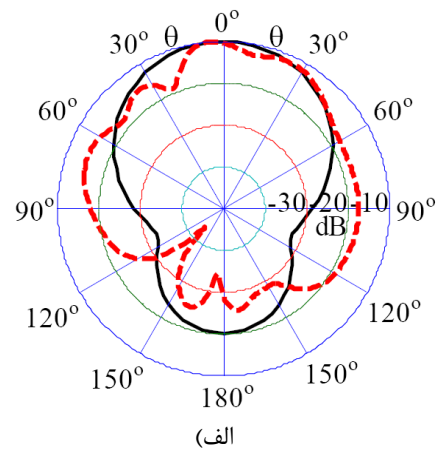
ماتریس همبستگی آرایه را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)\} = \sigma_0^2 \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)\mathbf{a}^H(\theta_0, \varphi_0) \\ &+ \sum_i^M \sigma_i^2 \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i)\mathbf{a}^H(\theta_i, \varphi_i) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \quad (3) \\ &= \sigma_0^2 \mathbf{R}_0 + \sigma_i^2 \mathbf{R}_i + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \end{aligned}$$

در رابطه فوق ماتریس‌های همبستگی برای سیگنال مطلوب و سیگنال‌های نامطلوب به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:



شکل (۲): نمودارهای پارامترهای S آنتن پچ بر حسب فرکانس



شکل (۳): الگوی تشعشی آنتن در حالت منفرد (رنگ مشکی) و آرایه‌ای (خط قرمز) در صفحات الف ( $\varphi = 0^\circ$ ) و ب ( $\varphi = 90^\circ$ )

تمامی آنتن‌های پچ بر روی زیرلایه RO4003 با ضخامت ۳۰ mil و ضریب دی‌الکتریک ۳/۳۵ طراحی شده‌اند. مشخصات دقیق‌تر یک آنتن پچ مربعی منفرد مورد استفاده در طرح در شکل (۲) نشان داده شده است. عرض المان تشعشی mm  $w = 4.5/4$  و عرض زمین  $l = 50$  mm در نظر گرفته شده است. همچنین محل تغذیه آنتن در راستای x با فاصله  $h = 4/1$  mm از

پیرامون آرایه پراکنده شده‌اند. به عبارت دیگر در زوایای مختلف  $(m\theta_{step}, n\varphi_{step})$  به ازای  $m$  و  $n$  های صحیح منابع نویز با توان مشابه فرض می‌کنیم. در این رابطه  $\theta_{step}$  و  $\varphi_{step}$  به ترتیب پله‌های زاویه‌ای برای محل قرارگیری منابع تداخل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است ماتریس همبستگی براساس رابطه (۶) براساس سیگنال نمونه‌برداری شده از عناصر آرایه محاسبه می‌شود که در آن اثر سیگنال‌های تداخل پیرامونی نیز وجود دارد.

به منظور محاسبه ماتریس جهتی آرایه در زوایای فوق، روش‌های مختلفی وجود دارد. شاید ساده‌ترین روش، ایده‌آل در نظر گرفتن الگوی آنتن‌ها باشد. در این روش الگوی المان‌ها به صورت همه جهته در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که در این صورت، مشخصات تشعشی آنتن، اثر المان‌های کناری و تزویج متقابل در محاسبات لحاظ نخواهد شد که باعث عدم دقت محاسبه ضرایب می‌گردد. در این مقاله به منظور لحاظ کردن مشخصات تشعشی آنتن‌ها به همراه تمامی اثرات تزویج متقابل بین المان‌ها از الگوی تشعشی فعال المان‌های آرایه استفاده شده است. با استفاده از این الگوی، اثر تزویج متقابل بین المان‌ها و الگوی دقیق هر آنتن در محاسبات وارد خواهد شد که دقت محاسبه ضرایب وزندهی را افزایش خواهد داد. در این روش، الگوی تشعشی هر المان با بارگذاری  $50\Omega$  سایر المان‌های تشعشی در نرم افزارهای تحلیل تمام موج استخراج می‌شود. در این مقاله از نرم افزار تحلیل تمام موج HFSS به این منظور استفاده شده است. بردار الگوی تشعشی فعال آرایه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$r\vec{E}(\theta, \varphi) = [r\vec{E}_1, r\vec{E}_2, \dots, r\vec{E}_N] \quad (10)$$

$$r\vec{E}_i(\theta, \varphi) = rE_i^\varphi(\theta, \varphi)\hat{\theta} + rE_i^\theta(\theta, \varphi)\hat{\phi} \quad (11)$$

