

تصحیح خطای فاز ناشی از خطاهای مکانیکی در آنتن‌های آرایه فازی فعال بر پایه الگوریتم PSO

امیر زاهدی^{۱*}، بیژن عباسی آرند^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۳)

چکیده: هر کانال آنتن آرایه فازی به طور ذاتی دارای خطاهای دامنه و فاز است. بررسی اثر خطاهای مکانیکی بر روی عملکرد تشعشی آنتن‌های آرایه فازی فعال، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، دو نوع خطای مکانیکی به نام‌های خطای اعوجاج ساختاری آنتن و خطای تصادفی در چینش المان‌های تشعشی مورد بررسی قرار می‌گیرد و رابطه بین خطای مکانیکی با عملکرد الکترومغناطیسی آنتن ارائه می‌شود. خطاهای مکانیکی باعث تولید خطاهای فاز و کاهش عملکرد آنتن از قبیل کاهش بهره، افزایش سطوح لوب فرعی، و راستای ناصحیح پرتو اصلی آنتن می‌شوند. به جهت بهبود کارایی آنتن در حضور خطاهای مکانیکی، روش جبران‌سازی فاز برای تصحیح خطا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده به خوبی خطای فاز را تصحیح کرده و الگوی تشعشی آنتن به طور مطلوبی به الگوی ایده‌آل در حالت بدون خطا، بازگردانده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آرایه فازی، آنتن، الگوریتم PSO، المان تشعشی

۱- مقدمه

صفحه آرایه بر روی عملکرد آنتن را بررسی کرده‌اند. در مرجع [۱] به طور خاص دو مدل از اعوجاج مکانیکی و اثر آن بر روی الگوی تشعشی آنتن تحلیل شده است. تمامی این کارها تنها اثر خطاهای مکانیکی را بررسی کرده و روش تصحیح خطا در هیچ کدام از این مراجع ارائه نشده است. بنابراین، در این مقاله پس از بررسی خطای اعوجاج ساختاری و خطای تصادفی در چینش المان‌ها، روش تصحیح خطای فاز ناشی از این خطاها با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) ارائه می‌شود.

از آنجایی که اسکن سریع پرتو به صورت الکترونیکی مزایای عمده‌ای را فراهم می‌کند، آنتن‌های آرایه فازی توجه قابل ملاحظه‌ای را در کاربردهای نظامی و صنعتی به خود جلب کرده‌اند. یک آنتن آرایه فازی فعال به طور معمول شامل اجزایی مانند صفحه آرایه، ماژول T/R، شبکه تغذیه، فریم ساختاری آنتن و غیره می‌باشد. با توجه به این اجزاء، خطا در این آنتن‌ها به دو دسته تقسیم می‌شود: خطا در تغذیه و خطا در ساختار آنتن. خطای ساختاری از دو جنبه بررسی می‌شود [۱]: جنبه اول، خطای پروسه مکانیکی است که ناشی از صحت تجهیزات ساخت و دقت نصب المان‌های تشعشی است، و دیگری خطا به سبب اعوجاج در صفحه آرایه است که در نتیجه توان گرمایی، تابش خورشید، و لرزش آنتن می‌باشد. در واقع، خطاهای ساختاری می‌تواند باعث تغییر فاصله بین المان‌ها و تغییر در توزیع فاز میدان ناحیه دور و تولید خطاهای تغذیه گردد. تمامی این خطاها می‌توانند باعث کاهش عملکرد تشعشی آنتن شوند. در مرجع [۲] اثر خطای تصادفی بر روی کارایی آنتن آرایه فازی با استفاده از آنالیز آماری بررسی شده است. مراجع [۳-۵] تاثیر صاف‌شدگی

۲- تحلیل صفحه اعوجاج یافته در آنتن‌های آرایه فازی فعال

به طور معمول، دو نوع اعوجاج در آنتن‌های آرایه فازی فعال به وجود می‌آید [۱]: اعوجاج خمیدگی و کاسه‌ای‌شکل، که ساختار مربوط به این دو نوع اعوجاج برای کل آرایه، در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱) و ویژگی‌های منحنی‌های ریاضیاتی، مرکز فاز المان‌های تشعشی در ساختار خمیدگی شکل با رابطه (۱) داده می‌شود [۱ و ۲]:

در راستای پرتو را به وجود می‌آورند و حتی با در نظر گرفتن خطاهای دامنه، تغییر چندانی در الگوی تشعشی ظاهر نمی‌شود. خطای اعوجاج ساختاری در آنتن آرایه فازی فعال معمولا کوچک است.

