

## علمی- پژوهشی

## الگوی تشعشی و شکل دهی پرتو یک آرایه FDA پالسی دوبعدی

سید حسین محسنی ارمکی<sup>۱\*</sup>، محمدحسین مدنی<sup>۲</sup>، محمد عسکری چاورچی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، ۲- دانشیار، ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۷/۰۷/۰۴، پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۱)

## چکیده

برخلاف آرایه‌های فازی مرسوم که الگوی تشعشی آن فقط وابسته به زاویه است، آرایه‌های با چندگانگی فرکانس (FDA) الگوی تشعشی وابسته به فاصله، زاویه و زمان را تولید می‌کنند. خاصیت فوق در نتیجه استفاده از چندگانگی فرکانس در تحریک عناصر آرایه است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است و آرایش‌های فرکانسی مختلفی اعم از خطی و غیرخطی به منظور تحریک عناصر پیشنهاد شده که در عمده آنها از موج پیوسته استفاده شده است. در این مقاله بجای موج پیوسته از پالس جهت تحریک عناصر آرایه استفاده می‌شود. بدین لحاظ ابتدا با تحریک پالسی آرایه خطی، مشخصات تشعشی آن استخراج شده و سپس هندسه آرایه به حالت صفحه‌ای ارتقاء داده می‌شود. در این حالت الگوی تشعشی آن برای زمان‌های مختلف ترسیم می‌گردد. در نهایت با اعمال ضرایب وزن‌دار به آرایه شکل دهی پرتو، انجام شده و بیشینه پرتو در نقطه‌ای خاص متمرکز می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** آرایه چندگانگی فرکانس، مقابله با اخلاص، ردگیری اهداف، مخابرات با امنیت بالا

## ۱. مقدمه

تشعشی به صورت S مانند در فضای دوبعدی فاصله و زاویه منتشر می‌شود. این خاصیت باعث جاروب الگو بدون نیاز به تغییردهنده فاز یا چرخش مکانیکی می‌شود. به منظور تولید انواع الگوهای تشعشی می‌توان توابع متفاوتی از فرکانس جابه‌جایی به گونه یکنواخت یا غیریکنواخت استفاده نمود که در هر حال الگوی تشعشی حاصل نسبت به زاویه، فاصله و زمان متغیر است. الگوهای فوق از تعداد زیادی نواحی تشعشی با دامنه حداکثر متناسب با فاصله در فضای دوبعدی برخوردار خواهند بود. در مرجع [۲]، با چینی خاص عناصر FDA، خنثی‌سازی تزویج الگوی تشعشی فاصله- زاویه به دست آمده است. یک گیرنده در نقطه مرجع، شکل موج‌های مدوله شده پالسی را بدون وابستگی به زاویه دریافت می‌کند. فرمول‌بندی دقیق الگوی تشعشی FDA دواپستا با در نظر گرفتن هندسه دواپستایی در [۳] ارائه شده است.

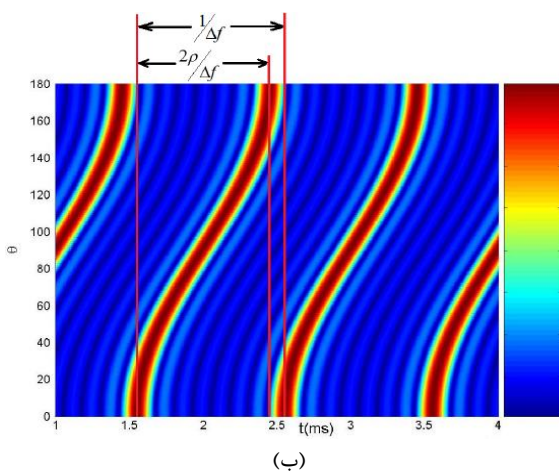
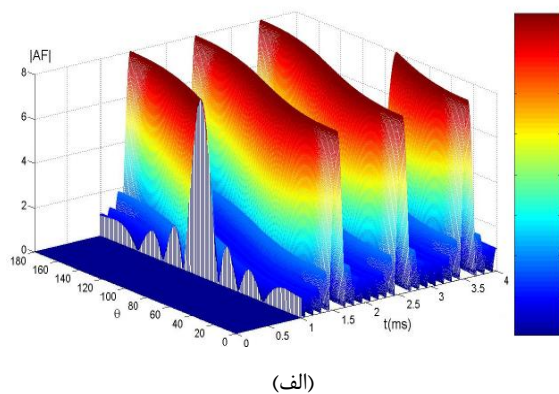
از آن جا که زاویه و فاصله اهداف را نمی‌توان به علت تزویج زاویه و فاصله به تنهایی از بیشینه الگوی تشعشی FDA تخمین زد [۴]، لذا یک رادار FDA خطی با پالس‌های دوگانه در [۵] برای مکان‌یابی اهداف در زاویه و فاصله پیشنهاد شده است. این روش را می‌توان به آشکارسازی اهداف در بعد زاویه و سپس مکان‌یابی آنها در بعد فاصله، تفسیر کرد. یکی از کاربری‌های مد نظر برای FDA تمرکز انرژی الکترومغناطیسی در یک ناحیه از فضا است. در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است یکی از جدیدترین

