

## آنتن آرایه فازی ضد جمینگ GPS بدون نیاز به کالیبراسیون با بکارگیری روش بهینه‌سازی جمعیتی

حسین یاراحمدی<sup>۱</sup>، سید حسن صدیقی<sup>۲</sup>

sedighy@iust.ac.ir

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ۲- استادیار دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در این مقاله یک آنتن آرایه فازی ضد جمینگ GPS برای هدایت صفر در پترن تشعشعی به صورت کور و بدون دانستن جهت جمر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جمعیتی ازدحام ذرات ارائه می‌شود. به این منظور، توان دریافتی از مجموع المان‌های آنتنی با وزن‌دهی مناسب کمینه می‌شود تا توان دریافتی از جمر یا جمرها به کمترین مقدار خود برسد. این ساختار در مقایسه با روش‌های به‌روز ضد جمینگ با چالش‌هایی از قبیل دانستن جهت جمر، حجم پردازش و هزینه بالا مواجه نیست. روش معرفی شده باعث رسیدن به کارایی مناسب با حجم پردازش سبک و هزینه اندک می‌گردد. ویژگی‌های خوب و کارآمدی این سامانه آنتنی برای مقابله با جمرهای GPS، قابلیت بکارگیری آن برای کاهش تهدیدات مرتبط در سامانه‌های ناوبری دریایی را تایید می‌کند.

واژگان کلیدی: آرایه، آنتن GPS، آنتی جمینگ، بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۱۰/۱۱  
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۹/۱۵

۱- مقدمه

سامانه ناوبری GPS به منظور ناوبری دریایی و زمینی توسط ایالات متحده با صرف هزینه‌های زیادی ایجاد شده است. از اولین بکارگیری گیرنده‌های نظامی GPS در سال ۱۹۹۱ میلادی تا کنون، روز به روز کاربرد این گیرنده‌ها در بخش‌های مختلف نظامی و صنعتی افزایش چشمگیری یافته است. امروزه، این گیرنده‌ها و قابلیت‌های آن‌ها در بخش‌های مختلف نظامی و غیرنظامی با زندگی ما عجین شده‌اند. چنانچه بسیاری از سامانه‌های نظامی بدون استفاده از این گیرنده‌ها عملکرد مناسبی نخواهند داشت.

علیرغم قابلیت بالای این گیرنده‌ها، می‌توان عملکرد سامانه ناوبری ماهواره‌ای GPS را با یک جمر ساده چند دلاری مختل کرد و در نتیجه عملکرد سامانه‌های نظامی مبتنی بر گیرنده‌های GPS را مختل نمود. بنابراین با توجه به عملکرد و دقت خوب این گیرنده‌ها، راهی جز ارائه راه‌حل مقابله با جمینگ با هزینه حداقلی وجود ندارد. در این راستا، پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده است [۱-۴].

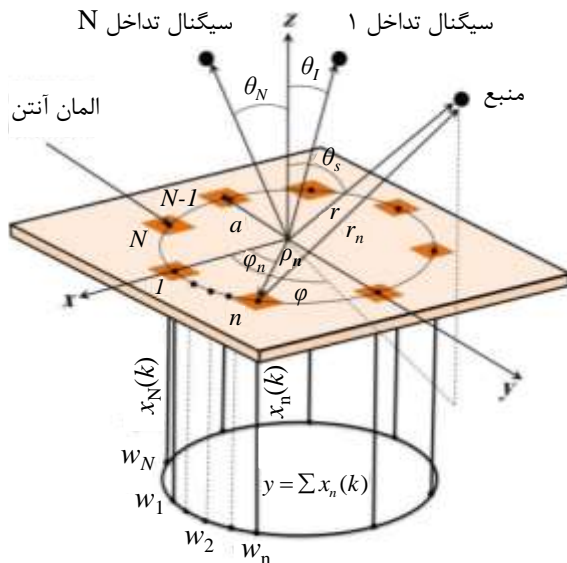
هدایت بیم و ایجاد صفر در الگوی تشعشع آنتن‌های GPS در کاربردهای گوناگون در سال‌های اخیر صورت گرفته است. عمده این تلاش‌ها بر بستر آنتن‌های آرایه‌ای بوده‌اند. از این قبیل می‌توان به کوشش‌های گوناگون درباره هدایت صفر در پترن تشعشعی آنتن‌های آرایه‌ای نام برد. به‌علاوه با گسترش روزافزون سامانه‌های مخابراتی و جنگ الکترونیک، سیستم‌ها و روش‌های گوناگونی برای مقابله با جمینگ پیشنهاد و مطرح شده‌اند که البته به ازای هرکدام از این سیستم‌ها هزینه‌ای پرداخت و پیچیدگی خاص آن سیستم تحمیل شده است. در برخی از این سیستم‌ها پردازش سنگین و در برخی هزینه‌ها و یا پیچیدگی سخت‌افزاری مورد مناقشه بوده است [۴-۸]. به‌علاوه قدرت مقابله با جمینگ در سیستم‌های مذکور از موارد مهم ارزیابی این سیستم‌ها به شمار می‌رود. به‌عنوان مثال برخی از این سیستم‌ها با دانستن جهت جمر توسط تخمین جهت ورود سیگنال<sup>۱</sup> و سپس محاسبه تحلیلی وزن‌های آنتن آرایه‌ای عمل مقابله با جمینگ را انجام می‌دهند که باعث افزایش پیچیدگی و هزینه در آن‌ها می‌گردد. در برخی دیگر از روش‌های نرم‌افزاری و کدینگ و انواع فیلترینگ فضایی و زمانی و فرکانسی برای این منظور استفاده می‌گردد که نیازمند سیستم پردازشی قدرتمند و