بنابراین، در ناحیه پرتو اصلی، خطای فاز فضایی بین المان (m,n) و المان (۱،۱) که با $\Delta\varphi_{mn}$ نشان داده می‌شود، به طور تقریبی برابر با ضرب Z_{max} در عدد موج k است. وقتی که هدف در موقعیت (θ, ϕ) قرار دارد، خطای فاز روزه آنتن به صورت رابطه (۳) است [۱]:

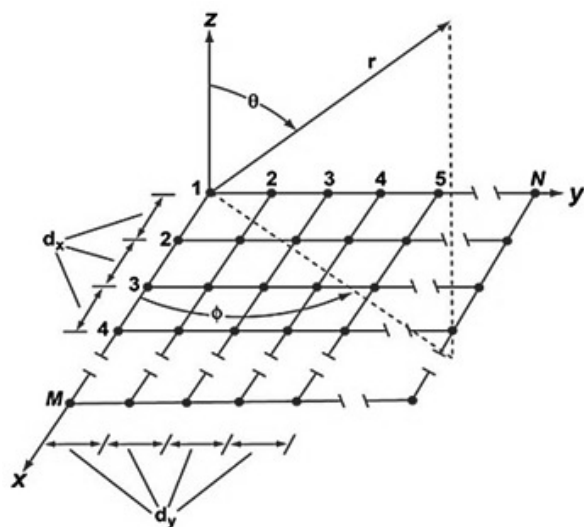
$$\Delta\varphi_{Amn} = \cos\theta\Delta\varphi_{mn} \approx k \cos\theta z_{mn} \quad (3)$$

برطبق خطای فاز اضافی المان تشعشی با جابه‌جایی در راستای z ، تابع الگوی آنتن با خطای صفحه اعوجاج‌یافته به صورت زیر قابل بیان است [۱]:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \times \exp\left\{jk \left[md_x U + nd_y V + \cos\theta z_{mn}\right]\right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} U &= \sin(\theta) \cos(\phi) \\ V &= \sin(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، A_{mn} ضریب تحریک مختلط المان‌ها، k عدد موج، Z_{mn} جابه‌جایی المان (m,n) در راستای محور z ، و (θ, ϕ) زوایای سمت و فراز در دستگاه مختصات کروی است. باید به این نکته توجه شود که در اینجا تنها جابه‌جایی در راستای محور z در نظر گرفته شده است، در حالی که بر اثر وجود اعوجاج، محور اصلی المان‌ها نیز دچار تغییر می‌شود. بنابراین، اثر جابه‌جایی محور اصلی المان‌ها نیز می‌تواند لحاظ گردد.



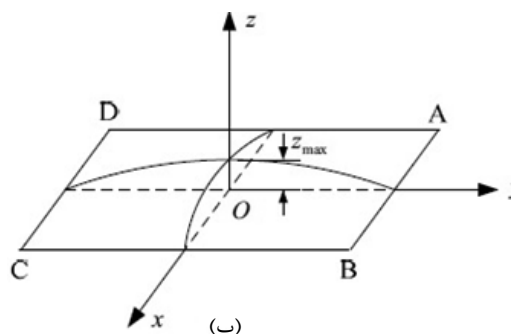
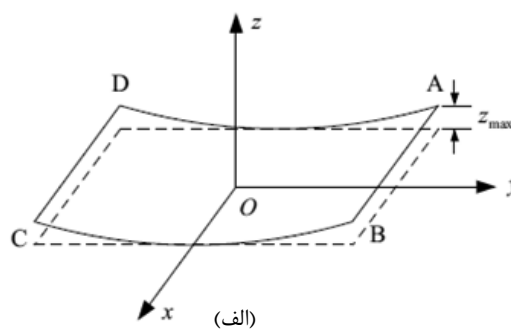
شکل (۲). آنتن آرایه صفحه‌ای

$$z = z_{\max} \left(\frac{y}{y_{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، نصف طول آرایه در راستای محور y و Z_{max} ماکزیمم جابه‌جایی المان‌های تشعشی در راستای محور z است. همچنین برای ساختار کاسه‌ای شکل، مرکز فاز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$z = z_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{x_{\max}^2} \right) \left(1 - \frac{y^2}{y_{\max}^2} \right) \quad (2)$$

X_{max} و Y_{max} به ترتیب نصف طول آرایه در راستای محورهای x و y هستند.



شکل (۱). انواع ساختار اعوجاج در آنتن آرایه صفحه‌ای، (a) اعوجاج خمیدگی، (b) اعوجاج کاسه‌ای شکل [۱].

برای تحلیل صفحه اعوجاج‌یافته، آنتن آرایه صفحه‌ای شکل (۲) را در نظر بگیرید. به دلیل نزدیک بودن فاصله بین المان‌ها، اثر خطای ناشی از اعوجاج ساختاری بر روی دامنه المان‌های تشعشی ناچیز بوده و قابل صرفنظر کردن است. به دلیل تغییر در مرکز فاز المان‌ها، خطای المان در راستای z به صورت یک عامل فاز اضافی در تابع الگو قابل معرفی است [۱].

