بکارگیری الگوریتم ژنتیک در صفرگذاری وفقی در آنتن‌های آرایه‌ای

شاهرخ جم و محسن دل‌روشن

چکیده: مقاله حاضر یک روش صفرگذاری وفقی برای آنتن‌های آرایه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک را ارائه می‌دهد. در الگوریتم ژنتیک به کار گرفته‌شده، تعدادی از بیت‌های با کمترین ارزش در انتقال‌دهنده‌های فاز کنترل پرتو را برای حداقل‌کردن مجموع توان خروجی آرایه تنظیم می‌کند. معیارهای دیگری از قبیل میانگین مربع خطا و نسبت سیگنال به تداخل به علاوه نویز نیز به کار گرفته شده و با یکدیگر مقایسه شده است. استفاده از بیت‌های کم‌ارزش باعث ایجاد آشفتگی اندکی در پرتو اصلی الگوی تشعشعی می‌شود و صفرها را در جهت سیگنال‌های تداخلی قرار می‌دهد. روش جست و جوی دوگانه و جهش وزن‌دار برای کاهش پیچیدگی الگوریتم به کار رفته‌اند. همچنین کارآیی الگوریتم ژنتیک با MPDR که یک الگوریتم بهینه برای شکل‌دهی پرتو است مقایسه شده است. در نهایت نشان داده شده که الگوریتم ژنتیک نسبت به MPDR نتایج بهتری از خود ارائه می‌دهد.

کلید واژه: **آنتن آرایه‌ای، شکل‌دهی پرتو، صفرگذاری وفقی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.**

۱- مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های مخابراتی آنتن‌ها به طور افزاینده‌ای نیازمند کنترل پرتو، شکل الگوی تشعشعی و صفرگذاری برای مقابله با سیگنال‌های تداخلی، به صورت وفقی هستند. در محیط‌های شلوغ الکترومغناطیسی، روش‌های وفقی مزیت زیادی در کاهش تداخل‌ها، جداسازی سیگنال‌ها و افزایش ظرفیت سیستم دارند. شکل‌دهی پرتو به صورت وفقی، قادر است سیگنال‌های ارسال‌شده از زوایای مختلف در یک باند فرکانسی را جداسازی نماید. بدین صورت که جداسازی سیگنال‌ها را در حوزه فضا انجام می‌دهد. این امر، جداسازی سیگنال اصلی از سیگنال‌های تداخلی را آسان می‌سازد. در فرآیند شکل‌دهی پرتو، سیگنال‌های دریافتی توسط عنصرهای مختلف آنتن به صورت مناسبی با هم ترکیب می‌شود و یک خروجی را به وجود می‌آورند. مشخصات آنتن آرایه‌ای از قبیل وزن‌های مختلط عناصر، در زمان تغییر می‌کند تا کارآیی سیستم را برای حصول به معیارهای مختلف، بهینه کند. این معیارهای بهینه‌سازی، شامل حداقل‌کردن میانگین مربع خطا (MSE)[1] بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی آرایه، حداقل‌کردن توان خروجی آرایه، حداکثرکردن نسبت سیگنال به نویز (SNR)[2]، حداقل‌کردن اثر تداخل و ... می‌باشد. معیار بهینه‌سازی و الگوریتم کنترلی آن، بسته به فاکتورهایی از قبیل سرعت همگرایی، پیچیدگی سخت‌افزاری مورد نیاز برای اجرای الگوریتم و همچنین کارآیی کل سیستم، در مجموع به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بهترین کیفیت خدمات را برای کاربران سیستم فراهم سازد.

چنانچه در آنتن‌ها، تنها سطح گلبرگ‌های جانبی راکاهش دهیم، دریافت کافی از سیگنال مطلوب در حضور سیگنال‌های تداخلی تضمین نمی‌شود. صفرگذاری وفقی[3]، ترفندی است که آنتن‌های با گلبرگ‌های جانبی با سطح پایین را با قراردادن صفر در الگوی آنتن برای پس‌زدن و حذف قوی‌ترین منابع تداخل کامل می‌کند. از طرفی یک الگوریتم وفقی ایده‌آل برای یک آنتن آرایه‌ای فازی، مشخصات مطلوب زیر را دارد:

قراردادن صفرهای عمیق در جهت تداخل، پس‌زدن و حذف تداخل در پهنای باند آنتن، عملکرد بسیار سریع در قراردادن صفرها، سازگاری و کامل‌کردن فناوری آرایه فازی موجود در سیستم و حداقل‌کردن آشفتگی در الگوی پرتو.

البته الگوریتم‌های وفقی در عمل تمام خصوصیات فوق را نداشته اما می‌بایستی بهترین حالت ممکن و نزدیک به موارد ایده‌آل در نظر گرفته شود.

اغلب دستاوردها در زمینه صفرگذاری با استفاده از آنتن‌های وفقی در چهار دسته گنجانده می‌شود. اولین دسته نیاز به یک گیرنده در هر عنصر آرایه دارد.

در دسته دوم روش‌های صفرگذاری، محل تداخل‌ها را دانسته فرض می‌شود و مشخصات تضعیف‌کننده‌ها و انتقال‌دهنده‌های فاز دقیقاً قابل پیش‌بینی است.

سومین دسته از روش‌های صفرگذاری وفقی، به طور تصادفی از تنظیمات دامنه و فاز ممکن آنتن آرایه‌ای تخمین می‌زند. این روش جستجوی تصادفی برای صفرگذاری وفقی، زمان‌بر است و معمولاً برای سیستم‌های زمان واقعی غیر عملی است.

دسته چهارم، یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی را برای مینیمم‌کردن مجموع توان خروجی آرایه اعمال می‌کند. این الگوریتم نوعاً یک بردار گرادیان با استفاده از آشفتگی تنظیمات فاز و یا دامنه عنصرها برای مشخص‌کردن وزن‌هایی که مجموع توان خروجی را حداقل کند تشکیل می‌دهد. این روش‌ها کند هستند و اغلب در مینیمم محلی گیر می‌کنند.

آنتن‌های آرایه‌ای عموماً برای کنترل پرتو اصلی، فقط دارای انتقال‌دهنده فاز[4] می‌باشند. از طرفی کنترل با استفاده از تغییر دامنه نیز از نظر تئوری کارا به نظر می‌رسد، چون آزادی عمل بیشتری در شدت میدان دریافتی ایجاد می‌کند و این امر، عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد. ولی کنترل با استفاده از دامنه بسیار گران‌قیمت است و به ندرت در

این مقاله در تاریخ ۵ دی ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۳۰ خرداد ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

شاهرخ جم، دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، بلوار مدرس، شیراز، صندوق پستی ۳۱۳-۷۱۵۵۵، ایران (email: jam@sutech.ac.ir).

محسن دل‌روشن، بخش برق و الکترونیک دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، بلوار زند، شیراز، ایران (email: delroshan@gmail.com).

1. Mean Square Error
2. Signal to Noise Ratio
3. Adaptive Nulling
4. Phase Shifter

Archive of SID

www.SID.ir

سیستم‌های کاربردی استفاده می‌شود. برای ارزانترکردن سیستم‌های وفقی، اغلب آرایه‌ها فقط با تنظیم فاز عنصرها با استفاده از انتقال‌دهنده‌های فاز دیجیتال کنترل می‌شوند. این خصوصیت، مسأله بهینه‌سازی را غیر خطی و گسسته می‌کند و بنابراین باید روش‌های کنترل غیر کلاسیک نو و بدیع به کار گرفته شود. این مقاله گزارشی از کاربرد الگوریتم ژنتیک برای کنترل انتقال دهنده های فاز دیجیتال با هدف مینیمم کردن توان خروجی آرایه استفاده شده است را ارائه می‌دهد. تاکنون الگوریتم‌های ژنتیک بسیاری برای بهینه‌سازی آرایه‌های آنتن استفاده شده‌اند [۱] تا [۳]. اساساً، الگوریتم‌های ژنتیک برای انجام چنین مسایلی به دلایل زیر مورد توجه قرار می‌گیرد:

توانایی بهینه‌سازی توابع چندوجهی[1] غیر خطی با متغیرهای زیاد دارند، به اطلاعات مشتق نیاز ندارند و به صورت قدرتمندی نقاط بهینه کلی[2] یا بهینه محلی بسیار قوی را پیدا می‌کنند [۴]. به علاوه با وجود شهرت آنها به کندی، نتایج عملی نشان می‌دهد که جواب‌های قابل قبول برای حل مسایل مشکل بهینه‌سازی آنتن‌های آرایه‌ای می‌تواند به سرعت پیدا شود.