پرهزینه به‌علاوه کالیبراسیون پیچیده و هزینه‌های ساخت بالا است [۹-۱۸]. به عنوان نمونه در [۱۴] نوعی آنتن CRPA<sup>۲</sup> تطبیقی فضا-زمان معرفی شده است که با استفاده از آنتن آنتنی فشرده قابلیت ضد جمینگ مناسب می‌باشد. این آنتن از الگوریتم شکل‌دهی بیم در راستای مفهوم حداقل سازی توان دریافتی و کاهش آن تا سطح نویز بهره برده است. در بسیاری از مقالات به طراحی آنتن پرداخته و از الگوریتم پردازشی صحبتی به میان نیامده است. NAVSYS نمونه‌ای از یک نوع آنتن مینیاتوری بدون مشخصات پردازشی آرایه و مدارات الکترونیکی را ارائه کرده است که در مقایسه با آنتن‌های عادی مقاوم در برابر جمینگ، ابعاد بسیار کوچک‌تری دارد و کاربرد و عملکردی در حد همین آنتن‌ها (یا حتی بهتر) را دارد. این آنتن بانام Mini-Array شناخته شده است. عمق صفر که این آنتن ایجاد می‌کند مانند آنتن‌های CRPA با آنتن‌های زیاد است [۱۵]. همچنین [۱۶] یک آنتن هفت المانی را نشان می‌دهد که توسط شرکت SATIMO طراحی شده است و در برابر جمینگ به مقابله می‌پردازد. این آنتن در باندهای فرکانسی L1، L2، E6، E5a، E5b کار می‌کند و ایجاد صفر در جهت مورد نیاز را به عمل می‌آورد.

در این مقاله یک ساختار بهینه برای هدایت صفر در پترن تشعشعی آنتن آرایه‌ای GPS در راستای جمر ارائه گردیده است. در این روش با تغییر وزن سیگنال دریافتی در هر المان آنتنی و مقایسه توان دریافتی به بهینه‌ترین وزن در شرایطی دست پیدا می‌کنیم که توان دریافتی در حداقل مقدار ممکن قرار گرفته باشد. در روش پیشنهادی هیچ‌کدام از مشکلات مرتبط با کالیبراسیون و تخمین جهت ورود سیگنال وجود نداشته و بدون نیاز به این دو مسئله مقابله با جمینگ انجام می‌شود. در این طرح از روش فرا ابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای یافتن فازهای بهینه استفاده شده است. ساختار پیشنهادی به دلیل طرح ارائه شده در سطح سیستم در مقایسه با ساختارهای دیگر ارائه شده در دنیا دارای سخت افزار و نرم‌افزار ساده‌تری بوده که باعث سادگی و کاهش هزینه‌های ساخت آن نیز می‌گردد [۷-۱۱-۱۰]. ساختار آنتنی پیشنهادی در ناوبری سامانه‌های دریایی قابل استفاده است و باعث مقاوم‌سازی سیستم ناوبری در دریا در برابر تهدیدات جمرهای GPS می‌گردد.

<sup>2</sup> Control Radiation Pattern Antenna (CRPA)

<sup>1</sup> Direction of Arrival (DOA)



شکل (۱) چینش المان در آنتن آرایه‌ای و مدل سیگنال‌های ورودی به آرایه.