که در این رابطه،  $\hat{\theta}$  و  $\hat{\phi}$  بردارهای یکه در راستاهای  $\theta$  و  $\varphi$  می‌باشند. بدیهی است که الگوی تشعشی هر المان با المان دیگر به دلیل اثرات متقابل متفاوت خواهند بود. همچنین این نحوه محاسبه، اثرات سایر المان‌های جانبی آنتن مانند نگهدارنده، رادوم و کابل و نیز نحوه قرارگیری آنتن در ساختار آرایه را نیز لحاظ خواهد کرد. برای به‌کارگیری رابطه (۹) براساس مشخصات تشعشی دقیق آنتن‌ها، نیاز به محاسبه ماتریس‌های  $R_i$  و بردار  $a$  در زوایای مختلف می‌باشد که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$R_i = \sum_n \sum_m \frac{1}{2Z_c} \{ r\mathbf{E}(m\theta_{step}, n\varphi_{step}) \cdot [r\mathbf{E}(m\theta_{step}, n\varphi_{step})]^* \} \quad (12)$$

$$R_0 = \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) \mathbf{a}^H(\theta_0, \varphi_0), \quad (4)$$

$$R_i = \sum_i^M \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) \mathbf{a}^H(\theta_i, \varphi_i)$$

همچنین  $\sigma_n^2$  و  $\sigma_i^2 (i=1, 2, \dots, M)$  سیگنال مطلوب  $S(t)$ ، سیگنال نامطلوب  $Li(t)$  و نویز  $n(t)$  می‌باشند. لازم به ذکر است  $IN$  یک ماتریس همبندی  $N \times N$  است. که به منظور کاهش اثر تداخلی موجود در محیط بایستی ضرایب وزندهی آرایه به نحوی تعیین شوند که خروجی آرایه در راستای مطلوب با فرض عدم حضور تداخل‌ها بیشینه باشد. به عبارت دیگر:

$$\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) = 1 \quad (5)$$

اما به منظور حذف اثر تداخل‌های پیرامونی محیط آنتن، توان نویز خروجی آرایه نیز بایستی کمینه شود که این روش در مراجع مختلف به عنوان روش پاسخ بدون اعوجاج با کمینه واریانس نویز (MVDR) شناخته می‌شود. توان خروجی آرایه را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P_{out} = E \{ \mathbf{Y}(t) \mathbf{Y}^H(t) \} = E \{ \mathbf{w}^H \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{X}(t)^H \mathbf{w} \} = \mathbf{w}^H E \{ \mathbf{X}(t) \cdot \mathbf{X}(t)^H \} \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} = \sigma_0^2 \mathbf{w}^H \mathbf{R}_0 \mathbf{w} + \sum_i \sigma_i^2 \mathbf{w}^H \mathbf{R}_i \mathbf{w} + \mathbf{w}^H \sigma_n^2 \mathbf{w} \quad (6)$$

در نتیجه مسئله کمینه‌سازی مذکور را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\min P = \mathbf{w}^H (\sigma_i^2 \mathbf{R}_i + \sigma_n^2) \mathbf{w} \quad (7)$$

subject to  $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) = 1$

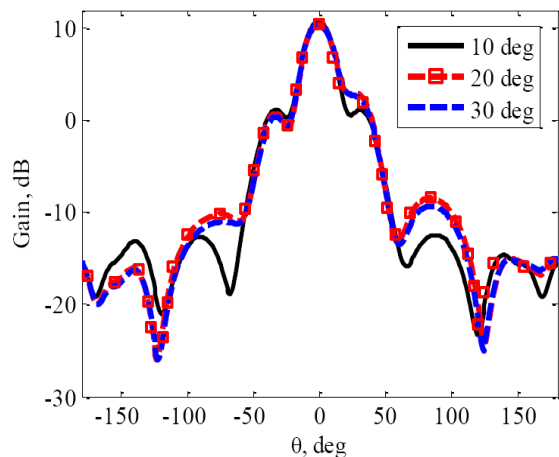
به منظور حل این مساله راه‌کارهای متفاوتی را می‌توان انتخاب کرد. در اینجا از روش متداول ضرایب لاگرانژ [۱] استفاده شده است. براین اساس می‌توان تابع ارزش را به صورت زیر نوشت:

$$L(w, \lambda) = \mathbf{w}^H (\sigma_i^2 \mathbf{R}_i + \sigma_n^2) \mathbf{w} + \lambda (\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0) - 1) \quad (8)$$