به طور کلی، این خطاهای فاز هستند که شکل الگوی تشعشی را دچار تغییر می‌کنند و کاهش بهره، افزایش سطوح لوب کناری و خطا

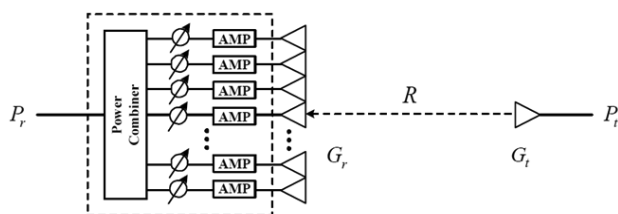
در معادله (۸)، A_{mn} ضریب تحریک مختلط المان‌ها با دامنه $|A_{mn}|$ و فاز ϕ_{mn} ، k عدد موج، d_x و d_y به ترتیب فاصله دو المان مجاور در راستای محورهای x و y هستند. f_{mn} الگوی مربوط به المان‌های آنتن، (θ, ϕ) و زوایای سمت و فراز در دستگاه مختصات کروی است. ϕ_{mn}^{error} مقادیر خطای فاز المان‌ها، ناشی از خطاهای مکانیکی بوده که با استفاده از روابط (۳) و (۷) مدل می‌شوند.

بهره آنتن متناسب با شدت تشعشع، $U(\theta, \phi)$ و شدت تشعشع متناسب با مربع اندازه F ، $F(\theta, \phi) \propto |F(\theta, \phi)|^2$ است. بنابراین در اینجا بهره آنتن به صورت $\eta(\theta, \phi) = |F(\theta, \phi)|^2$ هر نظر گرفته می‌شود.

در مرجع [۶] روشی برای افزایش بهره آنتن آرایه فازی با استفاده از تصحیح خطای فاز و به وسیله الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در این مرجع، خطای فاز به صورت تصادفی و با توزیع گوسی در نظر گرفته شده است. با اعمال الگوریتم ژنتیک به یک آرایه 20×10 ، بهره آنتن به مقدار 2.51 dB افزایش یافته و الگوی تشعشعی آنتن به الگوی ایده‌آل در حالت بدون خطا، نزدیک شده است. در شکل (۳) ساختار اندازه‌گیری مربوط به این کار نشان داده شده است. در سمت چپ، آنتن آرایه فازی و در سمت راست یک آنتن مرجع قرار دارد. این ساختار، متناظر با معادله انتقال فریس است که با رابطه (۹) بیان می‌شود. از این رابطه می‌دانیم که بهره آنتن آرایه تحت شرایطی ماکزیمم می‌شود که توان دریافتی P_r ماکزیمم شود. بنابراین، توان دریافتی باید ماکزیمم شود تا بهره آنتن آرایه به بالاترین مقدار افزایش یابد [۶].

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، توان دریافت شده توسط آنتن آرایه فازی، P_t توان قابل ارسال از آنتن مرجع، G_t بهره آنتن فرستنده، G_r بهره آنتن گیرنده، و R فاصله بین دو آنتن می‌باشد. فاصله بین دو آنتن طوری انتخاب می‌شود که شرایط میدان دور به وجود آید. از این رابطه مشخص است که بهره آنتن آرایه فازی زمانی ماکزیمم می‌شود که توان دریافتی توسط آن ماکزیمم شود.



شکل (۳). آرایش اندازه‌گیری مورد نظر برای کالیبراسیون [۶]

۳- بررسی اثر خطاهای تصادفی در چینش المان‌های آنتن آرایه فازی

آنتن‌های آرایه فازی معمولاً طوری طراحی می‌شوند که المان‌ها بر روی یک آرایش خاص با فواصل مساوی قرار گیرند. در واقعیت، چنین فواصل و موقعیت‌های ایده‌آلی برای المان‌های تشعشعی، در طی فرآیند ساخت قابل دستیابی نمی‌باشد. بنابراین، وجود خطاهای تصادفی در موقعیت المان‌ها اجتناب‌ناپذیر است. با در نظر گرفتن خطاهای تصادفی در مختصات المان‌ها، الگوی تشعشعی میدان دور به صورت زیر می‌تواند بیان شود [۲]:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \exp\{jk [x_{mn}U + y_{mn}V + z_{mn}W]\} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، x_{mn} ، y_{mn} و z_{mn} مختصات المان (m, n) است که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\begin{aligned} x_{mn} &= md_x + \xi_{mn} \\ y_{mn} &= nd_y + \eta_{mn} \\ z_{mn} &= \zeta_{mn} \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ξ_{mn} ، η_{mn} و ζ_{mn} خطاهای تصادفی هستند که در اینجا به صورت توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار در نظر گرفته می‌شوند. برای لحاظ کردن خطای تصادفی در موقعیت المان‌ها، از تابع $r = mu + \text{sigma} * \text{randn}$ در نرم‌افزار متلب استفاده شده است، که mu میانگین توزیع نرمال و sigma بیانگر انحراف معیار است. همان‌طور که مشخص است خطای تصادفی همانند خطای اعوجاج ساختاری، فاز میدان الکتریکی المان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و باعث تولید خطای فاز می‌شود. به‌طور خاص، خطاهای فاز باعث کاهش بهره، افزایش سطوح لوب فرعی، و راستای ناصحیح پرتو آنتن می‌شوند. بنابراین، تصحیح خطای فاز هر کانال آنتن آرایه فازی به‌منظور افزایش عملکرد تشعشعی آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

۴- الگوریتم تصحیح خطای فاز

یک آنتن آرایه فازی صفحه‌ای $M \times N$ همانند شکل (۲) را در نظر بگیرید، در این صورت، تابع الگوی تشعشعی این آنتن با رابطه (۸) می‌تواند بیان شود.