می‌توان نشان داد که:

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{r} - a\rho_n \hat{\mathbf{r}} \quad (۳)$$

که در آن:

$$\rho_n \hat{\mathbf{r}} = \sin \theta \cos \phi \cos \phi_n + \sin \theta \sin \phi \sin \phi_n \quad (۴)$$

$$= \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)$$

حال به راحتی می‌توان فاکتور آرایه را طبق [۱] به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{-j(ka\rho_n \hat{\mathbf{r}} + \delta_n)} \quad (۵)$$

$$= \sum_{n=1}^N w_n e^{-j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \delta_n]} \quad (۶)$$

که در آن:

$$\phi_n = \frac{2\pi}{N}(n-1) \quad (۷)$$

اگر یک سیگنال مطلوب  $s(k)$  و چند سیگنال نامطلوب  $i(k)$  در نظر گرفته شود، با توجه به شکل (۱) برای سیگنال دریافت شده هر المان داریم

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \bar{a}_0 s(k) + \begin{bmatrix} \bar{a}_1 & \bar{a}_2 & \bar{a}_3 & \dots & \bar{a}_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_1(k) \\ \bar{i}_2(k) \\ \vdots \\ \bar{i}_N(k) \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{n}}(k) \quad (۸)$$

$$= \bar{x}_s(k) + \bar{x}_i(k) + \bar{\mathbf{n}}(k)$$

در ادامه، الگوریتم طرح پیشنهادی ارائه و مدل‌سازی شده است. در فصل سوم، روش بهینه‌سازی PSO برای یافتن فاز بهینه هر المان آنتنی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی و تحلیل طرح پیشنهادی و عدم نیاز آن به کالیبراسیون به منظور تایید عملکرد آن در بخش چهارم ارائه شده است.

## ۲- مدل‌سازی و الگوریتم

برای عدم دریافت سیگنال ناشی از جمر و درعین حال دریافت سیگنال اصلی می‌بایست یک نقطه صفر در جهت قرارگیری جمر روی الگوی تشعشعی آنتن به نحوی ایجاد کرد که در مابقی فضا بهره مقدار حداکثری قابل قبولی داشته باشد.

ایده اولیه این کار، بکار بردن آرایه‌ای از آنتن‌ها به نحوی است که با وزن دهی مناسب به آن‌ها مجموع توان دریافتی از همه المان‌ها به حداقل رسیده و با یک قید در وزن دهی به سیگنال المان‌ها مانع از عدم دریافت هرگونه سیگنال مطلوب در جهت‌های غیر از جمر بشود. از آنجاکه جهت ورود سیگنال جمر در دو زوایه‌ی سمت و فراز نامشخص است، بایستی از یک الگوی توزیع صفحه‌ای برای المان‌های آنتنی استفاده نمود تا بتوان دو زوایه مدنظر را به صورت مستقل از هم استخراج نمود. با توجه به اینکه چینش دایروی المان‌ها در مقایسه با چینش صفحه‌ای عمق صفر بیشتری ایجاد می‌کند، توزیع دایروی برای ساختار پیشنهادی در نظر گرفته شده است [۱۹].

بدون از دست رفتن عمومیت مساله، یک آرایه دایروی با شش المان که در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته می‌شود. فاصله بین المان‌ها نیز نصف طول موج در نظر گرفته شده است تا تزویج متقابل بین المان‌ها کمینه باشد. برای این ساختار آرایه‌ای قبل از هر چیز بهتر است ضریب آرایه را برای چینش خطی المان‌ها محاسبه کنیم.

اگر شعاع دایره را  $a$  و تعداد المان‌ها را  $N$  در نظر بگیریم، آرایه  $n$ ام در زاویه  $\phi_0$  با شعاع  $a$  قرار گرفته است. به علاوه هر المان دارای یک وزن  $w_n$  و یک فاز  $\delta_n$  است. اگر نقطه مشاهده را با بردار  $\hat{\mathbf{r}}$  در نظر گرفته شود، می‌توان بردار یکه در جهت هر المان را به صورت زیر نوشت:

$$p_n = \cos \phi_n x + \sin \phi_n y \quad (۱)$$

همچنین می‌توانیم بردار یکه را در جهت پیکان تعریف کنیم:

$$\hat{\mathbf{r}} = \sin \theta \cos \phi x + \sin \theta \sin \phi y + \cos \theta z \quad (۲)$$

گردد. سپس جمعیت اولیه‌ای به‌عنوان حدس شروع بهینه‌سازی در نظر گرفته‌شده و پاسخ اولیه با جستجوی بهترین جواب به ازای این جمعیت شناسایی می‌گردد. گام بعد دنبال کردن فرایند تکرار به جهت بهبود جواب به‌دست‌آمده از طریق رابطه تعریف‌شده بین اعضا هست. این فرایند بدین گونه است که اعضا بهترین پاسخ خود و مکانی که بهترین پاسخ را در آن تجربه کرده‌اند ذخیره کرده و با دیگر اعضا به اشتراک می‌گذارند. این اشتراک باعث حرکت دیگر اعضا به سمت بهترین پاسخ‌ها و در نتیجه همگرایی خواهد شد.