با اینکه بعضی از تحقیقات نشان داده‌اند که از الگوریتم ژنتیک می‌توان برای قراردادن صفر در الگوی تشعشعی آنتن در یک جهت خاص استفاده کرد [۱] و [۲]؛ ولی این روش‌ها در حضور سیگنال‌های تداخلی ناشناخته نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. فقط تعداد مقالات اندکی [۳] و [۴] نشان داده‌اند که در حضور سیگنال‌های تداخلی ناشناخته می‌توان از الگوریتم ژنتیک استفاده کرد.

در این مقاله از تلفیق روش‌های مورد استفاده و به کارگیری عملگرهای پیشرفته، الگوریتمی ارائه شده که مقداری بهبود در کارآیی از خود نشان می‌دهد. سپس، مزایا و معایب الگوریتم ارائه‌شده بررسی گردیده و در نهایت این الگوریتم با یکی دیگر از الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو (MPDR)[3] پاسخ بدون اعوجاج توان حداقل، مقایسه می‌گردد.

۲- بیان مسأله

ابتدا مفروضات یک مسأله نمونه برای روشن‌کردن روند کار، ارائه و بیان می‌گردد و در ادامه فرمول‌بندی فرآیند آورده می‌شود:

نوع آنتن، آرایه خطی با فاصله نصف طول موج فرکانس مرکزی سیگنال ورودی برای عناصر که تعداد آنها در آرایه ۱۰۰ عدد است، در نظر می‌گیریم. تحریک آرایه از نوع تحریک یکنواخت و توزیع چپی‌شف مورد کنکاش قرار گرفته است. تعداد بیت‌های انتقال‌دهنده فاز ۸ و ۱۶ بیت بوده اما تعداد بیت‌های صفرگذاری متغیر در نظر گرفته‌شده و به ازای مقادیر مختلف کارآیی آن بررسی می‌شود. سیگنال مطلوب باند باریک و جهت آن دانسته فرض شده است. نویز را نویز سفید و گوسی در نظر گرفته می‌شود. همچنین سیگنال مطلوب، سیگنال‌های تداخلی و نویز ناهمبسته[4] فرض شده‌اند.

در شروع از سیگنال مطلوب و سیگنال‌های تداخلی هر کدام ۵۰ نمونه تصادفی تولید می‌شود. نمونه‌های تصادفی به صورت $\sqrt{s/2}(\alpha+j\beta)$ تولید می‌گردد به طوری که α و β متغیرهای تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس یک هستند و s مقدار سیگنال به نویز یا تداخل به نویز می‌باشد. سپس هر سیگنال در بردار پاسخ آرایه ضرب می‌شود و بعد از آن به سیگنال‌ها، نویز عناصر نیز افزوده می‌گردد. نمونه‌های $\boldsymbol{x}(t_k)$ طبق (۱) به دست می‌آید

$$\boldsymbol{x}(t_k)=\sum_{m=0}^{M-1}\boldsymbol{a}(\theta_m)s_m(t_k)+\boldsymbol{n}(t_k)\quad,\quad k=1,2,...,K \qquad (۱)$$

که در آن $s_m(t_k)$ نمونه‌های سیگنال و تداخل و $\boldsymbol{a}(\theta_m)$ بردار پاسخ آرایه و M تعداد منابع سیگنال و تداخل می‌باشد. سپس نمونه‌های حاصل در بردار وزن عناصر ضرب شده و وارد جمع‌کننده می‌شود. در جمع‌کننده مطابق (۲) یک سیگنال که حاصل جمع سیگنال مطلوب و سیگنال‌های تداخلی و نویز است، به دست می‌آید (در خروجی ۵۰ نمونه از این سیگنال وجود دارد؛ $K=50$)

$$y(t_k)=\boldsymbol{w}^H\boldsymbol{x}(t_k)\quad,\quad k=1,2,...,K \qquad (۲)$$

به طوری که $\boldsymbol{w}$ بردار وزن‌های آرایه است. برای محاسبه توان خروجی از (۳) می‌توان استفاده کرد

$$P=E\{\boldsymbol{y}.\boldsymbol{y}^H\} \qquad (۳)$$

ولی چون فقط نمونه‌هایی از سیگنال خروجی در دسترس است تنها می‌توان تخمینی از توان خروجی را به دست آورد. البته هرچه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد این تخمین به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. تعداد نمونه‌های در نظر گرفته‌شده در این شبیه‌سازی ۵۰ نمونه می‌باشد که نمودار مربوط به آن در بخش مقایسه با الگوریتم MPDR خواهد آمد. تخمین توان خروجی از (۴) محاسبه می‌شود

$$\hat{P}=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}y(t_k)y(t_k)^*\quad,\quad k=1,2,...,K \qquad (۴)$$

به طوری که K تعداد نمونه‌های سیگنال می‌باشد. با استفاده از نمونه‌ها تخمین توان سیگنال خروجی محاسبه می‌شود و توسط الگوریتم ژنتیک وزن‌هایی به دست می‌آید که با اِعمال آنها به آرایه میزان توان خروجی حداقل می‌گردد. چون الگوریتم را به گونه‌ای در نظر گرفته‌ایم که کمترین آشفتگی در پرتو اصلی آرایه ایجاد می‌شود، کمترین توان خروجی به معنی بیشترین دریافت از سیگنال مطلوب و کمترین دریافت از سیگنال‌های تداخلی است و این بدان معنا خواهد بود که صفرهای الگوی تشعشی آرایه در مقابل منابع تداخل قرار گرفته‌اند و اثر آنها را به حداقل رسانده‌اند.

۳- معرفی الگوریتم

در این قسمت به توصیف و تشریح الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده می‌پردازیم. همانگونه که قبلاً اشاره شد این الگوریتم به گونه‌ای طراحی شده است که وزن‌هایی را برای عنصرها به دست می‌آورد که به واسطه آنها توان خروجی به حداقل مقدار ممکن برسد [۳] و [۵]. تعداد بیت‌های انتقال‌دهنده فاز، B بیت در نظر گرفته شده است. ابتدا وزن‌های ساکن به گونه‌ای به آرایه اعمال می‌شود که پرتو اصلی را در جهت سیگنال مطلوب هدایت کند. این وزن‌های ساکن به وسیله B بیت انتقال‌دهنده فاز اِعمال می‌شود. البته تبدیل فاز هدایت از حالت پیوسته به گسسته مقداری خطای کوانتیزاسیون ایجاد می‌کند که غیر قابل اجتناب است و در تمام آرایه‌هایی که از انتقال‌دهنده‌های فاز دیجیتال استفاده می‌کنند وجود دارد. پس از آنکه وزن‌های ساکن به آرایه اعمال شد و پرتو اصلی آرایه در جهت سیگنال مطلوب قرار گرفت، P بیت از بیت‌های کم‌ارزش انتقال‌دهنده‌های فاز برای عمل صفرگذاری در نظر گرفته شده و وارد الگوریتم می‌شود. با مشخص‌شدن این بیت‌های کم‌ارزش توسط الگوریتم و اِعمال اختلاف فاز ناشی از آنها به فازهای ساکن پرتو اصلی دچار مقدار

1. Multi Modal
2. Global
3. Minimum Power Distortionless Response
4. Uncorrelated

Archive of SID

www.SID.ir

اندکی آشفتگی می‌شود و همچنین در الگوی آرایه صفرهایی در جهت سیگنال‌های تداخلی شکل می‌گیرد. بنابراین در الگوریتم فقط از P بیت کم‌ارزش انتقال‌دهنده‌های فاز استفاده می‌شود و سایر بیت‌های پرارزش انتقال‌دهنده‌های فاز فقط یک بار قبل از اِعمال الگوریتم ژنتیک مقداردهی می‌شوند و تا پایان الگوریتم ثابت می‌مانند.