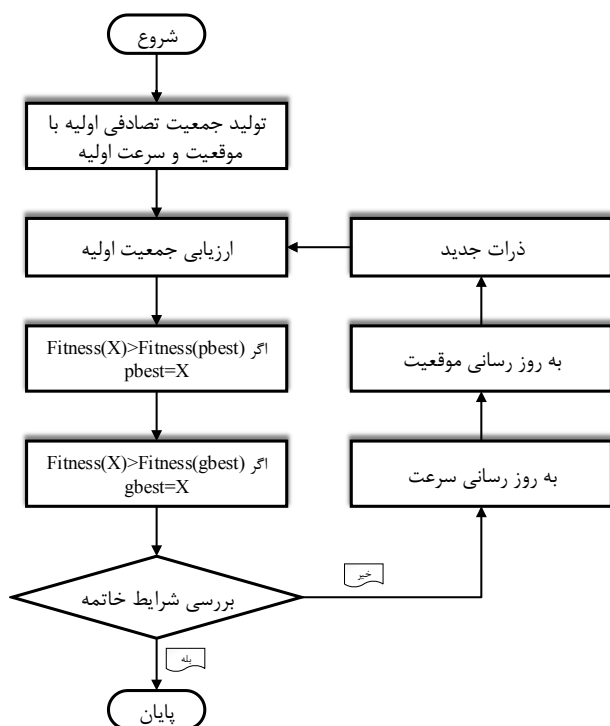
$$F(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} \times \exp[j\phi_{mn}^{error}] \times f_{mn}(\theta, \phi) \times \exp\{jk [md_x U + nd_y V]\} \quad (8)$$

اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که توان اندازه‌گیری شده، مقدار قابل قبولی داشته باشد یعنی نزدیک به مقدار ایده‌آل باشد، مقادیر فاز فعلی به عنوان فاز تصحیح‌المان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت، با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) موقعیت و سرعت هر ذره به‌روزرسانی می‌شود. نحوه به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات با توجه به بهترین موقعیت تجربه شده توسط هر ذره ($pbest$) و بهترین موقعیت تجربه‌شده جمعی ($gbest$) می‌باشد. موقعیت جدید برای هر ذره، بیانگر توزیع فاز جدید‌المان‌های آرایه می‌باشد. با توجه به مقادیر فاز جدید، مجدداً توان آرایه اندازه‌گیری می‌شود. این روند آنقدر ادامه می‌یابد تا این که توان اندازه‌گیری شده آرایه به مقدار ماکزیمم برسد. در این صورت، $gbest$ که بهترین موقعیت تجربه‌شده در کل فضای جستجو است، حاوی توزیع فاز صحیح‌المان‌های آرایه می‌باشد.

$$v_{i,j}(t+1) = \omega v_{i,j}(t) + r_1 c_1 (pbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + r_2 c_2 (gbest_j(t) - x_{i,j}(t)) \quad (15)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (16)$$

در روابط فوق، $\omega=1$ ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت، c_1 و c_2 به ترتیب ضرایب ثابت برابر با ۲، $pbest_{i,j}(t)$ بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره نام در بعد j ام و در تکرار t ام، $gbest_j(t)$ بهترین موقعیت تجربه‌شده جمعی در بین کل ذرات در بعد j ام و در تکرار t ام است.



شکل ۴: فلوجارت الگوریتم اجتماع ذرات

در این مقاله، از همین ایده برای تصحیح خطای فاز آنتن آرایه فازی استفاده شده است. تعریف مسئله، پیدا کردن توزیع فاز مناسب از ضریب تحریک مختلط A_{mn} برای تمامی‌المان‌ها است، به طوری که مقدار یک تابع برازندگی ماکزیمم شود. تابع برازندگی در این مسئله طبق رابطه (۱۰)، توان دریافتی آنتن آرایه فازی در نظر گرفته شده، که بهره آنتن آرایه فازی به صورت $G_r(\theta, \phi) = |F(\theta, \phi)|^2$ داده می‌شود.