مدل‌سازی ریاضی افراد در یک فضای چندبعدی و توسط مکان و سرعت (جهت‌دار) هر فرد انجام می‌شود. جابجایی افراد در یک فضای  $m$  بعدی (یعنی  $R^m$ ) و با دو دلیل منطقی انجام می‌پذیرد:

اول خطرهای که از بهترین پاسخ تجربه‌شده توسط خودشان دارند و دوم خطر بهترین پاسخ همگانی یا بهترین پاسخ همسایگی خود. بنابراین هر فرد اطلاعات زیر را برای تغییر مناسب مکان و سرعت خود در اختیار دارد:

- بهترین پاسخ همگانی شناخته‌شده که به‌سرعت در صورت پیدا شدن مکان جدید بهتر توسط هر یک از افراد به‌روز می‌شود.

- بهترین پاسخ به‌دست‌آمده توسط همسایگی هر فرد که زیرمجموعه‌ای از کل افراد است.

- بهترین پاسخ هر فرد که خودش تاکنون تجربه کرده است. رابطه تغییر مناسب مکان و سرعت افراد در PSO فرم ساده زیر را دارا هست:

$$v_{i,j} = C_0 v_{i,j} + C_1 r_1 (globalbest_j - x_{i,j}) + C_2 r_2 (localbest_{i,j} - x_{i,j}) \quad (14)$$

$$+ C_3 r_3 (neighborhoodbest_j - x_{i,j})$$

$$x_{i,j} = x_{i,j} + v_{i,j} \quad (15)$$

در مورد الگوریتم فوق برای رابطه بالا و توضیحات بعدی تعاریف زیر را داریم:

-  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌هایی هستند که نشان می‌دهند افراد چگونه به موقعیت مطلوب هدایت شوند. در واقع میزان تأثیر تجربیات شخصی (نقطه بهینه هر فرد) و تجربیات گروهی (نقطه بهینه عمومی) را بر حرکت فرد در فضای حالت مشخص می‌کند. معمولاً مقدار  $C_1$  و  $C_2$  برابر ۲ انتخاب می‌شود.

که  $\bar{a}_i$  بردار آرایه<sup>۱</sup> است و سیگنال  $x(k)$  به سه بخش مطلوب (s)، تداخل (i) و نویز  $n(k)$  تقسیم شده است. خروجی آرایه  $y$  نیز به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$y(k) = \bar{w}^H \cdot [\bar{x}_s(k) + \bar{u}(k)] \quad (9)$$

$$\bar{u}(k) = \bar{x}_i(k) + \bar{n}(k) = \text{undesired signal} \quad (10)$$

اگر توان هر سیگنال را به‌صورت امید ریاضی آن در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$P = E\{y(k) \cdot y(k)^H\} = \|w^H \cdot R_{xx} \cdot w\| \quad (11)$$

که در آن:

$$R_{xx} = R_{ss} + R_{ii} + R_{nn} = R_{ss} + R_{uu} =$$

$$[\bar{a}_0 \quad \bar{a}_1 \quad \dots \quad \bar{a}_N] \cdot [\bar{a}_0 \quad \bar{a}_1 \quad \dots \quad \bar{a}_N]^H + \sigma_u^2 I \quad (12)$$

$$\sigma_u^2 = w^H \cdot R_{uu} \cdot w \quad (13)$$

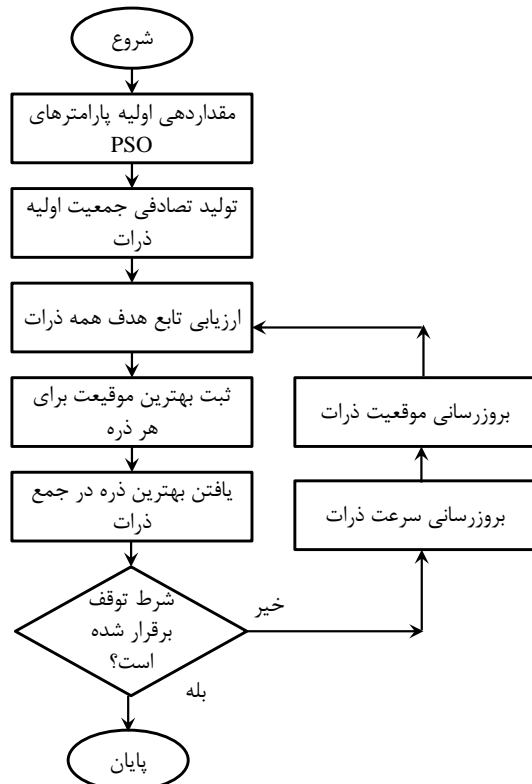
حال با توجه به مدل‌سازی بالا می‌توان تابع موردنظر را تابع توان با متغیر وزن به نحوی در نظر گرفت که وزن‌ها را تغییر داده تا رابطه توان ارائه‌شده در معادله (۱۱) کمینه گردد. در این قسمت از طراحی به الگوریتمی نیاز است که با وزن دهی مناسب فازها، توان دریافتی را کمینه کرده و البته قید حداکثر ماندن الگوی تشعشع نیز محفوظ باقی بماند. به این منظور می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی استفاده کرد که این موضوع در بخش بعد موردبحث و بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳- بهینه‌سازی