که در این رابطه،  $\lambda$  ضریب لاگرانژ و  $L(w, \lambda)$  تابع ارزش می‌باشد. پاسخ این معادله را می‌توان به سادگی به صورت زیر محاسبه کرد [۱]:

$$\mathbf{w} = \frac{(\sigma_i^2 \mathbf{R}_i + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)}{\mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)^H (\sigma_i^2 \mathbf{R}_i + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)^{-1} \mathbf{a}(\theta_0, \varphi_0)} \quad (9)$$

همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، ضرایب وزندهی آرایه به بردار هدایت آرایه در جهت سیگنال مطلوب و ماتریس همبستگی سیگنال‌های ناخواسته (نویز و تداخل) وابستگی دارند. نکته حائز اهمیت در اینجا نحوه محاسبه ماتریس همبستگی سیگنال‌های تداخل می‌باشد. از آنجا که محل ورود سیگنال تداخل به آرایه نامعین می‌باشد، در ساختار آرایه فرض را بر این می‌گیریم که منابع تداخل با توان یکسان در تمامی محیط



شکل (۴): اثر تغییر پله‌های موقعیت تداخل در عملکرد آرایه

جدول (۱): حالت‌های مختلف محل قرارگیری سیگنال مطلوب به منظور ارزیابی الگوریتم

حالت	زوایای قرارگیری سیگنال مطلوب ( $\theta_s, \varphi_s$ )
A	( $0, 0$ )
B	( $90, 20$ )
C	( $0, 0$ )

به منظور ارزیابی قدرت الگوریتم در شکل دهی بیم، سه حالت مختلف ارائه شده در جدول (۱) شبیه‌سازی شده است. در هر یک از این حالت‌ها موقعیت قرارگیری سیگنال مطلوب متفاوت انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل الگوی تشعشعی آنتن در زاویه  $\varphi = \varphi_s$  رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم ارائه شده قدرت ایجاد لوب اصلی تشعشعی در زاویه دلخواه را دارد. نکته حائز اهمیت آن است که الگوی المان آنتن پچ در زوایای حدود  $\theta_s = 0$  دارای بهره خوبی است و با میل به زوایای کناری آنتن بهره آنتن به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه عملکرد آرایه با فاصله گرفتن از زاویه  $\theta_s = 0$  کاهش خواهد یافت. این موضوع در شکل (۵) نیز در مقایسه حالت B با حالت A و C مشهود است.

در رابطه (۱۲) " نشان‌گر ضرب داخلی برداری و  $Z_c$  امپدانس مشخصه محیط را نشان می‌دهد. الگوی تشعشعی المان‌ها که با  $rE(\theta, \varphi)$  در روابط فوق نشان داده شده است، میدان الکتریکی ناحیه دور آنتن می‌باشد که در فاصله شعاعی ضرب شده است. از آنجایی که میدان الکتریکی امواج صفحه‌ای در ناحیه دور با فاصله شعاعی رابطه معکوس دارد، وابستگی به فاصله برای سادگی از روابط حذف شده است. بنابراین کافی است که ماتریس جهتی حاصل از شبیه‌سازی‌های تمام موج و یا اندازه‌گیری آنتن‌ها محاسبه و در سخت افزار پردازشی آنتن به عنوان داده ورودی برای اجرای الگوریتم ذخیره سازی شود.

#### ۴- شبیه‌سازی و تحلیل

در این بخش الگوریتم ارائه شده در بخش ۳ مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. به منظور پیاده‌سازی این الگوریتم، از آرایه آنتنی با ۸ المان پچ که در در بخش ۲ ارائه شده است، استفاده شده است. شایان ذکر است که روش ارائه شده محدودیتی در ساختار آرایه ایجاد نمی‌کند و می‌تواند ضرایب بهینه برای آرایه‌های دوبعدی و سه‌بعدی با هر نوع المان تشعشعی را محاسبه کند.