در واقع، مقادیر فاز ضرایب مختلط A_{mn} به‌عنوان ورودی تابع هدف هستند.

$$Fitness(\phi_{mn}) = P_t \times G_t \times G_r(\theta, \phi) \times \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (10)$$

۴-۱- اعمال الگوریتم اجتماع ذرات

با در نظر گرفتن یک آرایه $M \times N$ ، الگوریتم اجتماع ذرات با تعریف جمعیت اولیه‌ای از ذرات به تعداد N_{pop} عضو با موقعیت تصادفی، آغاز می‌شود. بعد هر ذره به اندازه تعداد‌المان‌های آرایه بوده و هر بعد حاوی اطلاعات فاز مربوط به‌المان‌ها است که مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه بین ۰ تا ۳۶۰ درجه به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. در واقع، موقعیت هر ذره، بیانگر توزیع فاز خاصی از آرایه است. پس از تعریف موقعیت تصادفی برای هر ذره، یک بردار سرعت به صورت تصادفی در بازه بین ۳۶- تا ۳۶ برای هر ذره تعریف می‌شود. محدوده سرعت در نظر گرفته‌شده با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) است. فلوجارت الگوریتم اجتماع ذرات، در شکل (۴) نشان داده شده است.

تعریف بردار موقعیت و سرعت به صورت تصادفی و با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) می‌باشد:

$$X_i = [x_{i,j}], \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$V_i = [v_{i,j}], \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

در روابط فوق، X_i و V_i به ترتیب بردار موقعیت و سرعت برای ذره نام است.

$$Velocity_{max} = 0.1 \times (Var_{max} - Var_{min}) \quad (13)$$

$$Velocity_{min} = -Velocity_{max} \quad (14)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴)، $Var_{min} = 0$ و $Var_{max} = 360$ ، به ترتیب کران بالایی و کران پایینی تغییرات متغیرها می‌باشند. با توجه به شکل (۳) با قرار دادن یک آنتن مرجع در ناحیه میدان دور در مقابل آنتن آرایه فازی و اختصاص فاز تصحیح به هر‌المان آنتن (تعریف موقعیت تصادفی برای هر ذره)، با استفاده از رابطه فریس، توان آرایه

۵- نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- تاثیر خطاهای مکانیکی بر روی الگوی تشعشعی

در جدول (۱) پارامترهای مربوط به آنتن شبیه‌سازی شده در باند فرکانسی X داده شده است. همچنین در شکل‌های (۵) و (۶) الگوهای به‌دست آمده با در نظر گرفتن دو نوع اعوجاج ساختاری در صفحه آرایه و به‌ازای مقادیر مختلف خطا نشان داده شده است.

جدول (۱). پارامترهای هندسی آنتن آرایه فازی

$f(\text{GHz})$	۹
N	۴۰
M	۲۵
dy	$\lambda/2$
dx	$\lambda/2$
عرض آرایه	$۱۹/۵\lambda$
طول آرایه	۱۲λ

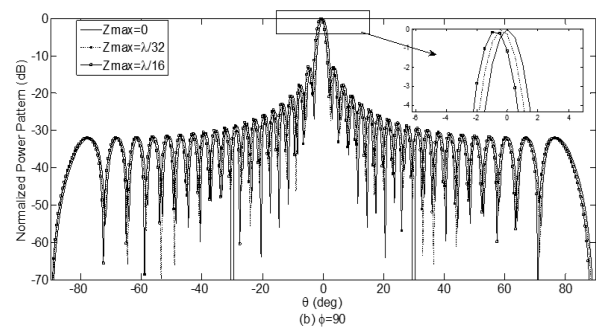
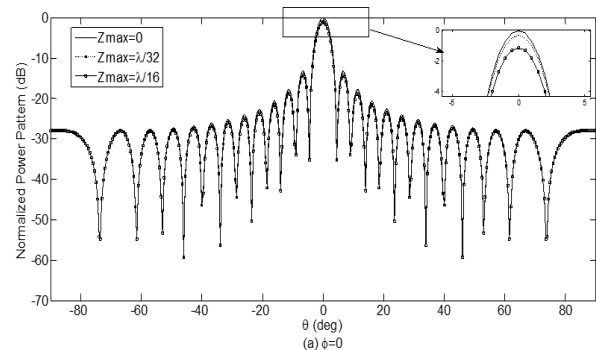
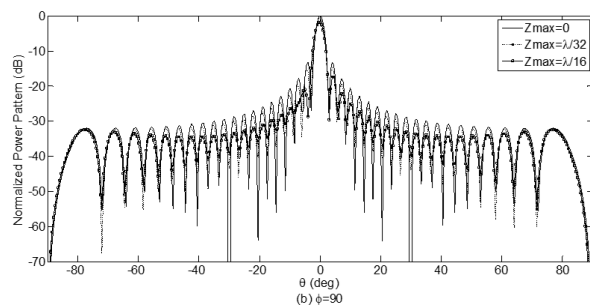
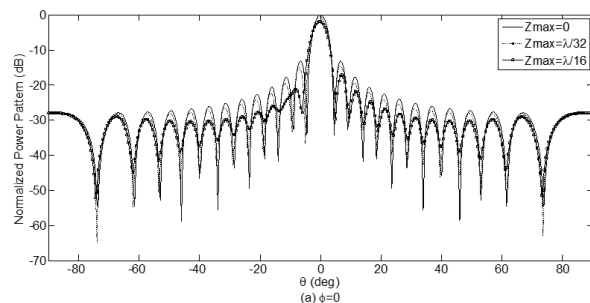
از نتایج شبیه‌سازی مشخص است که هر دو نوع اعوجاج، باعث کاهش بهره و انحراف در راستای پرتو اصلی آنتن می‌شوند. به‌علاوه، تاثیر اعوجاج در صفحه $\phi=90^\circ$ شدیدتر از صفحه $\phi=0^\circ$ می‌باشد.