الگوریتم با تولید یک جمعیت تصادفی آغاز می‌شود. این جمعیت دارای M کروموزوم است که هر کروموزوم شامل L ژن می‌باشد (L همان تعداد عناصر در آرایه است) و هر ژن از P بیت تشکیل شده است. بنابراین جمعیت مورد نظر یک ماتریس $M\times(L\times P)$ عنصری است که عناصر آن ۰ و ۱ است. سپس الگوریتم به ازای هر کروموزوم میزان توان خروجی را به عنوان تابع شایستگی معین می‌کند. بدین ترتیب که مقادیر ژن‌های کروموزوم‌ها را به انتقال‌دهنده‌های فاز اعمال می‌کند و به ازای این فازهای جدید توان خروجی را به دست می‌آورد. این عمل برای تمام اعضای جمعیت (کروموزوم‌ها) انجام می‌شود و در نهایت یک بردار $M\times۱$ از توان‌های خروجی به دست می‌آید. سپس الگوریتم، کروموزوم‌ها را بر حسب توان خروجی مرتب می‌کند. یعنی از کروموزوم‌های با توان خروجی کمتر به کروموزوم‌های با توان خروجی بیشتر. سپس با توجه به نوع تابع انتخاب، تعدادی از کروموزوم‌ها را به عنوان والدین برای تولید نسل جدید (جمعیت جدید) انتخاب می‌کند. پس از آن بر روی کروموزوم‌های انتخاب‌شده به عنوان والدین عملگرهای تقاطع و جهش را اعمال می‌کند و کروموزوم‌های جدیدی به عنوان فرزندان تولید می‌کند که در جمعیت جدید جای می‌گیرند. البته تعدادی از بهترین کروموزوم‌ها بدون تغییر از نسل قبل به نسل جدید منتقل می‌شوند که این کار در بالابردن کارآیی الگوریتم و همگرایی سریع‌تر آن مؤثر خواهد بود. حال دوباره الگوریتم با نسل جدید مانند نسل قبل رفتار می‌کند؛ بدین ترتیب که توان‌های خروجی را به ازای اِعمال کروموزوم‌ها محاسبه کرده و آنها را مرتب می‌کند و عملیات انتخاب والدین و تقاطع و جهش و تولید نسل جدید را انجام می‌دهد. این روند توسط الگوریتم تکرار می‌شود تا شرطی که برای توقف الگوریتم در نظر گرفته شده است برآورده شود. این جواب، کروموزومی است که با اِعمال اختلاف فازهای متناظر با ژن‌های آن به انتقال‌دهنده‌های فاز، کمترین توان در خروجی به دست آید. این فاز تا زمانی که تغییری در محیط ایجاد نشود به آرایه اعمال می‌شود. در صورت تغییر در محیط و عوض‌شدن جهت تداخل‌ها، الگوریتم مجدداً فعال می‌شود و وزن‌های جدید برای وفق‌دادن آرایه با محیط را به دست می‌آورد. در قسمت‌های بعد، مشخصات الگوریتم اعمال‌شده و انواع توابع انتخاب، تقاطع و جهش به کار برده‌شده در الگوریتم شرح داده خواهد شد و نتایج حاصل از آنها بررسی می‌گردد.

۳-۱ درجه‌بندی شایستگی[1]

درجه‌بندی شایستگی فرآیند نگاشت مقادیر اولیه تابع شایستگی به محدوده مناسبی از اعداد برای هر کروموزوم است. تابع درجه‌بندی شایستگی باعث می‌شود که مقادیر شایستگی از یک محدوده دلخواه به یک محدوده مناسب نگاشت شوند. تجربه نشان داده است که اگر مناسب‌ترین افراد به اندازه دو برابر میانگینی که غالباً اعضا تولید می‌شوند برای تولیدمثل انتخاب شوند الگوریتم ژنتیک بیشترین سرعت ممکن را خواهد داشت [۳].

توابع درجه‌بندی شایستگی مختلفی وجود دارد که انتخاب هر کدام از آنها به صورت تجربی و با توجه به مسأله مورد نظر صورت می‌گیرد. از جمله این توابع می‌توان درجه‌بندی شایستگی بر اساس رتبه، درجه‌بندی شایستگی متناسب و درجه‌بندی شایستگی قله را نام برد. در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم.

۳-۱-۱ درجه‌بندی شایستگی بر اساس رتبه[2]

این تابع مقادیر خام شایستگی را از کوچک به بزرگ مرتب می‌کند و به هر کدام از آنها عدد n را نسبت می‌دهد که n شماره هر مقدار در ترتیب جدید می‌باشد. مقادیر احتمال اعضا از (۵) محاسبه می‌شوند

$$\rho=\frac{f_i}{\sum_{i=۱}^{M} f_i} \qquad (۵)$$

که در آن $f_i=۱/\sqrt{n}$ و M تعداد اعضای جمعیت است.

۳-۱-۲ درجه‌بندی شایستگی متناسب[3]

این درجه‌بندی، ساده‌ترین شیوه درجه‌بندی شایستگی است که مقادیر جدید شایستگی، متناسب با مقادیر خام شایستگی هستند. این شیوه در هنگامی که مقادیر خام شایستگی در محدوده مناسبی نباشد دارای ضعف است. اگر بخواهیم به وسیله الگوریتم مقدار مینیمم را بیابیم باید اعضای با شایستگی کمتر احتمال بیشتری برای انتخاب داشته باشند. بنابراین

$$F_n=۲m-f_n \quad , \quad n=۱,\ldots,M \qquad (۶)$$

که در آن F_n مقادیر جدید شایستگی و f_n مقادیر قبلی شایستگی است و m میانگین کل مقادیر شایستگی می‌باشد. در این درجه‌بندی مقدار احتمال هر عضو یعنی ρ_n از (۷) به دست می‌آید [۳]

$$\rho_n=\frac{F_n}{\sum_{n=۱}^{M} F_n} \qquad (۷)$$

۳-۱-۳ درجه‌بندی شایستگی قله[4]

این شیوه به n عضو دارای بهترین شایستگی، شانس مساوی برای تولیدمثل اختصاص می‌دهد و به بقیه اعضا احتمال صفر. مقادیر احتمال به صورت زیر است

$$[۰,۱/n,۱/n,۰,۰,۱/n,۰,۰,۱/n,\cdots] \qquad (۸)$$

اگر n برابر یک باشد، این تابع به تابع بهترین درجه‌بندی شایستگی[5] معروف است.

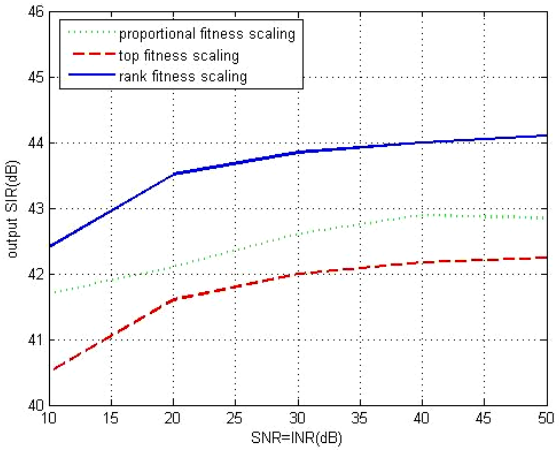
شکل ۱ مقایسه بین روش‌های درجه‌بندی شایستگی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این مسأله درجه‌بندی شایستگی بر اساس رتبه بیشترین کارآیی را ارائه می‌دهد (در این مسأله تابع شایستگی توان خروجی است (۴)).