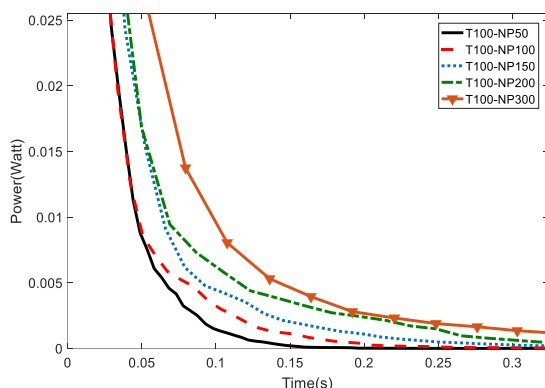
به‌منظور بهینه‌سازی مسائل مهندسی روش‌های متعددی ارائه‌شده است. برای این مهم ابتدا تابع هدف را توان خروجی ناشی از تابش توان در زاویه‌ای دلخواه به آنتن و محاسبه ضریب آرایه‌ای متناظر با المان‌های آنتن آرایه‌ای مورد شبیه‌سازی در نظر گرفته و وزن‌های بهینه را به دست آوردیم. سپس این وزن‌ها به آنتن اعمال‌شده و ضریب آرایه‌ای متناظر ترسیم شده است.

الگوریتم PSO در واقع بهینه‌سازی دسته‌جمعی را شبیه‌سازی می‌کند. در این بهینه‌سازی به جهت ارزیابی جواب‌های حاصل شده می‌بایست یک تابع تناسب در راستای مسئله مفروض در نظر گرفت. در گام بعد لازم است ساختار ارتباطی اعضا با یکدیگر تعریف و مدل‌سازی گردد تا جایگاه هر عضو و همسایگان آن به‌علاوه رابطه آن با دیگر همسایه‌ها مشخص

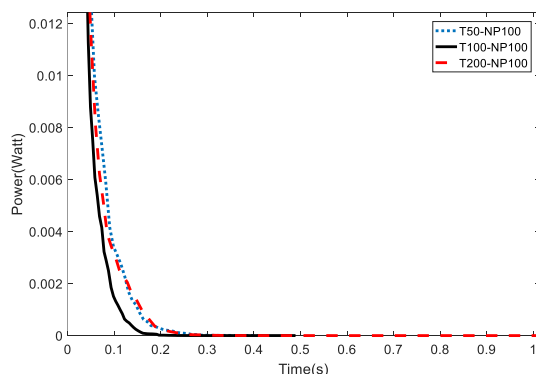
<sup>1</sup> Array Vector



شکل (۲) روندنمای الگوریتم PSO



شکل (۳) مقایسه تغییرات جمعیت (NP) با تکرار ثابت (T=۱۰۰) در سرعت و عمق همگرایی PSO.



شکل (۴) مقایسه تغییرات تکرار (T) با جمعیت ثابت (NP=۱۰۰) در سرعت و عمق همگرایی PSO.

-  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  دو بردار عدد تصادفی بین صفر و یک هستند که توزیع یکنواخت دارند.

- اپراتور ضرب نشان دهنده، ضرب ماتریسی که به صورت المان با المان انجام می شود، است.

هم‌زمان با جابجایی افراد در فضای  $m$  بعدی بهترین جواب همگانی مربوط به تابع شایستگی بهبود پیدا کرده و همه افراد جمعیت می‌توانند تحت تأثیر این جواب به سمت مکان‌هایی که منجر به آن شده است همگرا شوند. اگر ضرایب سرعت را کوچک در نظر بگیریم افراد در فضای پاسخ کند جابه‌جاشده و در نهایتاً در صورت وجود جواب صریح، به سرعت صفر برای نقطه بهینه خواهند رسید. تعیین ضرایب سرعت در رابطه (۱۴) بر روی سرعت همگرایی و توانایی افراد برای پیدا کردن جواب بهینه اثر می‌گذارد. در واقع با افزایش سرعت توانایی افراد جمعیت برای پیدا کردن جواب بهینه کاهش یافته و بالعکس. یکی از راه‌های این تغییر ضرایب سرعت، تغییر در تکرارهای مختلف و یا تغییر در صورت مشاهده همگرایی است. روندنمای PSO در شکل (۲) نشان داده شده است.