برای اعوجاج خمیدگی شکل و در صفحه $\phi=0^\circ$ به‌ازای مقادیر مختلف اعوجاج، کاهش بهره مشهود است. اما در صفحه $\phi=90^\circ$ علاوه بر کاهش بهره، سطح لوب فرعی اول افزایش پیدا کرده و انحراف در راستای پرتو اصلی نیز به‌وجود آمده است.

در جدول (۲)، مقادیر کاهش بهره و انحراف پرتو اصلی برای اعوجاج خمیدگی شکل به‌ازای مقادیر مختلف خطا، داده شده است. از روی نتایج به‌دست آمده در شکل (۶) می‌توان پی برد که اعوجاج کاسه‌ای شکل اثر مخرب‌تری بر روی الگو دارد و در هر دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ بهره آنتن کاهش یافته و راستای پرتو اصلی تغییر کرده است.

جدول (۲). عملکرد آنتن آرایه فازی در حضور اعوجاج خمیدگی شکل

انحراف پرتو اصلی (degrees)		کاهش بهره (dB)		مقادیر اعوجاج
$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	
-۰/۵	۰	-۰/۰۳	-۰/۲۷	$\lambda/32$
-۱	۰	-۰/۱۵	-۱/۱۲۴	$\lambda/16$



شکل (۵). تاثیر اعوجاج خمیدگی شکل بر روی الگوی تشعشعی آنتن:

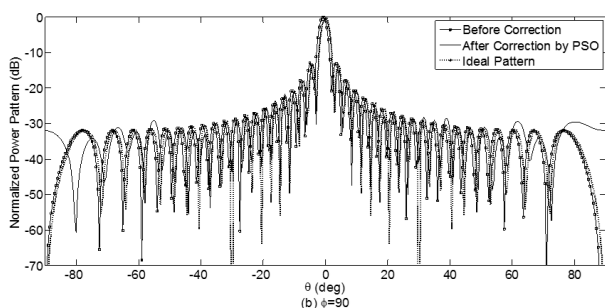
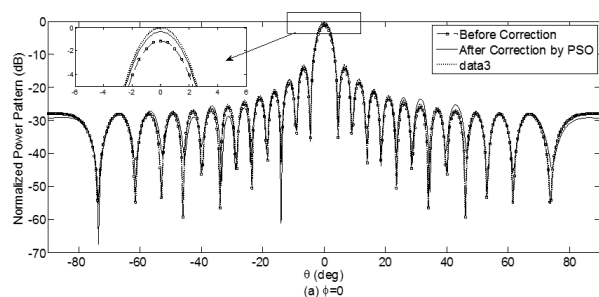
$\phi=90^\circ$ (b) , $\phi=0^\circ$ (a)

شکل (۶). تاثیر اعوجاج کاسه‌ای شکل بر روی الگوی تشعشعی آنتن:
 $\phi=90^\circ$ (b) , $\phi=0^\circ$ (a)

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم تصحیح خطای فاز

نتایج حاصل از اعمال الگوریتم اجتماع ذرات برای تصحیح خطای فاز ناشی از دو نوع اعوجاج ساختاری، در شکل‌های (۸ و ۹) نشان داده شده است. شبیه‌سازی برای آرایه داده‌شده در جدول (۱) متشکل از 25×40 المان در باند فرکانسی X و به ازای اعوجاج $z_{max} = \lambda/16$ انجام گرفته است. به ازای اعوجاج خمیدگی و در صفحه $\phi = 0^\circ$ بهره آنتن پس از تصحیح، از مقدار $-1/12$ dB به مقدار $-0/34$ dB افزایش یافته است و در صفحه $\phi = 90^\circ$ انحراف پرتو اصلی از مقدار ۱- درجه به مقدار صفر درجه رسیده است.

به‌ازای اعوجاج کاسه‌ای و در هر دو صفحه‌ی $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ بهره آنتن پس از تصحیح از مقدار -2 dB به مقدار $-0/5$ dB افزایش یافته و انحراف پرتو اصلی از مقدار $-0/5$ درجه به مقدار صفر درجه رسیده است.



شکل (۸). الگوی تشعشعی آنتن، قبل و بعد از تصحیح خطای فاز ناشی از اعوجاج خمیدگی شکل

برای اجرای الگوریتم اجتماع ذرات، جمعیت اولیه‌ای از ذرات به تعداد $N_{pop} = 500$ و تعداد متغیرهای هر ذره برابر با تعداد المان‌های آرایه یعنی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده و الگوریتم برای ماکزیمم تعداد تکرار ۵۰۰ اجرا شده است.