۳-۲ تقاطع[6]

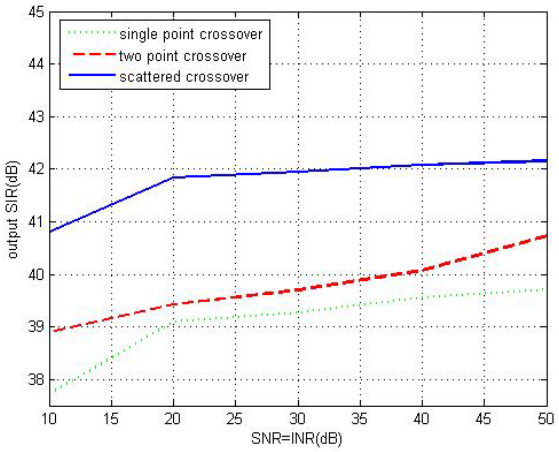
اصلی‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک تقاطع است. این عملگر باعث تزویج دو کروموزوم والد و تولید فرزند در نسل جدید می‌شود. این دو

1. Fitness Scaling
2. Rank Based Fitness Scaling
3. Proportional Fitness Scaling
4. Top Fitness Scaling
5. Best Fitness Scaling
6. Crossover

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: مقایسه بین روش‌های درجه‌بندی شایستگی (محور افقی نسبت سیگنال به نویز ورودی و محور عمودی نسبت سیگنال به نویز خروجی؛ تعداد بیت‌های صفرگذاری ۳ بیت؛ تداخل در ۲۰/۵ درجه؛ تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱).



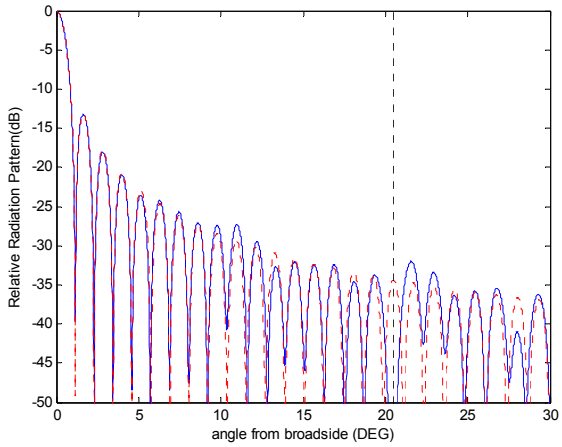
شکل ۲: مقایسه روش‌های مختلف تقاطع.

کروموزوم والد به وسیله عملگر انتخاب برگزیده می‌شوند و سپس عملیات تقاطع بر روی آنها انجام می‌شود. تکنیک‌های مختلفی برای این عملگر وجود دارد. از جمله تقاطع تک‌نقطه‌ای، تقاطع دونقطه‌ای، و تقاطع پراکنده[1]. در تقاطع تک‌نقطه‌ای و دونقطه‌ای ژن‌هایی که در نزدیکی هم قرار دارند معمولاً در کنار هم باقی می‌مانند و ژن‌هایی که از هم فاصله دارند معمولاً از هم جدا می‌شوند. ولی در تکنیک پراکنده این اثر از بین می‌رود و تمام ژن‌ها دارای شانس مساوی هستند که از یک والد انتخاب شوند یا از والد دیگر [۳]. در شکل ۲ روش‌های تقاطع با یکدیگر مقایسه شده و مشاهده می‌گردد که تکنیک پراکنده بیشترین کارآیی را از خود نشان می‌دهد. (مقدار SNR و INR همان پارامتر S است که در شبیه‌سازی سیگنال‌ها از آن استفاده شده است. برای محاسبه SIR خروجی، (۴) یک بار برای سیگنال مطلوب و بار دیگر برای سیگنال‌های تداخلی محاسبه می‌شود و این دو مقدار بر هم تقسیم می‌شود.)

۳-۳ جهش[2]

جهش ژنتیکی عملگری است که با ایجاد تغییری در کروموزوم‌ها باعث می‌شود که الگوریتم در حالی که به سمت یک جواب همگرا می‌شود فضاهای دیگری را نیز جست و جو کند. الگوریتم این کار را با

1. Scattered Crossover
2. Mutation



شکل ۳: الگوی تشعشعی الگوریتم وفقی نسبت به الگوی ساکن؛ (تعداد بیت‌های صفرگذاری ۳ بیت؛ تداخل در ۲۰/۵ درجه؛ تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱؛ عمق صفر dB ۷۴-).

معکوس‌کردن تعدادی از بیت‌های کروموزوم انجام می‌دهد. کروموزوم حاصل، عضوی کاملاً تصادفی است و تابعی از کروموزوم قبل نمی‌باشد. در این تحقیق دو عملگر جهش به کار برده شده است: جهش یکنواخت و جهش وزن‌دار. هر دو این عملگرها برای محیط‌های باینری به کار برده می‌شود.

۳-۳-۱ جهش یکنواخت[3]

در این حالت یک احتمال $p_{mutation}$ انتخاب می‌گردد که معمولاً این مقدار، برابر ۰/۰۱ است [۳]. بیت‌های کروموزوم انتخاب‌شده را با احتمال $p_{mutation}$ معکوس می‌کند. این تابع بر خلاف جهش ساده، یک جهش چندنقطه‌ای ایجاد می‌کند.

۳-۳-۲ جهش وزن‌دار[4]

در این حالت احتمال $p_{mutation}$ برای بیت‌های مختلف متفاوت است و بستگی به ارزش بیت‌های مورد نظر در وزن آرایه دارد. بیت‌های کم‌ارزش‌تر در هر ژن، احتمال بیشتری را برای جهش به خود اختصاص می‌دهند و برای بیت‌های با ارزش بالاتر این احتمال کاهش می‌یابد. این تغییر احتمال در جهش باعث بهبود در اثرگذاری جهش می‌شود و جست و جو را در اطراف کروموزومی که جهش روی آن صورت گرفته محدود می‌کند. هدف از این تکنیک جلوگیری از واگراشدن جست و جو از فضایی است که احتمال می‌رود جواب بهینه در آن است. بنابراین معمولاً استفاده از این تکنیک فقط در هنگامی است که الگوریتم ژنتیک توانسته است به فضایی برسد که جواب بهینه در آن قرار دارد. بنابراین با انجام جهش، کروموزوم‌ها از محدوده جواب زیاد دور نمی‌شوند و همگرایی زودتر انجام می‌شود [۳].

۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

در این قسمت مواردی که کارآیی الگوریتم را با آن بتوان بررسی نمود، آورده شده است.

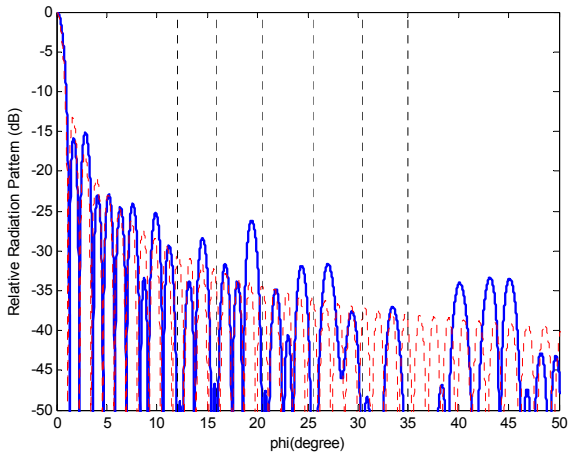
۴-۱ شکل الگوی تشعشعی آرایه

در این قسمت الگوی تشعشعی وفقی توسط الگوریتم ژنتیک در چند حالت مختلف با الگوی ساکن آرایه مقایسه شده است. در شکل ۳، یک

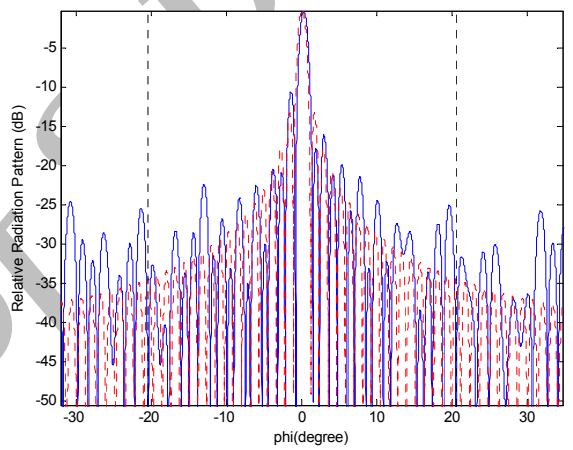
3. Uniform Mutation
4. Weighted Mutation

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴: الگوی تشعشعی الگوریتم وفقی برای شش سیگنال تداخلی (تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱؛ عمق صفرها ۴۹-، ۵۷-، ۵۳-، ۶۷-، ۵۴- و ۶۸- دسی‌بل).