اگرچه آنتن‌های آرایه فازی و آنتن‌های چند ورودی چند خروجی (MIMO) در دهه‌های اخیر به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند اما الگوی تشعشی ارسالی هر دوی این آنتن‌ها فقط تابعی از زاویه است. به منظور هدایت الگوی تشعشی وابسته به فاصله، آرایه با چندگانگی فرکانس توسط Antonik معرفی شد [۱]. ایده اولیه آرایه با چندگانگی فرکانس نشأت گرفته از یک آنتن با مدولاسیون زمانی است که توسط E. Shanks در سال ۱۹۶۱ ارائه شده است. ایشان در مقاله خود تئوری جاروب الکترونیکی با استفاده از روش‌های مدولاسیون زمانی را بیان و معادلات اساسی و روابط مربوط به آن را ارائه نمود. بدین ترتیب یک روش جاروب الکترونیکی بدون استفاده از تغییردهنده فاز بنیان شد. متفاوت با رادارهای آرایه فازی و MIMO که تمامی عناصر آرایه در یک فرکانس ثابت کار می‌کنند، آرایه با چندگانگی فرکانس از یک فرکانس جابه‌جایی کوچک در طول آرایه استفاده می‌کند که این امر باعث می‌شود الگوی تشعشی ارسالی علاوه بر زاویه به فاصله و زمان هم وابسته شود. در ساده‌ترین حالت که یک آرایه با چندگانگی فرکانس با عناصر چیده شده در راستای یک خط و فرکانس جابه‌جایی خطی یکنواخت است الگوی

\* نویسنده پاسخگو: mohseni@mut.ac.ir

1 MultiInput-MutiOutput

همان‌طور که قبلاً بیان شد الگوی تشعشعی در آرایه‌های فازی فقط به زاویه وابسته است که در این حالت تمیز دادن بین دو هدف با زاویه یکسان و فاصله متفاوت امکان‌پذیر نیست؛ مشکل فوق در آرایه‌های با چندگانگی فرکانسی برطرف شده است. در شکل (۲) الگوی تشعشعی یک آرایه FDA هشت عنصره با فرکانس جابه‌جایی خطی ۱ کیلوهرتز که فاصله بین عناصر آن ۰.۴۵، طول موج فرکانس کاری ( $\rho = \frac{d}{\lambda} = 0.45$ ) و فرکانس کاری آن ۱۰ گیگاهرتز می‌باشد در دو حالت نمایش داده شده است [۱۰].



شکل (۲): الگوی تشعشعی آرایه FDA خطی (الف) نمایش سه‌بعدی (ب) نمایش دوبعدی زمان-زاویه

همان‌طور که از شکل‌ها پیداست الگوی تشعشعی یک آرایه با چندگانگی فرکانس بدین‌صورت است که جبهه هم‌فاز موج به‌صورت مارپیچ در فضا منتشر می‌شود و با سرعت نور حرکت می‌کند. شکل (۲-ب) الگوی دوبعدی را در فاصله ثابت ۳۰۰ کیلومتری ارائه می‌نماید. این الگوی تشعشعی هم در زمان و هم در فاصله متناوب است. این وابستگی به زمان و فاصله وجه تمایز آرایه‌های با چندگانگی فرکانس و آرایه فازی می‌باشد. وابستگی الگوی تشعشعی به فاصله و زاویه و زمان درجه آزادی بیشتری در کنترل و هدایت پرتو در جهت‌ها و فاصله‌های دلخواه فراهم

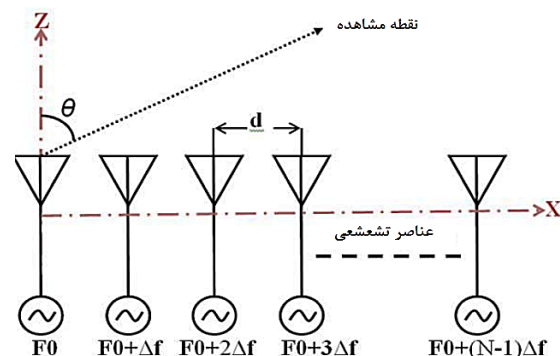
پژوهش‌ها، تحریک عناصر آرایه به‌وسیله یک پالس به‌جای موج پیوسته (CW) می‌باشد [۶]. از آن‌جا که هدف غایی آرایه FDA استفاده از آن در سامانه‌های راداری است، لذا در این مقاله به‌جای تحریک عناصر آرایه را با موج پیوسته از تحریک پالس استفاده شده است. در انتها ساختار آرایه به حالت دوبعدی تعمیم داده شده و شبیه‌سازی‌های مرتبط با آن انجام می‌شود.

## ۲. مفهوم کلی آرایه FDA

آرایه FDA یک مفهوم تازه و جدید جاروب الکترونیکی است که عناصر آن مطابق شکل (۱) می‌توانند با شکل موج‌های مشابه یا متفاوت تحریک شوند. اصلی‌ترین تفاوت FDA با آرایه‌های فازی مرسوم این است که مقدار اندکی افزایش فرکانس نسبت به فرکانس حامل در طول عناصر آرایه بجای اختلاف فاز به کار می‌رود. که این امر باعث می‌شود، الگوی تشعشعی تابعی از فاصله، زمان و زاویه شود در صورتی که در آرایه‌های فازی فقط تابعی از زاویه می‌باشد. وابستگی به فاصله الگوی تشعشعی بسیار مهم است زیرا می‌توان در فواصل متفاوت، شدت الگوی تشعشعی بیشینه یا کمینه داشت. اگرچه این وابستگی به فاصله ممکن است باعث مشکلاتی چون افزایش حجم محاسبات گردد، ولی از نقطه‌نظر کاربردی، منجر به کشف چند هدف به‌طور هم‌زمان در فواصل مختلف می‌شود. همچنین می‌تواند در مقابل اختلال‌های نویزی و تداخل‌های وابسته به فاصله کارساز باشد. فرم بسته ضرب آرایه در آرایه آنتن معمولی با  $N$  عنصر تشعشعی مطابق رابطه ذیل قابل حصول است [۱].