به این منظور ابتدا اثر تعداد پله‌های مطرح شده در رابطه (۱۲) برای حضور منابع تداخل در آرایه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. افزایش تعداد پله‌های قرارگیری منابع تداخل در نگاه اول ممکن است باعث رسیدن به الگوی آنتن بهینه‌تر برای مقابله با اختلال در جهت نامعلوم شود، اما باید توجه داشت که این کار حجم محاسبات را نیز افزایش خواهد داد، به ویژه در حالتی که تعداد المان‌های آنتنی زیاد باشد. ارزیابی این موضوع و انتخاب یک اندازه پله مناسب در شکل (۴) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این شکل منبع دلخواه سیگنال در زاویه  $(\theta_0 = 0, \varphi_0 = 0)$  در نظر گرفته شده است. در این شکل الگوی تشعشعی آنتن در صفحه  $\varphi = 0$  به‌ازای اندازه پله‌های ۲۰، ۱۰ و ۳۰ درجه رسم شده است. به عبارت دقیق‌تر، داده مورد نیاز الگوی‌های فعال هر المان برای ماتریس جهتی در رابطه (۱۲) در زوایای با مقادیر فوق از نرم افزار HFSS استخراج شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۴) نشانگر آن است که افزایش اندازه پله‌ها از ۱۰ درجه به ۲۰ و ۳۰ درجه باعث کاهش عملکرد آنتن خواهد شد. در واقع همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، سطح لوب‌های فرعی آنتن با کاهش اندازه پله‌ها به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که کاهش اندازه پله‌ها به کمتر از ۱۵ درجه تاثیر چندانی در عملکرد آنتن ندارد و تنها حجم محاسبات را افزایش خواهد داد.

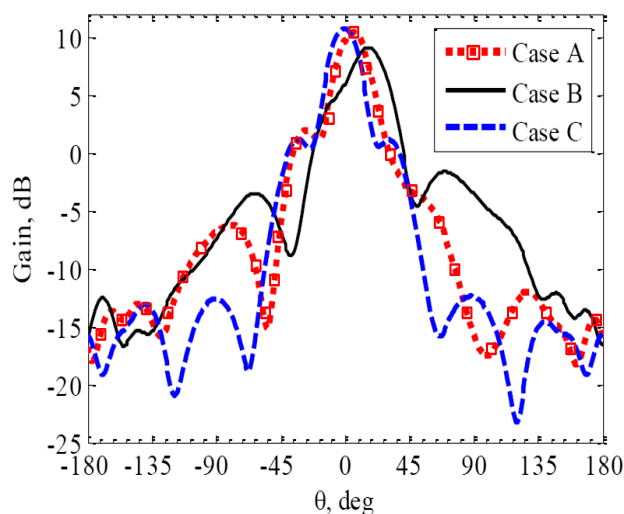
المان‌های تشعشی توان آرایه به منظور کاهش بهره آنتن در زوایای غیرمطلوب کاهش می‌یابد.

### ۵- نتیجه‌گیری

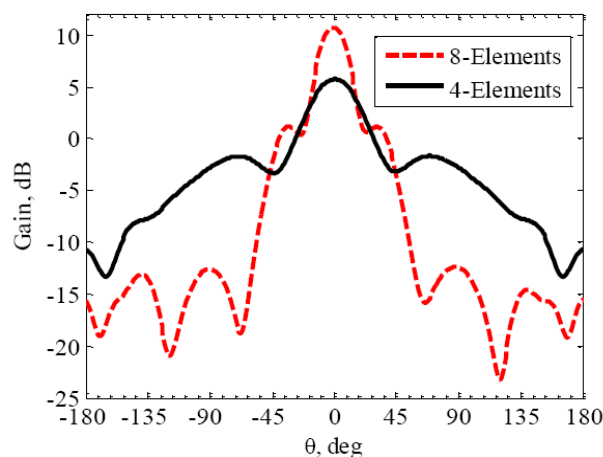
در این مقاله یک روش شکل‌دهی بیم دیجیتال به منظور جهت‌دهی بیم اصلی آنتن به سمت دلخواه و حذف اثرات منابع تداخل پیرامون آنتن با موقعیت دلخواه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در روش ارائه‌شده، با توجه به اهمیت اثر تزویج متقابل بین المان‌ها، از روش الگوی تشعشی فعال برای محاسبه ماتریس جهتی استفاده شده است. به منظور ارزیابی دقیق‌تر، روش ارائه‌شده بر روی یک آرایه‌ای با ۸ آنتن پیچ اعمال گردید. اثر تعداد نقاط مفروض برای قرارگیری منابع تداخل و نیز تعداد المان‌های آنتن از موارد مورد تحلیل در این مقاله بودند. براساس نتایج ارائه شده، نمونه‌برداری از الگوی تشعشی آنتن‌ها با پله‌های بهتر از ۱۵ درجه دقت کافی برای اجرای الگوریتم را به دست می‌دهد. نتایج تحلیل و شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده تاییدکننده قابلیت توانمندی الگوریتم شکل‌دهی بیم پیشنهادی می‌باشند.