حال باید برای به‌کارگیری PSO اثر تغییر پارامترهای مهم تکرار و جمعیت را بر روی تابع هدف موردنظر که در اینجا توان خروجی آنتن آرایه‌ای هست، در نظر گرفت. بدین منظور همانند شکل (۳) با ثابت در نظر گرفتن تعداد تکرار (T) و افزایش تعداد جمعیت (NP) مشاهده می‌گردد که سرعت رسیدن به حد پایین جواب به ازای همان جمعیت کاهش پیدا کرده اما در ادامه عمق صفر عمیق‌تری را نتیجه می‌دهد. همچنین این افزایش جمعیت به دلیل تکرار در حلقه‌های محاسبات موجب افزایش حجم پردازش و زمان محاسبه نیز می‌گردد.

همچنین با ثابت نگه‌داشتن تعداد جمعیت و افزایش تکرار محاسبات مانند شکل (۴) خواهیم دید که عمق صفر عمیق‌تر به دست می‌آید. باید به این نکته توجه داشت که تغییر تعداد تکرار لزوماً باعث تغییر در سرعت همگرایی به حد پایین مطلوب نمی‌گردد و تغییرات سرعت همگرایی مشاهده شده در شکل (۴) به ماهیت فرا ابتکاری الگوریتم بازمی‌گردد.

#### ۴- شبیه‌سازی و تحلیل

بعد از پیاده‌سازی تابع متناسب با فاکتور آرایه آنتن موردنظر و همچنین کد PSO، به بررسی قدرت الگوریتم در ایجاد صفر در پترن تشعشی پرداخته شده است.

لذا با بکار بستن روش نوین موجود در این مقاله این هزینه‌ها و پیچیدگی‌ها از بین رفته و سیستم بدون نیاز به کالیبراسیون به خوبی کار خود را ادامه می‌دهد. برای اثبات این موضوع در شبیه سازی اعداد تصادفی بین ۰/۵ تا ۱ به دامنه سیگنال‌ها اعمال شده است. برای این منظور بجای ماتریس وزن  $w$  از ماتریس زیر بهره برده‌ایم که در آن  $w$  ها وزن‌های هر المان و  $rand$  ها اعداد مختلط تصادفی با دامنه بین ۱ تا ۰.۵ و فاز بین ۰ تا ۹۰ درجه می‌باشند.

$$w' = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6] \cdot \begin{bmatrix} rand\_1 \\ rand\_2 \\ rand\_3 \\ rand\_4 \\ rand\_5 \\ rand\_6 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} w_1 \cdot rand\_1 \\ w_2 \cdot rand\_2 \\ w_3 \cdot rand\_3 \\ w_4 \cdot rand\_4 \\ w_5 \cdot rand\_5 \\ w_6 \cdot rand\_6 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

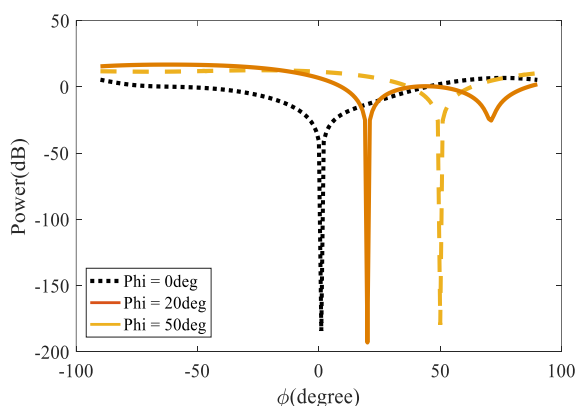
در واقع این تغییر را به گونه‌ای اعمال کردیم که عدد تصادفی پشت هر ضریب از المانهای ماتریس بردار آرایه قرار بگیرد. بدین نحو که:

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} a(\theta)_1 \\ a(\theta)_2 \\ a(\theta)_3 \\ a(\theta)_4 \\ a(\theta)_5 \\ a(\theta)_6 \\ a(\theta)_7 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} rand\_1 \\ rand\_2 \\ rand\_3 \\ rand\_4 \\ rand\_5 \\ rand\_6 \\ rand\_7 \end{bmatrix} \quad (17)$$

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد، برای زاویه سمت و فراز ۲۰ درجه وجود خطا در کالیبراسیون فاز و دامنه شبیه‌سازی گشته است که هر سه نتیجه بر روی هم قرار گرفته‌اند. بر اساس این نتایج به‌وضوح مشاهده می‌گردد که هیچ‌کدام از سه حالت خطای فاز و دامنه موجود در شکل (۷) اثر سوء بر روی عملکرد الگوریتم نداشته و الگوریتم در این مورد نیز قدرتمند و به‌خوبی عمل کرده است.