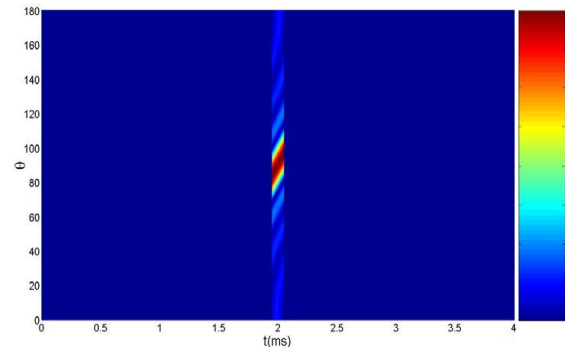
$$AF = \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad \psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta) \quad (1)$$

که در آن  $\psi$  اختلاف فاز هر عنصر نسبت به عنصر قبلی ناشی از اختلاف مسیر عناصر تا نقطه مشاهده، زاویه بین بردار فاصله با محور تراز آنتن و  $d$  فاصله بین عناصر است.

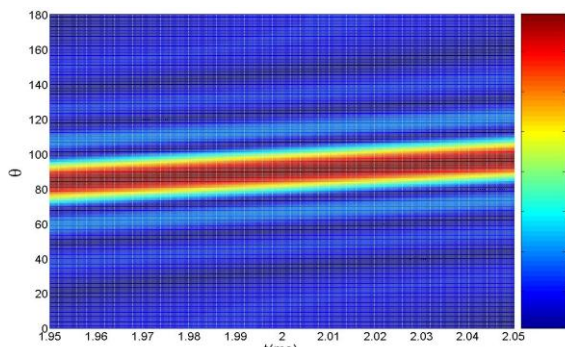


شکل (۱): چیدمان عناصر در آرایه با چندگانگی فرکانس که فرکانس هر عنصر به‌اندازه  $\Delta f$  نسبت به عنصر ماقبل خود افزایش یافته است.

تحریک شده است را در فاصله ۳۰۰ کیلومتری را نشان می‌دهد [۱۰].



(الف)



(ب)

شکل (۴): الگوی تشعشی آرایه پالسی با فرکانس جابه‌جایی خطی تحریک شده با پالس به عرض ده درصد  $1/\Delta f$

مطابق شکل (۴) مشاهده می‌شود چنانچه آرایه FDA با تحریک پالسی به عرض ده درصد  $1/\Delta f$  تغذیه شود، در فاصله مذکور بیشینه اصلی انرژی به اندازه ۱۲ درجه جاروب می‌شود.

### ۲-۳. توصیف آرایه پالسی در حالت دوبعدی

در این بخش آرایه با چندگانگی فرکانس (FDA) به حالت دوبعدی یا صفحه‌ای تعمیم داده شده است. به‌طور معمول، سامانه‌های آرایه‌ای مسطح یا دوبعدی امکان هدایت پرتو در دو جهت سمت و ارتفاع را فراهم می‌کنند اما به فاصله وابسته نیستند، بنابراین، جهت تعیین فاصله هدف به پردازش سیگنال اضافه‌ای نیاز دارند. سامانه‌های FDA امکان هدایت پرتو در سه بعد زاویه سمت، زاویه ارتفاع و فاصله را فراهم می‌کند که باعث می‌شود پردازش اضافه‌ای جهت تعیین برد هدف صورت نگیرد [۶]. آرایه‌های FDA دوبعدی می‌توانند هندسه‌های مختلفی از جمله مربعی، دایروی و ... داشته باشند که در این مقاله نوع مسطح مربعی بررسی می‌شود. هدف غایی آن است که در FDA دوبعدی ارائه شده به منظور تحریک عناصر آرایه به‌جای موج پیوسته از پالس شده و الگوی تشعشی در یک‌زمان ثابت در فضا ترسیم شود. مشابه حالت تک‌بعدی در ابتدا ضریب آرایه را برای

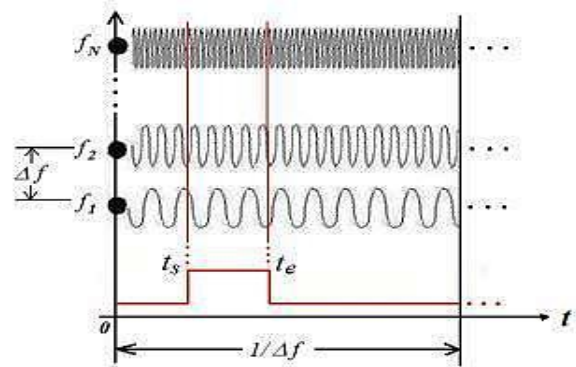
می‌کند که مزیت اصلی آرایه‌های با چندگانگی فرکانس است.

### ۳. FDA پالسی

در این قسمت بجای CW (موج پیوسته) جهت تحریک آنتن‌های آرایه از سیگنال پالس استفاده می‌شود. جهت تولید پالس، مدت زمان کوتاهی فرستنده را روشن شده و سیگنال ارسال می‌گردد. در واقع روابط مربوط به FDA پالسی مشابه CWFDA است با این تفاوت که فقط در مدت زمان ارسال سیگنال معتبر خواهد بود.

### ۳-۱. توصیف آرایه پالسی در حالت تک‌بعدی

مفهوم کلی FDA پالسی در شکل (۳) نمایش داده شده است [۱۰].