شکل ۵: الگوی تشعشعی الگوریتم وفقی برای سیگنال‌های تداخلی قرینه (تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱؛ عمق صفرها ۵۷- و ۵۴- دسی‌بل).

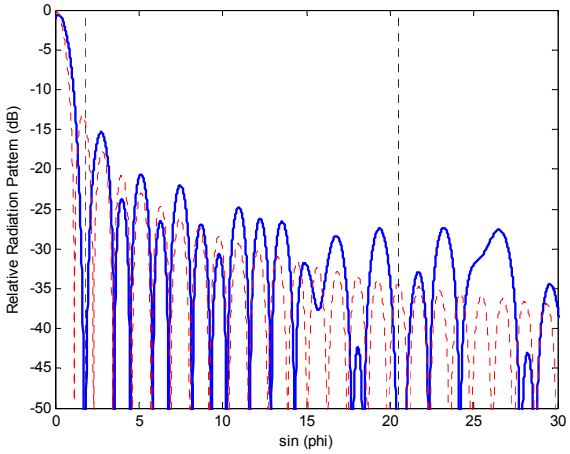
سیگنال تداخلی در ۲۰/۵ درجه وجود دارد که در الگوی ساکن بر روی گلبرگ جانبی قرار گرفته ولی مشاهده می‌شود که در الگوی وفقی صفر شده است.

در شکل ۴ الگوی تشعشعی برای شش سیگنال تداخلی که در زوایای مختلف به آرایه تابیده شده نشان داده شده است. در این دو حالت از سه بیت صفرگذاری استفاده شده است. در شکل ۵ دو سیگنال تداخلی که نسبت به گلبرگ اصلی قرینه می‌باشند به آرایه تابیده‌اند. در این حالت از ۵ بیت صفرگذاری استفاده شده است چون اگر از بیت‌های صفرگذاری کمی استفاده شود، انتقال فاز مقدار کمی خواهد بود و نمی‌توان در الگوی تشعشعی صفرهای قرینه ایجاد کرد [۶].

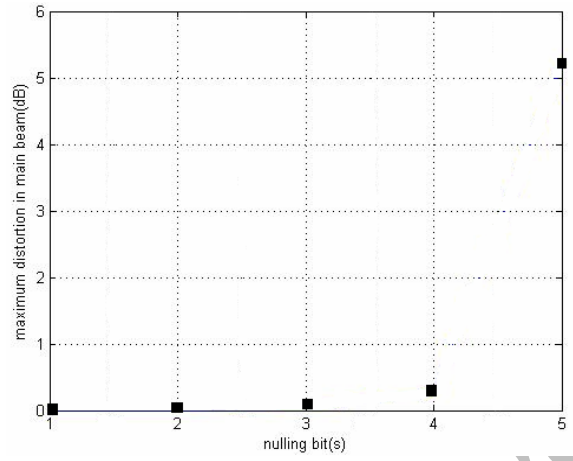
در شکل ۶ تداخلی در ۱/۸ درجه قرار گرفته که بسیار نزدیک به گلبرگ اصلی است. در این حالت نیز برای صفرگذاری از ۵ بیت استفاده شده است. بنابراین اگر سیگنال تداخلی بر روی گلبرگ‌های جانبی با سطح بالاتر قرار گیرد نیاز به بیت‌های بیشتری برای صفرگذاری دارد.

۴-۲ آشفتگی پرتو اصلی به ازای تعداد بیت‌های صفرگذاری

در یک آرایه با انتقال‌دهنده‌های فاز ۸ بیتی، بیت‌های صفرگذاری در الگوریتم ژنتیک را از یک بیت تا ۵ بیت تغییر دادیم. همان‌طور که در



شکل ۶: الگوی تشعشعی الگوریتم وفقی به ازای تداخل نزدیک به گلبرگ اصلی (تعداد بیت‌های صفرگذاری ۳ بیت؛ تداخل در ۲۰/۵ درجه؛ تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱؛ عمق صفرها ۵۴- و ۷۰- دسی‌بل).



شکل ۷: آشفتگی پرتو اصلی به ازای تعداد بیت‌های صفرگذاری.

شکل ۷ مشاهده می‌شود برای یک تداخل در ۲۰/۵ درجه، تا ۴ بیت صفرگذاری میزان آشفتگی در گلبرگ اصلی ایجاد می‌شود که دیگر قابل قبول نخواهد بود. میزان آشفتگی عبارت است از مقدار اختلاف بین الگوی ساکن و الگوی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک در صفر درجه.

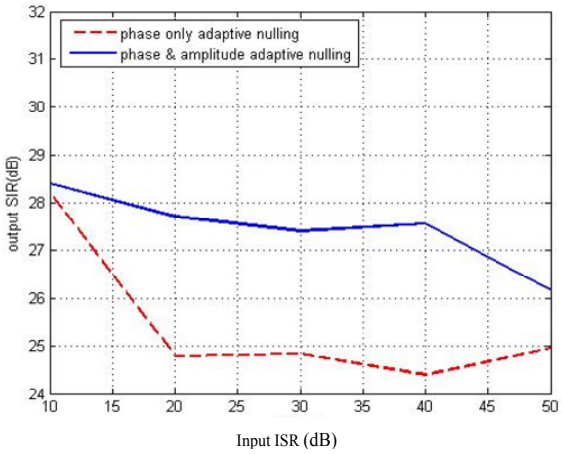
۴-۳ صفرگذاری با استفاده از دامنه و فاز وزن‌های عناصر

در این قسمت، از دامنه وزن‌های عناصر نیز برای صفرگذاری استفاده شده است. بدین ترتیب که دامنه وزن‌های عناصر نیز ۸ بیتی در نظر گرفته شده و سه بیت آن برای صفرگذاری استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در این حالت اندکی بهبود در کارآیی الگوریتم ژنتیک نسبت به حالتی که فقط از فاز عناصر استفاده می‌شد وجود دارد. ولی از این مقدار اندک بهبود می‌توان در مقابل هزینه و پیچیدگی سیستم صرف نظر کرد.

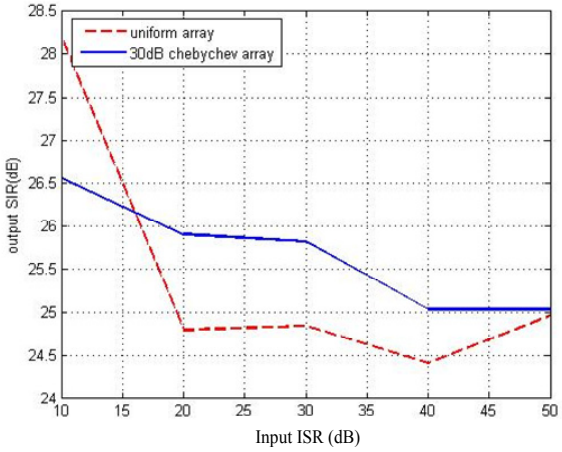
۴-۴ مقایسه آرایه یکنواخت و آرایه چبی‌شف

در شکل ۹ مقایسه‌ای بین آرایه یکنواخت و آرایه چبی‌شف با سطح گلبرگ ۳۰ دسی‌بل [۷] انجام گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آرایه چبی‌شف اندکی بهبود در کارآیی نسبت به آرایه یکنواخت دارد و این به دلیل اثر دامنه وزن عناصر بر کارآیی سیستم است. آرایه یکنواخت و چبی‌شف وزن‌های ساکن و نقطه شروع الگوریتم می‌باشند.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸: صفرگذاری با استفاده از دامنه و فاز عناصر.