همان‌طور که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌گردد، عمق صفر مناسب به همراه سطح بهره مناسب آنتن در مابقی نقاط مدنظر به خوبی فراهم گردیده است، لذا نکته مهم تعیین قدرت الگوریتم در هدایت این صفر است. به این منظور در دو جهت سمت و فراز زاویه قرارگیری جمر تغییر داده شده است که نتایج آن در شکل مشاهده می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد الگوریتم در تغییرات سمت به خوبی عمل کرده و قدرت‌نمایی می‌کند. همچنین در شکل (۶) مشاهده می‌گردد که الگوریتم در زوایای فراز نیز مانند سمت به خوبی عمل کرده و توانایی هدایت صفر در پترن تشعشی کاملاً فراهم گردیده است.

به جهت افزایش توانایی کار در همه شرایط محیطی به ویژه محیط‌های سخت مانند دریا و پایداری در قدرت همگرایی الگوریتم باید شرایطی فراهم گردد که عدم کالیبراسیون و تغییرات شرایط محیطی مانند دما که خود عامل تغییرات کالیبراسیون می‌باشد، سیستم را تحت تأثیر قرار ندهد. با توجه به این نکته که در زنجیره‌های فرکانس بالا در گیرنده‌های مخابراتی قطعاتی مانند تقویت‌کننده‌ها و شیفتر دهنده‌های فاز وجود دارند، بدیهی است که دو مشکل عمده کالیبراسیون و تغییرات دمایی سیستم آنتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این دو اثر در صورت نادیده گرفته شدن موجبات تغییر در اندازه و فاز سیگنال‌های ورودی را فراهم کرده و وزن‌های محاسبه‌شده در پردازشگر را از درجه اعتبار ساقط می‌کنند. همچنین ساختن سیستم دارای کالیبراسیون دقیق و یا کالیبره کردن سیستمی مشابه آنتن آرایه‌ای مذکور هزینه‌ها و پیچیدگی‌های سنگینی را به دنبال دارد.



شکل (۵) نمودار ضریب آرایه‌ای برای زوایای سمت ۲۰ و ۵۰ درجه و زاویه فراز ۲۰ درجه.



Spectral Estimation". GPS Solutions, Vol.21, No.2, pp.475-485, 2017.

[۲] سید محمدرضا موسوی، محسن عابدی و محمد جواد رضایی، "ارائه روشی برای مقابله با جیمینگ در سامانه ناوبری دریایی JTIDS/Link-۱۶"، مجله دریا فنون، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر، سال اول، شماره اول، ص ۱-۱۰، ۱۳۹۲.

[۳] محمدجواد رضایی و سید محمدرضا موسوی، "ارائه یک روش ترکیبی برای مقابله با جیمینگ موج پیوسته در گیرنده های GPS"، مجله پدافند الکترونیکی و سایبری، دانشگاه امام حسین (ع)، سال چهارم، شماره اول، ص ۶۹-۷۸، بهار ۱۳۹۵.

[4] Mosavi, M. R., Pashaian, M., M. Rezaei, J. and Mohammadi, K., "Jamming Mitigation in GPS Receivers using Wavelet Packet Coefficients Thresholding", IET Signal Processing, Vol.9, No.5, pp.457-464, 2015.

[5] Ha, Sang-Gyu, Jeahoon Cho, and Kyung-Young Jung, "Design of Miniaturized Microstrip Patch Antennas using Non-Foster Circuits for Compact Controlled Reception Pattern Antenna Array", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.17, No.2, pp.108-110, 2017.

[6] Jun H., , Choo H., and Byun, G., "Design of a Small Controlled Reception Pattern Antenna Array With a Single-Layer Coupled Feed Structure for Enhanced Bore-Sight Gain and a Matching Bandwidth", Electromagnetics, Vol.37, No.5, pp.297-309, 2017.

[7] Kwon, T.S., Lee J.G., and Lee, J.H., "Null Steering of Circular Array Using Array Factor for GPS Anti-Jam", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.18, No.4, pp.267-269, 2018.

[8] McMichael, I. T., Lundberg, E. T., Hanna, D. L., & Kolak, F. S., "A Horizon Ring Nulling Shorted Annular Patch Antenna with Shunted Stubs", Progress In Electromagnetics Research, Vol.62, pp.131-141, 2017.