شکل (۳): نمایش آرایه پالسی

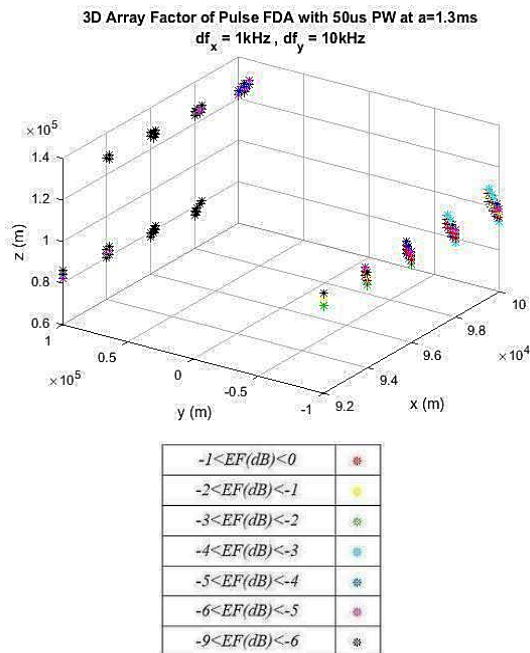
همان‌طور که قبلاً گفته شد FDA پالسی یک حالت خاص از FDA موج پیوسته می‌باشد بنابراین، جهت محاسبه ضریب آرایه FDA پالسی، با استفاده از ضریب آرایه FDA موج پیوسته اندکی تغییرات لازم است. اگر فرض شود که سیگنال ارسال شده توسط هر یک از عناصر آرایه به‌صورت یک عبارت نمایی باشد رابطه محاسبه ضریب آرایه برای یک FDA پالسی به‌صورت زیر در می‌آید [۱۰].

$$AF(\theta, t, r)_{M, p}^p = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < r/c + t_s \text{ or } t > r/c + t_e) \\ \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} & (r/c + t_s \leq t \leq r/c + t_e) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن

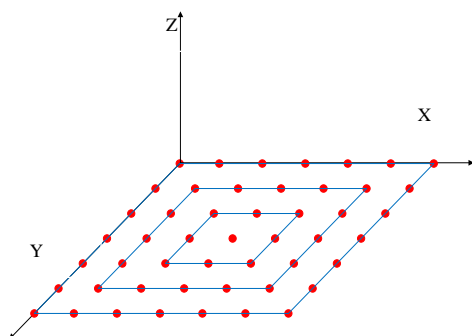
$$\psi = 2\pi \cos \theta \times \rho + 2\pi \left( \frac{t}{1/\Delta f} \right) - 2\pi \left( \frac{r}{c/\Delta f} \right) \quad (3)$$

و  $\rho = d/\lambda$  فاصله بین عناصر بر حسب طول موج است. به‌عنوان مثال شکل (۴) الگوی تشعشی یک FDA پالسی با مشخصات ( $N=8, \Delta f=1\text{kHz}, \rho=0.45$ ) که با یک پالس مربعی به عرض پهنای زمانی  $[0.95 \times 1/\Delta f, 1.05 \times 1/\Delta f]$



شکل (۶): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان ۱/۳ میلی ثانیه

شکل‌های فوق این واقعیت را آشکار می‌سازد که نتیجه، الگوی تشعشی مشابه حالت FDA دوبعدی موج پیوسته (CW) است که در یک بازه‌ای از زمان (زمانی که آنتن روشن است) بریده شده است. همان‌طور که در قبل هم اشاره شد می‌توان هر مدل توزیع فرکانسی را به آرایه اعمال کرد. اگر الگوی تشعشی در زمان‌های مختلف رسم شود، به راحتی قابل مشاهده است که الگو، با دوره تناوب ۱ میلی ثانیه برابر با معکوس کمترین مقدار فرکانس جابه‌جایی، قابل تکرار است. در مثالی دیگر آرایش فرکانسی آرایه FDA را به صورت مربع‌هایی هم‌مرکز به صورتی که فرکانس عناصر هر مربع یکسان باشد و فرکانس عناصر تشکیل دهنده مربع‌ها از کوچک‌ترین مربع تا بزرگ‌ترین مربع به صورت خطی و با ضریب فرکانس جابه‌جایی ثابت افزایش یابد، مطابق شکل (۷) در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): چیدمان عناصر آرایه FDA به صورت مربع‌های هم‌مرکز

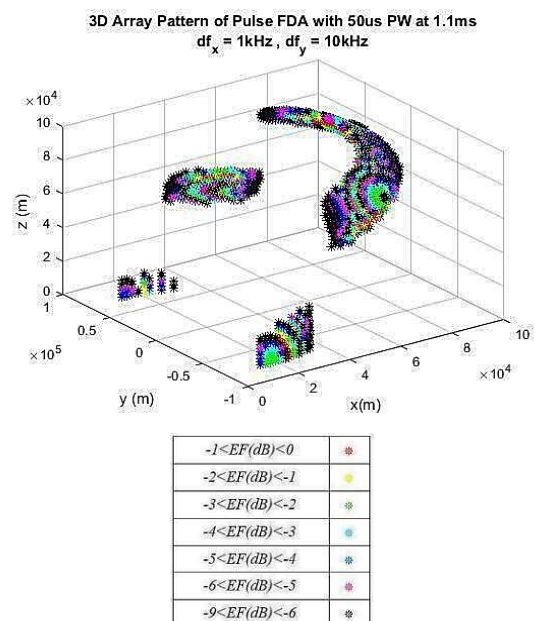
این ساختار به محاسبه می‌شود. ضریب آرایه در FDA پالسی تک‌بعدی در راستای یک محور نوشته شده بود، اگر مد نظر باشد که این ساختار را به حالت دوبعدی تعمیم داده شود، کافی است که تأثیر بقیه عناصر را نیز لحاظ گردد. بدین منظور در رابطه (۲) یک مجموع دیگر در راستای محور عمودی لحاظ می‌شود. بنابراین، رابطه ضریب آرایه FDA پالسی دوبعدی به صورت زیر قابل ارائه است.

$$AF = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < \frac{r}{c} + t_s \text{ or } t > \frac{r}{c} + t_e \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \exp\left(j2\pi f_{nm} \left(t - \frac{R_{nm}}{c}\right)\right) & \frac{r}{c} + t_s < t < \frac{r}{c} + t_e \end{cases} \quad (4)$$