شکل ۹: مقایسه الگوریتم ژنتیک با آرایه چبی‌شف و آرایه یکنواخت.

٤-٥ مقایسه معیارهای بهینه‌سازی

در این قسمت برای تابع شایستگی توابع و معیارهای مختلفی در نظر گرفته شده است. معیارهای کمترین توان خروجی، نسبت سیگنال به نویز به علاوه تداخل و همچنین کمترین میانگین مربع خطا (MMSE)[1] که یک سیگنال مرجع در نظر می‌گیرد و میانگین مربع خطای بین خروجی و سیگنال مرجع را به دست می‌آورد و آن را مینیمم می‌کند. اگر $r(t_k)$ سیگنال مرجع باشد، خطای بین خروجی و سیگنال مرجع $e(t_k)$ است

$$e(t_k) = r(t_k) - \boldsymbol{w}^H \boldsymbol{x}(t_k) \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۹)$$

حال میانگین مربع خطا از (۱۰) به دست می‌آید

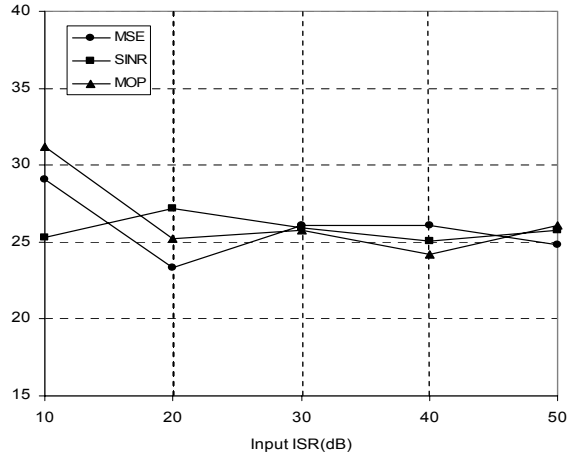
$$E = E\{|\, r(t_k) - \boldsymbol{w}^H \boldsymbol{x}(t_k)\,|^۲\} \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۱۰)$$

که چون نمونه‌های سیگنال در اختیار است، تخمینی از میانگین مربع خطا را می‌توان به دست آورد

$$\hat{E} = \frac{۱}{K}\sum_{k=۱}^{K} e(t_k)e(t_k)^* \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۱۱)$$

در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین این سه معیار بهینه‌سازی صورت گرفته که مشاهده می‌شود کارآیی هر سه معیار به عنوان تابع شایستگی تقریباً در یک حد است.

1. Minimum Mean Square Error



شکل ۱۰: مقایسه معیارهای بهینه‌سازی مختلف؛ کمترین توان خروجی، کمترین میانگین مربع خطا و نسبت سیگنال به نویز به علاوه تداخل.

٤-٦ مقایسه الگوریتم ژنتیک با MPDR

در این قسمت الگوریتم ژنتیک و MPDR با شرایط کاملاً مساوی با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛

MPDR یک الگوریتم شکل‌دهی پرتو است که جواب بهینه برای وزن‌های عناصر را به روش تحلیلی به دست می‌آورد. سیگنال ورودی همان است که در (۱) بیان شده است. تابع خودهمبستگی سیگنال ورودی از (۱۲) به دست می‌آید

$$R_x(\theta_.) = E\{\boldsymbol{x}(t_k)\boldsymbol{x}(t_k)^H\} = \sigma_s^۲ \boldsymbol{a}(\theta_.)\boldsymbol{a}(\theta_.)^H + R_n \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۱۲)$$

که $\sigma_s^۲$ توان سیگنال مطلوب و R_n تابع خودهمبستگی نویز است

$$\sigma_s^۲ = E\{|\, s_.(t_k)\,|^۲\} \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۱۳)$$

خروجی آرایه از ضرب تبدیل هرمیتی بردار وزن در سیگنال ورودی به دست می‌آید (مطابق (۲) ۵۰ نمونه در خروجی وجود دارد؛ $K = ۵۰$)

$$y(t_k) = \hat{s}_.(t_k) = \boldsymbol{w}^H \boldsymbol{x}(t_k) \quad , \quad k = ۱,۲,...,K \qquad (۱۴)$$

توان خروجی از (۱۵) محاسبه می شود

$$P = E\{\boldsymbol{y}.\boldsymbol{y}^H\} = \boldsymbol{w}^H R_x \boldsymbol{w} \qquad (۱۵)$$

این الگوریتم بردار وزن‌های بهینه را به صورتی به دست می‌آورد که توان خروجی مینیمم شود و کمترین آشفتگی را نیز در سیگنال ورودی داشته باشیم. بنابراین باید داشته باشیم

$$w_{MP} = \frac{R_x^{-۱}\boldsymbol{a}(\theta_.)}{\boldsymbol{a}(\theta_.)^H R_x^{-۱}\boldsymbol{a}(\theta_.)} \qquad (۱۶)$$

که با شرط فوق بردار وزن بهینه آرایه از (۱۷) به دست می‌آید

$$\min_w \boldsymbol{w}^H R_x \boldsymbol{w} \quad , \quad \boldsymbol{a}(\theta_.)^H \boldsymbol{w} = ۱ \qquad (۱۷)$$

ماتریس همبستگی را نمی‌توان به دست آورد ولی تخمینی از آن را می‌توان با استفاده از نمونه‌های سیگنال به دست آورد

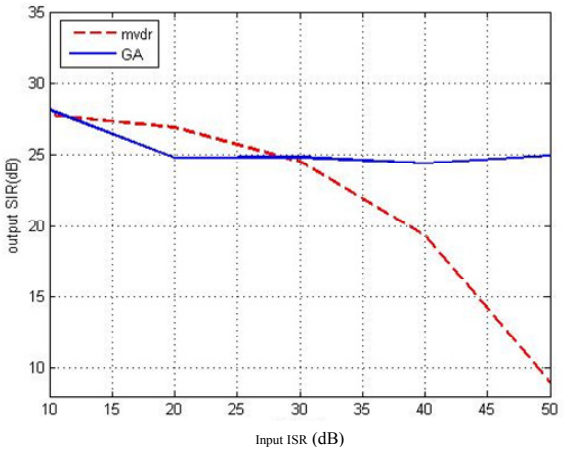
$$\hat{R}_K = \frac{۱}{K}\sum_{k=۱}^{K} \boldsymbol{x}(t_k)\boldsymbol{x}(t_k)^H \qquad (۱۸)$$

در نتیجه بردار وزن تخمینی نیز از (۱۹) به دست می‌آید

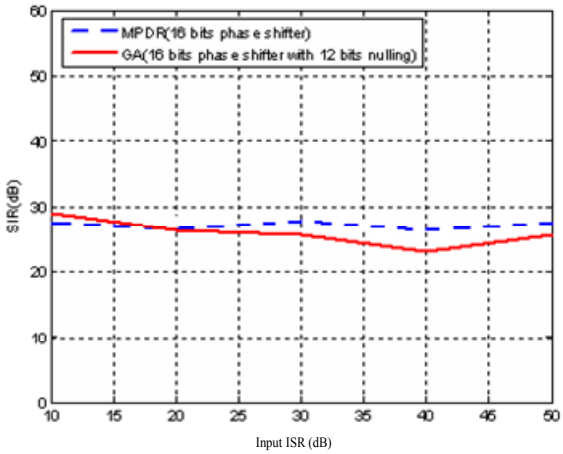
$$\hat{w}_{MP} = \frac{\hat{R}_K^{-۱}\boldsymbol{a}(\theta_.)}{\boldsymbol{a}(\theta_.)^H \hat{R}_K^{-۱}\boldsymbol{a}(\theta_.)} \qquad (۱۹)$$

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۱: مقایسه کارآیی الگوریتم ژنتیک با MPDR (تعداد جمعیت ۲۰ عضو؛ تعداد نسل ۲۰ نسل؛ تقاطع پراکنده؛ احتمال جهش ۰/۰۱).