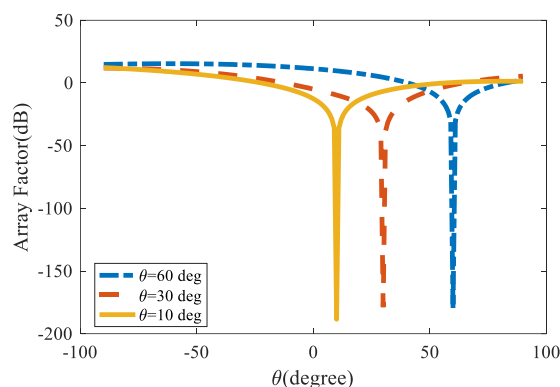
[9] Świerczyński, Sławomir, Piotr Zwolan, and Ilona Rutkowska, "Jamming as a Threat to Navigation", Annual of Navigation, Vol.23, No.1, pp.219-233, 2016.

[10] Di, R., Honglei Q., and Li, X., "Research of GPS Anti-Jamming based on Circular Antenna Array", Data Science Journal, Vol.6, pp.782-788, 2003.

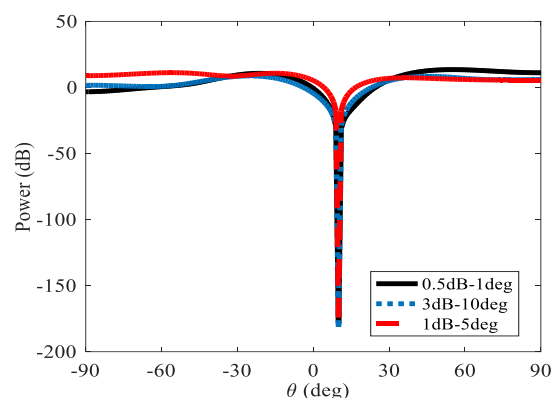
[11] Hou Z., Wang X., Chen G., "The Study of GPS Jamming and Anti-Jamming Technology", Modem Electronic Technology, Vol.23, pp.99-104, 2003.

[12] Hu, H., Yi, K., "The Study of GPS and GPS Jamming Technology", Science and Technology, Vol.8, pp.41-44, 2004.

[13] Casabona, Mario M., and Murray W. Rosen. "Discussion of GPS Anti-Jam Technology", GPS Solutions, Vol2, No.3, pp.18-23, 2009.



شکل (۶) نمودار ضریب آرایه‌ای برای زوایای مختلف فرآز ۵، ۳۰ و ۶۰ درجه و زاویه سمت ۲۰ درجه.



شکل (۷) سه حالت عمق صفر با وجود عدم کالیبراسیون در نظر گرفته شده است.

## ۵- جمع بندی

در این مقاله، یک آنتن آرایه فازی ضدجیمینگ GPS برای هدایت صفر در پترن تشعشی در راستای جمر طراحی و تحلیل گردید.

در این ساختار یک آرایه دایروی طراحی شده که با انتخاب فاز مناسب برای هر المان با استفاده از الگوریتم PSO امکان ایجاد صفر در پترن تشعشی در راستای تداخل را به دست می‌دهد. ویژگی اصلی طرح، پیشنهادی عدم نیاز آن به کالیبراسیون فاز و دامنه در هر المان می‌باشد. طرح پیشنهادی در مقایسه با طرح‌های دیگر ارائه شده در منابع دارای سادگی بیشتر، هزینه کمتر و عملکرد مناسب است.

## ۶- مراجع

[1] Moussa, M. M., Osman, A., Tamazin, M., Korenberg, M., Noureldin, A., & NavINST Research Group, "Enhanced GPS Narrowband Jamming Detection using High-Resolution

- [14] Alshrafi, W., Engel U., and Bertuch T., "Compact Controlled Reception Pattern Antenna for Interference Mitigation Tasks of Global Navigation Satellite System Receivers", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol.9, No.6, pp.593-601, 2014.
- [15] Brown, Alison, and Huan-Wan Tseng. "Miniaturized GPS Antenna Array and Test Results", Navsys Corp Colorado Springs Co, 2006.
- [16] Leveau, F., "Anti-Jam Protection by Antenna: Conception, Realization, Evaluation of a Seven-Element GNSS CRPA", *GPS World*, Vol.24, No.2, pp.30-33, 2013.
- [17] Kunysz, Waldemar. "Advanced Pinwheel Compact Controlled Reception Pattern Antenna (AP-CRPA) Designed for Interference and Multipath Mitigation", *Proceedings of the ION GPS*, 2001.
- [18] Defense GAJT-710ML™, Single-Enclosure GPS Anti-Jam Technology (GAJT®), NovaTel, 2016.
- [19] Ioannides, P. and Balanis, C.A. "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.4, pp.351-354. 2005.