همچنین در شکل (۱۰) نتیجه تصحیح خطای فاز ناشی از خطای تصادفی در چینش المان‌ها، به‌ازای انحراف معیار

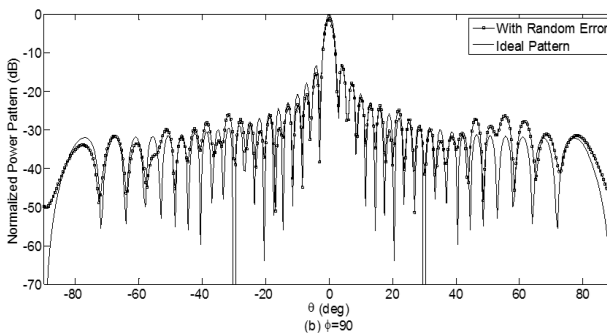
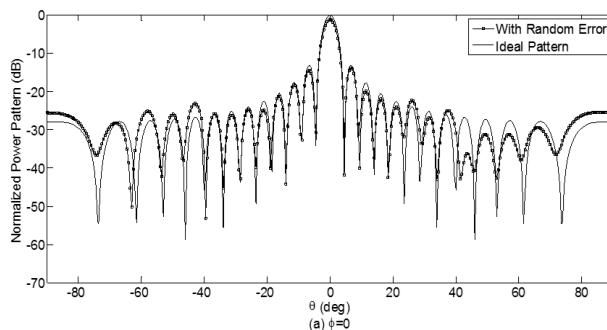
در جدول (۳) مقادیر کاهش بهره و انحراف پرتو اصلی برای اعوجاج کاسه‌ای شکل به‌ازای مقادیر مختلف خطا داده شده است.

جدول (۳). عملکرد آنتن آرایه فازی در حضور اعوجاج کاسه‌ای شکل

انحراف پرتو اصلی (degrees)		کاهش بهره (dB)		مقادیر اعوجاج
$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	
-۰/۵	-۰/۵	-۰/۶	-۰/۶	$\lambda/32$
-۰/۵	-۰/۵	-۲	-۲	$\lambda/16$

در شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی برای آنتن داده‌شده در جدول (۱) با در نظر گرفتن خطای تصادفی در مختصات المان‌ها و با انحراف معیار برابر در هر سه راستا $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \lambda/16$ نشان داده شده است. خطای تصادفی در مختصات المان‌ها، باعث به هم خوردن شکل الگوی تشعشعی و کاهش بهره به مقدار حدود $-1/2$ dB شده است.

در صورتی که الگوریتم مجدداً اجرا شود و مقادیر جدید خطا براساس توزیع احتمال لحاظ شود، به دلیل کوچک بودن مقدار خطای تصادفی، ماکزیمم پرتو اصلی تغییر چندانی نکرده و نتایج مشابه خواهد بود.



شکل ۷: تاثیر خطای تصادفی در موقعیت المان‌ها بر روی الگوی تشعشعی: خطا با انحراف معیار $\sigma = \lambda/16$ (a) $\phi = 0^\circ$ ، (b) $\phi = 90^\circ$

۶- نتیجه‌گیری

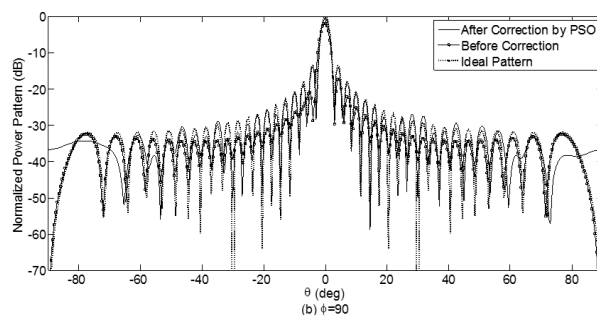
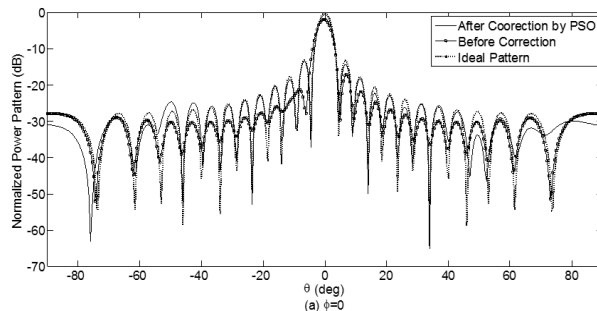
در این مقاله، بررسی اثر خطای اعوجاج ساختاری و خطا در چینش المان‌های آنتن آرایه فازی فعال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خطاهای مکانیکی باعث تولید خطای فاز و کاهش عملکرد آنتن آرایه فازی، از قبیل کاهش بهره و انحراف در راستای پرتو اصلی آنتن می‌شوند. بنابراین با بررسی اثر خطاهای مکانیکی می‌توان مقدار تیرانس مجاز این خطاها را در طراحی آرایه لحاظ نمود.