شکل ۱۲: مقایسه کارآیی الگوریتم ژنتیک با MPDR (انتقال‌دهنده‌های فاز ۱۶ بیتی).

در شکل ۱۱ یک آرایه ۱۰۰ عنصری داریم؛ انتقال‌دهنده‌های فاز هشت‌بیتی؛ سه بیت صفرگذاری در الگوریتم ژنتیک؛ سیگنال اصلی در صفر درجه و سیگنال تداخلی در ۲۰/۵ درجه.

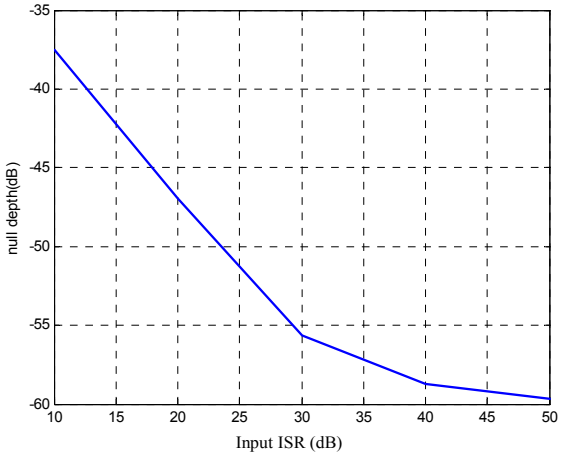
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود اگر توان سیگنال تداخلی تا ۳۰ دسی‌بل از سیگنال اصلی بیشتر باشد هر دو الگوریتم عملکرد یکسانی دارند ولی اگر توان سیگنال تداخلی افزایش یابد عملکرد MPDR افت پیدا می‌کند. دلیل آن کوانتیزه‌شدن جواب است. چون در MPDR، الگوریتم ابتدا جواب را پیدا می‌کند سپس کوانتیزه می‌کند ولی الگوریتم ژنتیک در همان حالت کوانتیزه‌شده جواب را به دست می‌آورد. بنابراین در حالتی که انتقال‌دهنده‌های فاز ۸ بیتی هستند، MPDR قادر نیست صفرهای عمیق در مقابل تداخل‌ها قرار دهد.

ولی اگر تعداد بیت‌های انتقال‌دهنده‌های فاز بیشتر شود این مشکل MPDR تا حدود زیادی رفع می‌شود که این امر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این حالت شرایط کاملاً با حالت قبل یکسان است ولی تعداد بیت های انتقال دهنده های فاز ۱۶ بیت است و بیت های صفرگذاری در الگوریتم ژنتیک ۱۲ بیت می‌باشد.

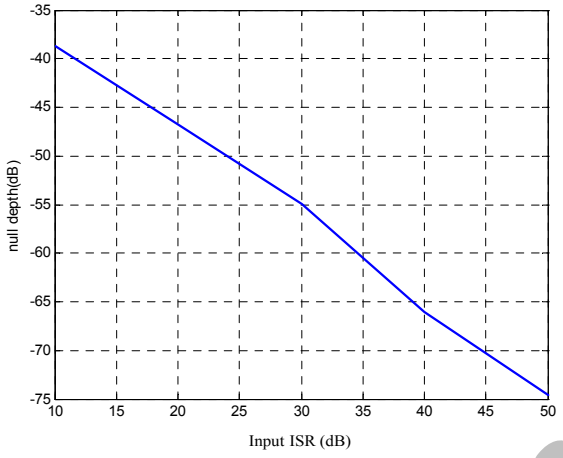
٤-٧ مقایسه عمق صفرها[1] در الگوریتم ژنتیک و MPDR

در MPDR، اگر از انتقال‌دهنده‌های فاز ۸ بیتی استفاده شود، به دلیل

۲. عمق صفر (Null Depth) اصطلاح متداولی است که در مقالات نیز به کار رفته است [۳].



شکل ۱۳: عمق صفر در MPDR.



شکل ۱۴: عمق صفر در الگوریتم ژنتیک.

کوانتیزه‌شدن جواب قادر نیست صفرهای با عمق زیاد تولید کند و به همین دلیل در توان‌های تداخلی بالا عملکرد سیستم کاهش می‌یابد. در صورتی که الگوریتم ژنتیک با افزایش توان تداخلی عمق صفرها را نیز افزایش می‌دهد. در شکل ۱۳ و ۱۴ عمق صفر در هر دو الگوریتم نشان داده شده است.

٤-٨ خطا در بیت‌های انتقال‌دهنده‌های فاز

مزیت عمده الگوریتم ژنتیک این است که چون خود را با شرایط وفق می‌دهد، اگر تعدادی از بیت‌های انتقال‌دهنده‌های فاز خطا داشته باشد یعنی همواره یک مقدار ثابت مثلاً صفر از خود نشان دهد، قادر است که تا حد زیادی کارآیی خود را حفظ کند. همان‌طور که در شکل ۱۵ نمایش داده شده در یک آرایه ۱۰۰ عنصری در صورتی که تا ۶۰ درصد بیت‌های صفرگذاری به طور تصادفی خطا وجود داشته باشد، الگوریتم ژنتیک عملکرد خود را حفظ می‌کند و پس از آن عملکرد الگوریتم افت پیدا می‌کند.

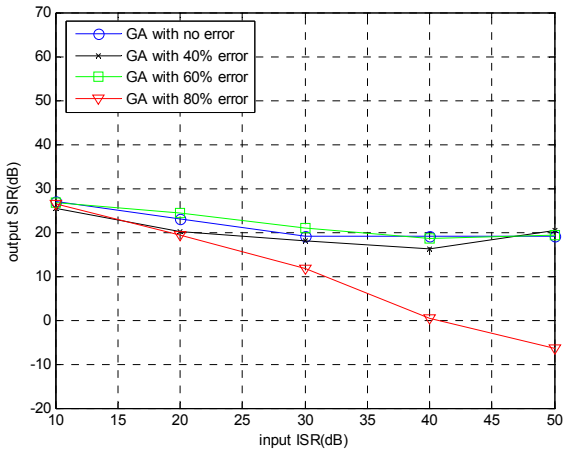
از این خاصیت می‌توان استفاده کرد و به طور تصادفی از بعضی از بیت‌های صفرگذاری استفاده کرد. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از ۴۰ درصد بیت‌های صفرگذاری همان کارآیی را به دست آورد.

٤-٩ الگوریتم ژنتیک با جست و جوی دوگانه[2]

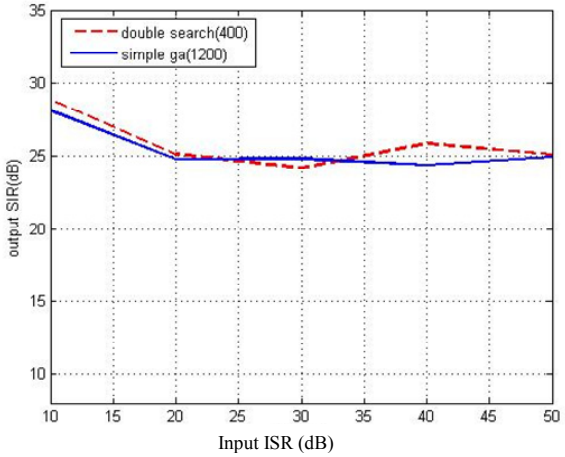
در این تکنیک از خاصیت جهش وزن‌دار استفاده می‌شود. بدین ترتیب

2. Double Search

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۵: خطا در بیت‌های انتقال‌دهنده‌های فاز.



شکل ۱۶: مقایسه الگوریتم جست و جوی دوگانه و الگوریتم ساده.