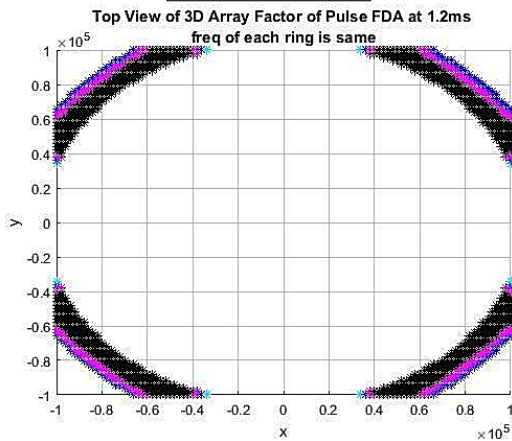
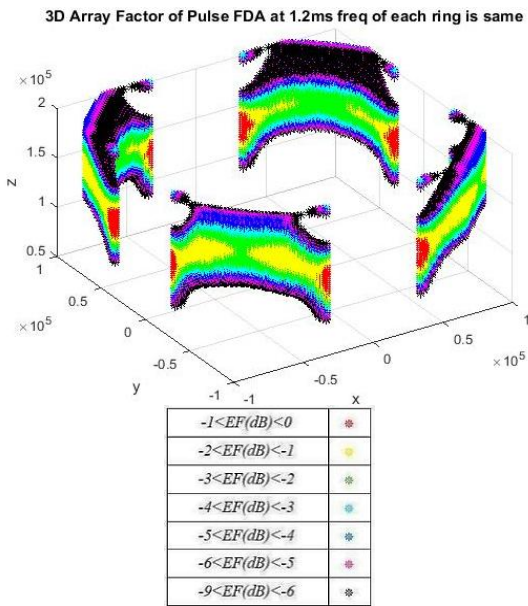
$f_{nm}$ ، فرکانس عنصر  $(n, m)$  ام در آرایه FDA دوبعدی است که می‌توان فرکانس جابه‌جایی را به صورت خطی یا حالت‌های دیگر به آرایه اعمال نمود و الگوی تشعشی آن را مشاهده کرد. در صورتی که فرکانس جابه‌جایی را به صورت خطی در راستای هر دو محور اعمال گردد، فرکانس عنصر  $(n, m)$  ام از آرایه FDA مطابق رابطه (۵) است.

$$f_{nm} = f_c + n\Delta f_x + m\Delta f_y \quad (5)$$

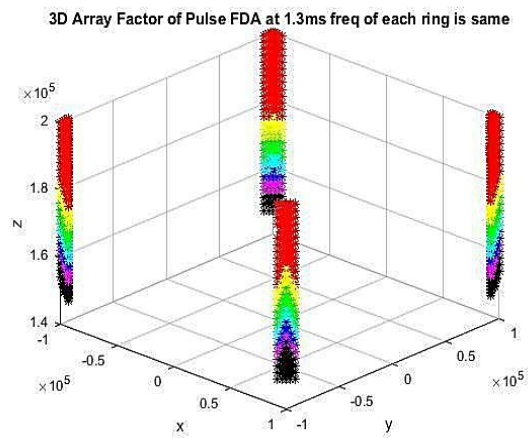
برای مثال الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی  $9 \times 9$  با فاصله بین عناصر برابر با نصف طول موج، از نوع پالسی مطابق شکل‌های (۵) و (۶) در یک زمان خاص ترسیم شده است. فرکانس جابه‌جایی ۱ کیلوهرتز در راستای محور  $x$  و ۱۰ کیلوهرتز در راستای محور  $y$ ، پالس‌هایی به عرض ۵۰ میکروثانیه به این آرایه اعمال شده است.



شکل (۵): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان ۱/۱ میلی ثانیه

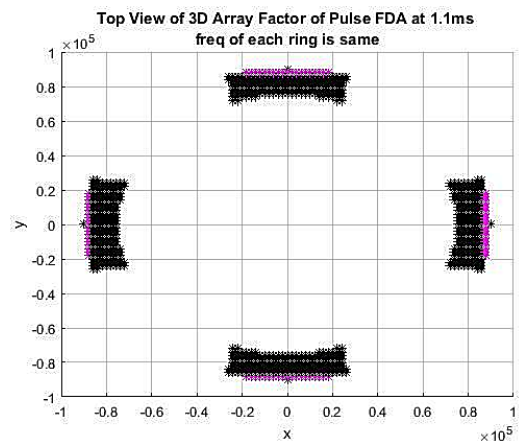
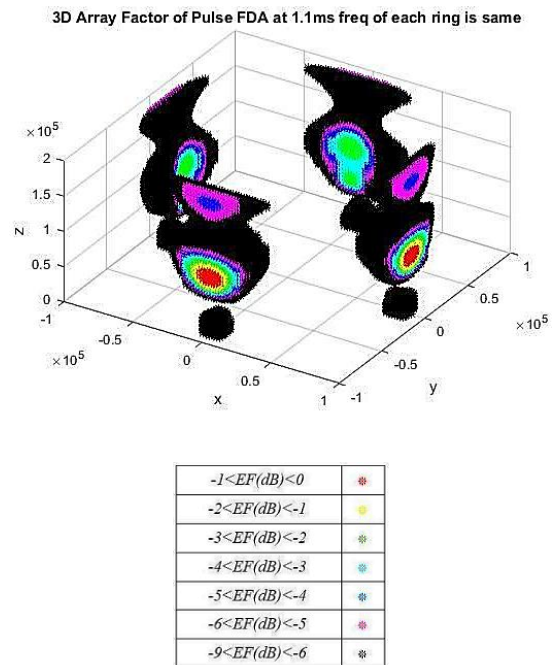


شکل (۹): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان ۱/۲ میلی ثانیه که فرکانس جابه‌جایی در آن به صورت مربع‌های هم‌مرکز اعمال شده است



شکل (۱۰): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان ۱/۳ میلی ثانیه که فرکانس جابه‌جایی در آن به صورت مربع‌های هم‌مرکز اعمال شده است

در این صورت می‌توان فرکانس هر عنصر را به صورت یک درایه از ماتریس در نظر گرفت و آن را به آرایه اعمال نمود. در شکل‌های (۸-۱۰) الگوی تشعشی آرایه FDA پالسی دوبعدی  $9 \times 9$  با فاصله بین عناصر برابر نصف طول موج فرکانس کاری در زمان‌های مختلف با فرکانس حامل ۱۰ گیگاهرتز رسم شده است. فرکانس جابه‌جایی برابر با ۱ کیلوهرتز است و به صورت خطی از نقطه وسط آرایه به سمت خارج برای هر مربع اعمال شده است. اگر این الگوی تشعشی را در زمان‌های مختلف بررسی شود، به راحتی می‌توان دید که با دوره تناوب ۱ میلی‌ثانیه در زمان متناوب است که برابر با معکوس مقدار فرکانس جابه‌جایی است و این دقیقاً همان قاعده FDA است.



شکل (۸): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان ۱/۱ میلی ثانیه که فرکانس جابه‌جایی در آن به صورت مربع‌های هم‌مرکز اعمال شده است

حال ضریب وزن دار جهت هدایت پرتو را طبق رابطه (۸) تعریف می‌گردد. برای یک هدف واقع در  $(x_0, y_0, z_0)$  و عناصر آرایه واقع در  $(x_n, y_n, 0)$ ، سیگنال اندازه‌گیری شده از طریق قرار دادن  $R_{nm} = \sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2 + z_0^2}$  اندازه‌گیری می‌شود.

$$\omega(\hat{R}_0, \hat{\theta}_0, \hat{\phi}_0) = \exp \left\{ j2\pi f_{nm} \left( \frac{\hat{R}_0}{c} - \frac{nd_x \sin(\hat{\theta}_0) \cos(\hat{\phi}_0)}{c} - \frac{md_y \sin(\hat{\theta}_0) \sin(\hat{\phi}_0)}{c} \right) \right\} \quad (۸)$$

با در نظر گرفتن نقطه مرجع در  $(0,0,0)$  و فرض واقع شدن هدف در میدان دور، عبارت تعیین شده برای فاصله، به صورت  $R_{nm} \cong R_0 - nd_x \sin(\theta_0) \cos(\phi_0) - md_y \sin(\theta_0) \sin(\phi_0)$  تعریف می‌شود. که  $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$  و  $\cos(\theta_0) \frac{z_0}{R_0}$  و  $\tan(\phi_0) = \frac{y_0}{x_0}$  و محور تراز آرایه به صورت عمود بر عنصر مرجع و در طول محور Z می‌باشد. در این صورت اگر ضریب وزن دار تعریف شده در رابطه (۸) در میدان نهایی ضرب شده و تأثیر تمامی عناصر آرایه را در رابطه لحاظ گردد، میدان مشاهده شده در نقطه  $(x_0, y_0, z_0)$  مطابق زیر به دست می‌آید:

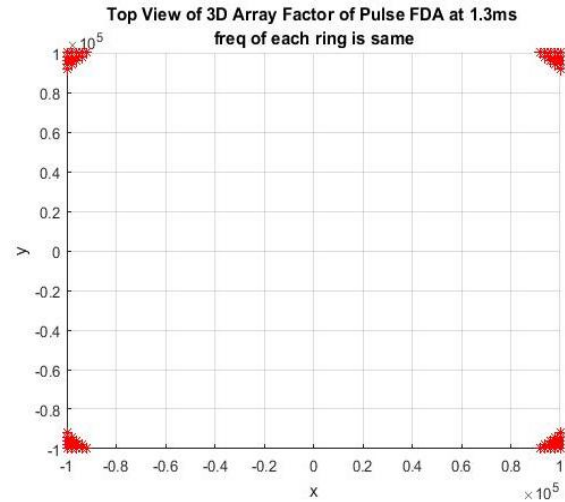
$$s_{nm}(t; \hat{R}_0, \hat{\theta}_0, \hat{\phi}_0) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \omega(\hat{R}_0, \hat{\theta}_0, \hat{\phi}_0) s_{nm} \left( t - \frac{R_{nm}}{c} \right) \quad (۹)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left\{ j2\pi f_{nm} \left( t - \frac{R_0 - \hat{R}_0}{c} + \frac{nd_x (\sin(\theta_0) \cos(\phi_0) - \sin(\hat{\theta}_0) \cos(\hat{\phi}_0))}{c} + \frac{md_y (\sin(\theta_0) \sin(\phi_0) - \sin(\hat{\theta}_0) \sin(\hat{\phi}_0))}{c} \right) \right\}$$

در رابطه بالا پارامترهای  $\hat{R}_0$ ،  $\hat{\theta}_0$ ،  $\hat{\phi}_0$  پارامترهایی هستند که مربوط به هدف می‌باشند و نقطه‌ای است که بیشینه پرتو در آنجا متمرکز می‌شود. در رابطه بالا وقتی  $R_0$  به  $\hat{R}_0$  و  $\theta_0$  به  $\hat{\theta}_0$  و  $\phi_0$  به  $\hat{\phi}_0$  برسد، مقدار میدان در نقطه هدف حداکثر می‌شود که با زمان به صورت متناوب تکرارپذیر است.

با فرض باند باریک بودن سیگنال تحریک ( $BW \ll f_0$ ) و واقع شدن هدف در میدان دور، یک آرایه FDA دوبعدی را در شرایط زیر شبیه‌سازی می‌شود. در شکل (۱۱) یک آرایه FDA صفحه‌ای  $9 \times 9$  با فاصله بین عناصر برابر با نصف طول موج بیشترین فرکانس شبیه‌سازی شده است که در آن فرکانس عناصر به صورت خطی با فرکانس جابه‌جایی ۱ کیلوهرتز در هر راستا افزایش می‌یابد. در این آرایه هدف آن است که بیشینه پرتو نقطه همان طور  $\hat{R}_0 = 100km$ ،  $\hat{\theta}_0 = 45^\circ$ ،  $\hat{\phi}_0 = 45^\circ$  واقع شود. همان طور که از شکل پیداست این امر به درستی محقق شده است. این

$-1 < EF(dB) < 0$	●
$-2 < EF(dB) < -1$	●
$-3 < EF(dB) < -2$	●
$-4 < EF(dB) < -3$	●
$-5 < EF(dB) < -4$	●
$-6 < EF(dB) < -5$	●
$-9 < EF(dB) < -6$	●



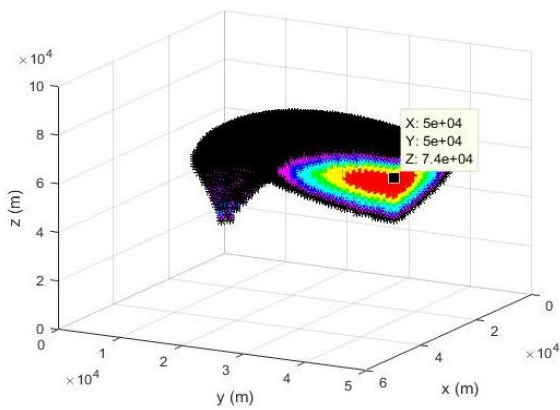
ادامه شکل (۱۰): الگوی تشعشی یک آرایه FDA دوبعدی پالسی در زمان  $1/3$  میلی‌ثانیه که فرکانس جابه‌جایی در آن به صورت مربع‌های هم‌مرکز اعمال شده است

### ۳-۳. شکل‌دهی پرتو با استفاده از آرایه FDA

جهت پرتو در آرایه FDA به فاصله وابسته است. بدین لحاظ جهت‌دهی پرتو به سمت یک هدف در فاصله و زاویه ثابت نیاز به انتخاب صحیح فرکانس تحریک عناصر است. در این بخش خواص تشعشی FDA مورد بررسی قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن این حقیقت که اگر فاصله ثابت فرض شود، آنگاه پرتو وابسته به فاصله خود به فرکانس جابه‌جایی وابسته خواهد بود. یک راهبرد برای انتخاب فرکانس جابه‌جایی به منظور جهت‌دهی دقیق پرتو در فاصله ثابت و زاویه دلخواه معرفی خواهد شد. تمرکز انرژی در یک نقطه خاص هدف این بخش است. بدین منظور نیاز به یک ضریب وزن دار است تا از طریق ضرب آن در میدان نهایی، پرتو آنتن را در نقطه مورد نظر شکل‌دهی گردد. با فرض آنکه سیگنال منتشر شده از هر عنصر آرایه مطابق رابطه (۶) باشد سیگنال تأخیر یافته وقتی به محل هدف برسد مطابق رابطه (۷) خواهد شد.

$$s_{nm}(t) = a_{nm}(t) \exp \{ j2\pi f_{nm} t \} \quad (۶)$$

$$s_{nm}(t) = a_{nm} \left( t - \frac{R_{nm}}{c} \right) \exp \left\{ j2\pi f_{nm} \left( t - \frac{R_{nm}}{c} \right) \right\} \quad (۷)$$



شکل (۱۲): شکل دهی پرتو یک آرایه FDA دوبعدی پالسی با عرض پالس ۱۰۰ میکروثانیه

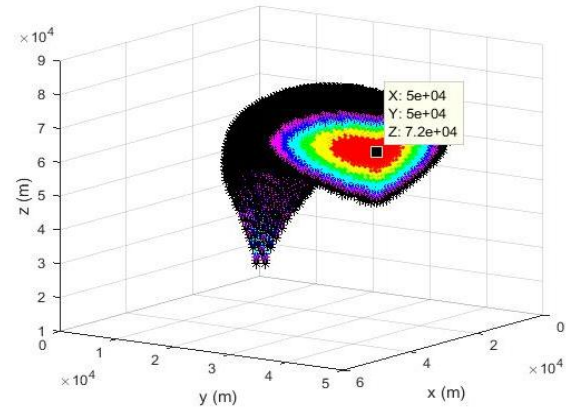
#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله FDA دوبعدی پالسی بررسی شد و نشان داده شد که FDA پالسی همان FDA موج پیوسته برای یک محدوده زمانی خاص (عرض پالس) می باشد. در واقع ضریب آرایه FDA پالسی با کمی دست کاری در رابطه ضریب آرایه FDA موج پیوسته به دست می آید. در رسم الگوی تشعشعی FDA پالسی باید تأثیر زمان رسیدن موج به نقطه هدف را در نظر گرفت. با گذشت زمان محدوده روشن شده توسط یک آرایه FDA پالسی کوچک تر می شود و در نهایت که عرض پالس به پایان رسید یا به عبارتی فرستنده خاموش شد، هیچ تشعشعی وجود ندارد و صفحه نمایش الگوی تشعشعی کاملاً سفید می شود. در نهایت جهت اینکه مقدار بیشینه الگوی تشعشعی را در یک نقطه خاص متمرکز گردد از یک ضریب وزن دار استفاده شده است و با ضرب آن در رابطه کلی میدان، بیشینه الگوی تشعشعی را در یک نقطه دلخواه قرار می گیرد.

#### ۵. مراجع

- [1] P. Antonik, M. C. Wicks, H. D. Griffiths, and C. J. Baker, "Frequency diverse array radars," IEEE Conference on Radar, pp. 24-27, April 2006.
- [2] P. F. Sammartino, C. J. Baker, "The frequency diverse bistatic system". Proc. Fourth Waveform Diversity & Design Conf., Orlando, FL, pp. 155-159, February 2009
- [3] P. F. Sammartino, C. J. Baker, and H. D. Griffiths, "Frequency Diverse MIMO Techniques for Radar," In IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, no. 1, pp. 201-222, Jan. 2013.
- [4] Y. Xu, X. Shi, J. Xu, et al., "Range-angle-dependent beamforming of pulsed frequency diverse array", IEEE Trans. Antennas Propag., pp. 3262-3267, July 2015.
- [5] Jingjing Huang, Kin-Fai Tong, Karl Woodbridge, and Chris Baker. "Frequency diverse array Simulation and design." In Radar Conference, 2009 IEEE, pp. 1-4. IEEE, 2009

الگوی تشعشعی در زمان ۱ میلی ثانیه رسم شده است. مشابه حالات قبلی این الگوی تشعشعی در زمان متناوب است و دوره تناوب آن برابر  $1/\Delta f$  است. در این حالت چنانچه اختلالگری در نقاط غیر از هدف واقع شده باشند تأثیر بسیار اندکی در سیگنال دریافت شده از هدف خواهد داشت.



شکل (۱۱): شکل دهی پرتو یک آرایه FDA دوبعدی

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{5 \times 10^4}{5 \times 10^4} \right) = 45^\circ$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(5 \times 10^4)^2 + (5 \times 10^4)^2}}{7.4 \times 10^4} \right) \square 45^\circ$$

$$R = \sqrt{(5 \times 10^4)^2 + (5 \times 10^4)^2 + (7.4 \times 10^4)^2} \square 100km$$

در ادامه این وضعیت برای حالتی که عناصر آرایه با پالس تحریک شده است تعمیم داده می شود. برای این منظور کافی است که آرایه در یک بازه زمانی کوتاه روشن شود. در این صورت رابطه محاسبه میدان در نقطه هدف با الهام از رابطه (۹) به دست می آید. واضح است که زمانی که آرایه ارسال سیگنال نداشته باشد میدان در نقطه هدف برابر صفر است و در زمانی که آرایه روشن است میدان برابر با همان رابطه ۹ می باشد. در شکل (۱۲) یک آرایه FDA صفحه ای  $9 \times 9$  پالسی با عرض پالس ۱۰۰ میکروثانیه با فاصله بین عناصر برابر با نصف طول موج بیشترین فرکانس شبیه سازی شده است که در آن فرکانس عناصر به صورت خطی با فرکانس جابه جایی ۱ کیلوهرتز در هر راستا افزایش می یابد. مطابق فرض قبیل بیشینه پرتو را در نقطه  $\hat{R}_0 = 100km$ ,  $\hat{\theta}_0 = 45^\circ$ ,  $\hat{\varphi}_0 = 45^\circ$  قرار داده شده است. زمان شروع پالس  $t_s = 1.95$  میلی ثانیه و زمان پایان پالس برابر با  $t_e = 2.05$  میلی ثانیه فرض شده است.

- [9] Paul. Antonik, "An investigation of a frequency diverse array." PhD diss., UCL (University College London), 2009.
- [10] Jingjing Huang, "Frequency diversity array: theory and design." PhD diss., UCL (University College London), 2010.
- [11] Alper Aytun, "Frequency diverse array radar." PhD diss., Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2010.
- [12] S. Rastgar Kisomi, S. H. Mohseni Armaki, A. J. Rashidi, M. Fallah, "Single Dot-Shaped Radiation Pattern Using Frequency Diverse" Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 4, No. 1, 2016, (In persian).
- [6] Jones, M. Aaron, and D. Rigling Brian, "Planar frequency diverse array receiver architecture." In Radar Conference (RADAR), 2012 IEEE, pp. 0145-0150. IEEE, 2012.
- [7] Wasim Khan, Ijaz Mansoor Qureshi, Abdul Basit, and Waseem Khan. "Range-Bins-Based MIMO Frequency Diverse Array Radar With Logarithmic Frequency Offset." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 15 (2016): 885-888
- [8] Wang, Yuxi, Wei Li, Guoce Huang, and Jinliang Li. "Time Invariant Range-Angle-Dependent Beampattern Synthesis for FDA Radar Targets Tracking." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 16 pp.2375-2379, 2017.



## **Radiation pattern and beamforming of a two dimensional pulsed FDA array**

**S. H. Mohseni Armaki<sup>1\*</sup>, M. H. Madani<sup>2</sup>, M. Askari Chavorch<sup>3</sup>**

**Shahid Rajaee Teacher Training University**

(Received: 26/09/2018; Accepted: 01/01/2020)

### **Abstract**

*Unlike conventional phased arrays that produce an angle-dependent radiation pattern, frequency diverse arrays (FDA) generate a radiation pattern dependent on the range, angle, and time, which results in the use of a frequency offset instead of the phase shift along the array. In recent years, a lot of research has been carried out on this topic, and various frequency arrangements, both linear and nonlinear, have been proposed which mainly use continuous waves to excite elements of array. In this paper, we use pulses instead of continuous waves, to stimulate the array elements, and we extend the array geometry to two dimensions, and we plot its radiation pattern for different times. The beam is formed and focused on a specific point by applying a coefficient weighting in the array.*

**Keywords:** Frequency Diverse Array, Opposition With Jamming, Tracking Targets, High Security Communications

---

\* Corresponding author E-mail: mohseni@mut.ac.ir