پس از تحلیل خطاهای مکانیکی، روش تصحیح خطای فاز با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات ارائه شده است. از نتایج مشخص است که با اعمال الگوریتم مورد نظر و تصحیح خطای فاز، کاهش کارایی آنتن آرایه فازی جبران می‌شود. بنابراین، الگوریتم ارائه‌شده، روشی کارآمد برای تصحیح خطای فاز ناشی از خطاهای مکانیکی بوده، و می‌تواند الگوی تشعشی آنتن را به حالت قبل از وجود خطا نزدیک کند.

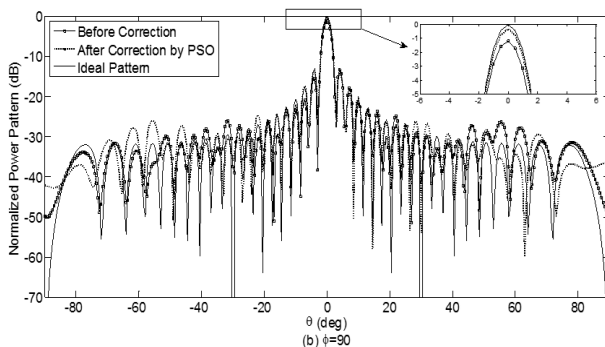
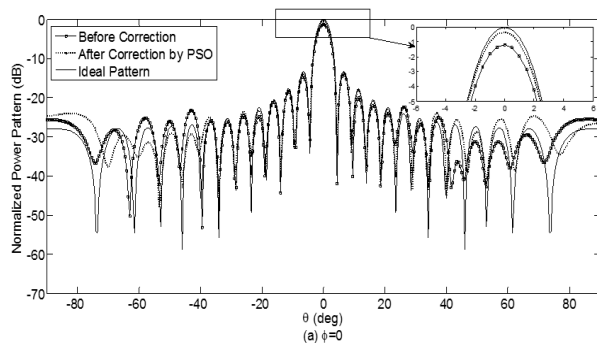
۷- مراجع

- [1] C. Wang, W. Wang, H. Bao, F.-S. Zhang, and X. Li, C. Wang, W. Wang, H. Bao, F.-S. Zhang, and X. Li, "On coupled structural-electromagnetic modeling and analysis of rectangle active phased array antennas," in *Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on, pp. 435-438, 2008.
- [2] H. Wang, "Performance of phased-array antennas with mechanical errors," *Aerospace and Electronic Systems*, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 535-545, 1992.
- [3] L. Jianxin and G. Tie, "Analysis of Element Failure and Tolerance in Solid-State Active Phased Array [J]," *Modern Radar*, vol. 6, pp. 36-44, 1992.
- [4] AA. Zaghoul, R. Gupta, E. Kohls, and O. Kilic, "Design and performance assessment of active phased arrays for communications satellites," in *Phased Array Systems and Technology*, 2000. Proceedings 2000, IEEE International Conference on, pp. 193-196, 2000.
- [5] M. N. Mollah, N. C. Karmakar, and J. S. Fu, "Development of phased array antenna by controlling the filling factor of periodic structure," *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol. 17, pp. 353-359, 2007.
- [6] S. H. Son, W. Hwang, and S. I. Jeon, "Gain enhancement of large phased array antennas by phase error correction," in *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 137-140, 2007.

$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma = \lambda/16$ ارائه شده است. در هر دو صفحه و بهره آنتن پس از تصحیح فاز از مقدار $1/2\text{dB}$ - به مقدار $0/33\text{dB}$ - افزایش یافته است.



شکل (۹). الگوی تشعشی آنتن، قبل و بعد از تصحیح خطای فاز ناشی از اعوجاج کاسه‌ای شکل



شکل (۱۰). الگوی تشعشی آنتن، قبل و بعد از تصحیح خطای فاز ناشی از خطای تصادفی در موقعیت المان‌ها

**Mechanical Phase Error Correction of Active Phased Array Antennas
Based on PSO Algorithm**

A. Zahedi*, B. Abbasi-Arand

Department of Electrical & Computer Engineering, Tarbiat Modares University

(Receive: 2015/03/12, Accept: 2015/08/25)

Abstract

Each Channel of the phased array antenna innately has the amplitude and phase errors. The effect of mechanical errors on the performance of the active phased array antennas is of great importance. In this paper two kinds of mechanical errors, namely, antenna structural distortions and random errors in element positions is studied and the relationship between the electromagnetic performance and the mechanical errors of the antenna is proposed. The mechanical errors can create phase errors and reduce the antenna performance, for instance the gain reduction, side-lobe level increase, and inaccurate beam direction. In order to enhance the performance of the antenna in the presence of mechanical errors, a phase compensation method for error correction using Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed. The simulation results show that the proposed method can greatly correct the phase errors and after correction the overall radiation pattern is recovered close to ideal radiation pattern without error.

Keywords: Antenna, Phased Array, PSO Algorithm, Radiated Element.

* Corresponding Author Email: Amir.zahedy@modares.ac.ir