### ۶- مراجع

- [1] S. Bellofiore et al., "Smart-antenna systems for mobile communication networks, Part 1: Overview and antenna design," *Antennas and propagation magazine, IEEE*, vol. 44, no. 3, pp. 145-154, 2002.
- [2] B. G. Frank, "Smart antennas for wireless communications with Matlab," Mc-Graw-Hill, 2005.
- [3] S. A. Vorobyov, "Principles of minimum variance robust adaptive beamforming design," *Signal Processing*, vol. 93, no. 12, pp. 3264-3277, 2013.
- [4] C. A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design," vol. 1, John Wiley & Sons, 2005.
- [5] R. A. Monzingo and T. W. Miller, "Introduction to adaptive arrays," Sci. Tech. Publishing, 1980.
- [6] B. R. Jackson et al., "Direction of Arrival Estimation Using Directive Antennas in Uniform Circular Arrays," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 2, pp.736-747, 2015.
- [7] J. R. Lambert, C. Balanis, and D. DeCarl, "Spherical cap adaptive antennas for GPS," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 2, pp. 406-413, 2009.
- [8] S. Mirzaie and R. Faraji-Dana, "Adaptive antenna array for IEEE802. 16e base station in the presence of multipath and interference and considering mutual coupling effects," *Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008, International Conference on*, Nanjing, 2008.
- [9] S. Tao and H. Ling, "Array beam forming in the presence of a mounting tower using genetic algorithms," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 6, pp. 2011-2019, 2005.
- [10] G. Roald and H. Rogier, "Optimal beam forming in the presence of mutual coupling," *Communications and Vehicular Technology, 2006 Symposium on*, Liege, IEEE, 2006.



شکل (۵): الگوی تشعشی آنتن در حالت‌های مختلف محل قرارگیری سیگنال مطلوب به منظور ارزیابی الگوریتم



شکل (۶): مقایسه الگوی تشعشی آرایه ۸ و ۴ تایی در صفحه  $\phi=0$

تعداد المان‌های آرایه، نقش به‌سزایی در عملکرد منبع آنتن برای حذف اثر تداخل‌ها دارند. یک آرایه آنتنی با  $N$  المان تشعشی قادر است تعداد  $N-1$  نقطه صفر در راستای تداخل‌ها ایجاد کند. اگرچه در مساله مطروحه در این مقاله محل تداخل‌ها و تعداد آن معین نیست، اما واضح است که افزایش تعداد المان‌ها باعث افزایش توان آنتن در حذف اثرات تداخلی در جهت‌های غیراصلی را خواهد داشت. به منظور ارزیابی این موضوع، نتایج حالت "ج" مورد بحث در جدول (۱) که برای آرایه ۸ آنتنی ارائه شده است، با یک آرایه ۴ آنتنی در شکل (۶) مقایسه شده است. این آرایه مشابه با آرایه ۸ تایی معرفی شده در شکل (۱) به صورت دایروی با شعاع  $a=85/1$  mm می‌باشد که ۴ المان آنتنی بر روی محورهای مختصات جانمایی شده‌اند. نتایج نشان داده شده در شکل مبین این موضوع است که با کاهش تعداد

- [11] D. Pieterjan et al., "Beamforming in the presence of mutual coupling based on constrained particle swarm optimization," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 6, pp. 1655-1666, 2009.
- [12] K. A. Griffith and I. J. Gupta, "Effect of mutual coupling on the performance of GPS AJ antennas," *Navigation*, vol. 56, no. 3, pp. 161-173, 2009.
- [13] D. M. Pozar, "The active element pattern," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 8, pp. 1176-1178, 1994.
- [14] R. Hendrik and D. D. Zutter, "Beam forming strategies for compact arrays in mobile terminals using the exact active element pattern method," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 35, no. 3, pp. 201-203, 2002.

**Digital Beamforming Antenna Array to Unknown  
Interference Countermeasure**

**S. H. Sedighy<sup>\*</sup>, M. Rasuli Amir Hajloo**

**Iran University of Science and Technology**

(Received: 08/09/2016, Accepted: 23/11/2016)

**Abstract**

*An optimal beam forming method is proposed which incorporates all electromagnetic characteristics of the antenna elements, including radiation pattern, mutual coupling and radome effect. The optimal beam forming technique minimizes the total power radiated by the antenna array while the response in a desired direction is maintained. By considering the active element patterns efficient beam forming algorithm is obtained which is able to manage all mutual coupling effects. Simulation results show the performance of the proposed algorithm applied to an antenna array.*

**Keywords:** Digital Beamforming, Mutual Coupling, Antenna Array

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: sedighy@iust.ac.ir