که ابتدا نرخ جهش را از ۰/۰۱ به ۰/۱ افزایش می‌دهیم و از جهش یکنواخت استفاده می‌کنیم. این امر به الگوریتم اجازه می‌دهد تا نواحی بیشتری از فضای جواب را جست و جو کند. پس از این که جمعیت اندکی همگرا شد، مجدداً نرخ جهش را به ۰/۰۱ برمی‌گردانیم و از جهش وزن‌دار استفاده می‌کنیم. این امر باعث می‌شود که الگوریتم فقط فضای اطراف بهترین جواب را جست و جو کند و بنابراین زودتر همگرا شود. استفاده از این تکنیک می‌تواند پیچیدگی الگوریتم را که عبارت است از تعداد اعضای جمعیت ضرب در تعداد نسل تا یک‌سوم کاهش دهد. در شکل ۱۶ الگوریتم جست و جوی دوگانه با الگوریتم ساده مقایسه شده است. در این مقایسه الگوریتم ساده دارای جمعیتی با ۶۰ عضو است و الگوریتم ۲۰ نسل تکرار شده در صورتی که الگوریتم جست و جوی دوگانه دارای جمعیتی با ۲۰ عضو است که ۲۰ نسل تکرار شده. بنابراین ملاحظه می‌شود که الگوریتم جست و جوی دوگانه با پیچیدگی یک‌سوم الگوریتم ساده، دارای کارآیی معادل با الگوریتم ساده است.

۴-۱۰ مقایسه تعداد محاسبات در الگوریتم ژنتیک و MPDR

در MPDR اگر تعداد عناصر ۱۰۰ در نظر گرفته شود و تعداد نمونه‌های سیگنال ۳۰۰ نمونه باشد (این فرض برای حالتی است که کارآیی دو الگوریتم یکسان باشد)، برای به دست آوردن ماتریس کوواریانس که یک ماتریس ۱۰۰×۱۰۰ است تنها باید شش میلیون عمل جمع و ضرب انجام داد و پس از آن نیز بایستی از این ماتریس ۱۰۰×۱۰۰ معکوس گرفت که نیاز به عملیات بسیار زیادی دارد. در صورتی که در الگوریتم ژنتیک هر بار محاسبه توان نیاز به ۱۰۰ عمل جمع و ضرب دارد که اگر الگوریتم دارای جمعیتی با ۲۰ عضو باشد و ۲۰ نسل تکرار شود، ۴۰۰ بار محاسبه توان نیاز است که در مجموع نیاز به چهل هزار عمل جمع و ضرب است و نیز در هر دو نسل ۱۲ بار عمل تقاطع انجام می‌پذیرد که در مجموع ۲۴۰ بار عمل تقاطع صورت می‌پذیرد. همچنین در هر نسل حدوداً ۵ بار عمل جهش صورت می‌گیرد که در طول الگوریتم جمعاً ۱۰۰ بار عمل جهش صورت می‌گیرد. در نهایت در هر نسل ۲۰ بار درجه‌بندی شایستگی به وقوع می‌پیوندد که تعداد کل آن در ۲۰ نسل ۴۰۰ بار می‌باشد.

مجموع کل عملیات محاسباتی که در الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد قابل مقایسه با تعداد عملیات در MPDR می‌باشد و در الگوریتم ژنتیک پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به MPDR دارد.

۵- نتایج

در این مقاله عملگرهای پیشرفته در الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شد و بهبود آن نسبت به عملگرهای گذشته نشان داده شد. همچنین از روش جستجوی دوگانه و جهش وزن‌دار استفاده شد که قادر است پیچیدگی الگوریتم را تا یک‌سوم کاهش دهد و به تبع آن زمان اجرای الگوریتم تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با الگوریتم MPDR نیز مقایسه شد و ملاحظه گردید که با وجود پیچیدگی سخت‌افزاری کمتر کارآیی آن با الگوریتم MPDR قابل مقایسه است و حتی زمانی که از انتقال‌دهنده‌های فاز با تعداد بیت کمتر استفاده شود در حضور سیگنال‌های تداخلی با توان بالا کارآیی بهتری نیز دارد.

برای بهبود در کارآیی الگوریتم، می‌توان بر روی درجه‌بندی شایستگی کار کرد تا در حضور تداخل‌های با توان قابل مقایسه با سیگنال مطلوب صفرهایی با عمق بیشتر داشته باشیم.

با بررسی انتقال‌دهنده‌های فاز با بیت‌های دارای خطا به این نتیجه می‌رسیم که می‌توان سیاستی برای استفاده از بیت‌های صفرگذاری اتخاذ کرد که طی آن از تعداد کمتری از بیت‌ها برای صفرگذاری استفاده شود.

برای تحقیق بیشتر بر روی کارآیی GA و مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی، می‌توان از روش‌های جدید کولونی مورچگان [۸] و زنبورها [۹] و یا گروه ذرات [۱۰] و [۱۱] در انجام صفرگذاری در آنتن‌های آرایه‌ای استفاده کرد که به نوبه خود می‌تواند پژوهش دیگری باشد که از نتایج مقاله حاضر در آنها سود جست.

مراجع

[1] A. Tennat, M. M. Dawoud, and A. P. Anderson, "Array pattern nulling by element position perturbations using genetic algorithm," *Electronics Letters*, vol. 30, no. 3, pp. 174-176, Feb. 1994.

[2] R. J. Mitchel, B. Chambers, and A. P. Anderson, "Array pattern synthesis in the complex plane optimised by a genetic algorithm," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 20, pp. 1843-1845, 26 Sep. 1996.

[3] R. L. Haupt, "Phase-only adaptive nulling with a geneticalgorithm," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 6, pp. 1009-1015, Jun. 1997.

[4] D. S. Weile and E. Michielssen, "The control of adaptive antenna arrays with genetic algorithms using dominance and diploidy," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 10, pp. 1424-1433, Oct. 2001.

[5] C. Balanis, *Antenna Theory and Design*, John Wiley & Sons, Singapore, 1982.

[6] R. L. Haupt, "An introduction to genetic algorithms for electromagnetics," *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 7-15, Apr. 1995.

Archive of SID

www.SID.ir

[7] R. A. Shore, "Nulling at symmetric pattern location with phase - only weight control," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 5, pp. 530-533, May 1984.
[8] N. Karaboga, K. Guney, and A. Akdagli, "Null steering of linear antenna arrays by using modified touring ant colony optimization algorithm," *Int. J. RF and Microwave Computer Aided Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 375-383, Jun. 2002.
[9] K. Guney and M. Onay, "Amplitude-only pattern nulling of linear antenna array with the use of bees algorithm," *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, vol. 70, pp. 21-36, 2007.
[10] M. M. Khodier and C. G. Christodoulou, "Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 53, no. 8, pp. 2674-2679, Aug. 2005.
[11] D. W. Boeringer and D. H. Werner, "Particle swarm optimization versus genetic algorithm for phase array synthesis," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 52, no. 3, pp. 771-779, Mar. 2004.

شاهرخ جم در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز با گرایش برق و الکترونیک و در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مخابرات میدان دریافت نمود. از سال ۱۳۷۰ الی ۱۳۸۳ نامبرده به عنوان عضو هیئت علمی در دانشگاه شیراز به کار مشغول بود و پس از راه اندازی دانشگاه صنعتی شیراز از سال ۱۳۸۳ تا کنون در گروه مخابرات آن دانشگاه در سمت استادیار ادامه کار داد. در سال ۱۳۸۰موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق – مخابرات میدان از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند: آنتن ، مایکروویو ، میکرواستریپ و رادار می باشد.

محسن دل روشن در سال ۱۳۸۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشکده علمی کاربردی پست و مخابرات و در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز دریافت نمود. از سال ۱۳۸۴ نامبرده به عنوان کارشناس ارشد مخابرات در صنایع الکترونیک شیراز مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند کدهای تصحیح خطا، صفرگذاری وفقی و طراحی آنتن می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir