مجله علمی پژوهشی «الکترومغناطیس کاربردی»
سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵؛ ص ۳۶- ۲۹

الگوی تشعشعی تک نقطه‌ای با استفاده از آرایه چندگانگی فرکانس متقارن

سعید رستگار کیسمی[۱]، سید حسین محسنی ارمکی[۲*]، علی‌جبار رشیدی[۳]، محسن فلاح[۴]

۱- دانشجوی دکتری، ۲ و۳- دانشیار، ۴- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۶/۰۳/۱۸، پذیرش: ۹۶/۰۷/۰۴)

چکیده: آرایه با چندگانگی فرکانس (FDA) مفهوم جدیدی است که الگوی تشعشعی آن برخلاف آرایه آنتن معمولی وابسته به فاصله، زمان و زاویه است. الگوی تشعشعی FDA که متاثر از افزایش اندک یکنواخت فرکانس در عناصر آرایه می‌باشد همانند شکل S در مختصات دوبعدی زاویه و فاصله است. این خاصیت باعث جاروب الگو بدون نیاز به تغییردهنده فاز یا چرخش مکانیکی می‌شود. به منظور تولید انواع شکل الگوهای تشعشعی می‌توان، توابع متفاوتی از فرکانس جابه‌جایی به‌گونه یکنواخت یا غیریکنواخت استفاده نمود که در هر حال الگوی تشعشعی حاصله نسبت به زاویه، فاصله و زمان متغیر است. الگوهای فوق از تعداد زیادی نواحی تشعشعی با دامنه حداکثر متناسب با فاصله در فضای دوبعدی برخوردار خواهد بود. ما در این مقاله تحلیل نوع جدیدی از FDA متقارن که فرکانس جابه‌جایی غیریکنواخت آن از اصول شکل هندسی بیضی پیروی می‌کند پیشنهاد نموده‌ایم که در فضای دوبعدی تنها یک ناحیه تشعشعی حداکثر تولید می‌نماید. درنهایت به منظور اعتبارسنجی کنکاش پیشنهادی، چند مثال از آرایه FDA متقارن غیریکنواخت شبیه‌سازی و مورد بحث واقع شده است.

کلید واژه‌ها: آنتن مارپیچی باند وسیع، آشکارسازی تومور، افت برگشتی، ضریب همبستگی، تاخیر گروه.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر رهیافت‌های جدیدی به منظور هدایت بیم آرایه آنتن، ارائه شده است. جاروب الکترونیکی بیم آنتن با فن‌آوری چندگانگی فرکانس یا FDA[1] یکی از روش‌های فوق می‌باشد. ایده اولیه آرایه FDA، نشات گرفته از آرایه آنتن با مدولاسیون زمانی است که توسط H. E. Shanks در سال ۱۹۶۱ معرفی شد [۱]. 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 نموده‌اند. بدین ترتیب، یک روش جاروب الکترونیکی بدون استفاده از تغییردهنده فاز بنیان نهاده شد. با توجه به پیشرفت‌های جدید در پردازش سیگنال‌های دیجیتال، استفاده از گوناگونی فرکانس در تئوری آرایه‌ها جلب توجه بیشتری نمود. Antonik و همکارانش در سال ۲۰۰۶ ساختار کلی آرایه آنتن با گوناگونی فرکانسی را معرفی نمودند [۲]. آن‌ها نشان دادند درحالتی که عناصر آرایه با اختلاف اندک فرکانسی نسبت به هم تحریک شوند، الگوی تشعشعی به‌دست‌آمده وابسته به فاصله هدف از آنتن، زاویه و زمان است. بدین ترتیب، با تحریک مذکور، الگوی تشعشعی متناسب با آرایش فرکانس‌های تحریک، تغییر و ایجاد زاویه جاروب ظاهری می‌نماید. متعاقب آن با توجه به ویژگی منحصر به فرد FDA یعنی جاروب الگو بدون نیاز به تغییردهنده فاز، تحقیقات زیادی انجام شده که روند آن در مرجع [۳] گزارش شده است.

یکی از کاربری‌های مدنظر برای FDA، تمرکز انرژی الکترومغناطیسی در یک ناحیه از فضا است. در این زمینه تحقیقات جدیدی انجام شده است. مبنای تحقیقات مذکور بر دو محور استفاده از جابه‌جایی فرکانس غیرخطی و تقارن درچیدمان دوآرایه مشابه می‌باشد. در این مقاله پس از توصیف FDA رایج، یک FDA با توزیع غیرخطی فرکانس جابه‌جایی، ارائه شده است که تغییر فرکانس جابه‌جایی دارای رفتار غیرخطی براساس هندسه بیضی می‌باشد. این رفتار مزایایی خاصی به آرایه می‌دهد که ویژگی‌های آن بررسی می‌گردد. در نهایت، جهت تمرکز انرژی در یک ناحیه منطبق بر محور تراز آرایه، FDA متقارن با ساختار فرکانس جابه‌جایی غیریکنواخت مبتنی بر هندسه بیضی معرفی و مورد بحث واقع می‌شود.

۲- معرفی FDA رایج

آرایه FDA، یک مفهوم تازه و جدید جاروب الکترونیکی است که عناصر آن مطابق شکل (۱) می‌توانند با شکل موج‌های مشابه یا

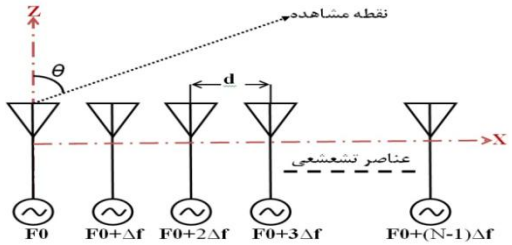
* نویسنده پاسخگو: mohseni@mut.ac.ir

1- Frequency Diverse Array

متفاوت تحریک شوند. مهمترین تفاوت FDA با سایر آرایه‌ها آن است که مقدار اندکی افزایش فرکانس نسبت به فرکانس حامل در طول عناصر آرایه به‌جای اختلاف فاز به‌کار می‌رود. استفاده از افزایش فرکانس در طول آرایه، تولید الگوی تشعشعی میدان دوری می‌نماید که تابعی از فاصله، زمان و زاویه است. 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 مشکلات افزایش حجم محاسبات گردد، ولی از نقطه‌نظر کاربری، منجر به کشف چند هدف به طور همزمان در فواصل مختلف می‌شود. ضریب آرایه در آرایه آنتن معمولی با N عنصر تشعشعی مطابق رابطه ذیل قابل حصول است.

$$AF = \frac{sin\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \qquad \psi = \frac{2\pi}{\lambda} dsin\theta \qquad (۱)$$

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



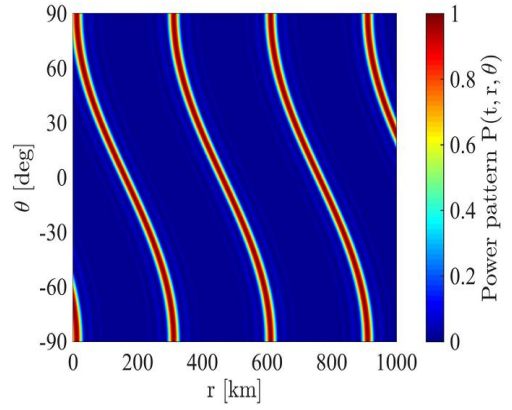
شکل (۱): چیدمان عناصر در آرایه با چندگانگی فرکانس که فرکانس هر عنصر به اندازه Δf نسبت به عنصر ماقبل افزایش یافته است.

حال‌اگر شکل موج تشعشع‌شده مطابق شکل (۱) از هر عنصر آرایه مشابه بوده و افزایش فرکانس به میزان Δf هرتز در طول عناصر به‌کار می رود. اختلاف فاز ناشی از طول مسیر بین دو عنصر متوالی از رابطه $\Delta\Psi = kdsin\theta_a$ به‌دست می‌آید. در این حالت می‌توان ثابت نمود درچنین آرایه‌ای جهت حداکثر گلبرگ اصلی در راستای زاویه ظاهری θ_a است [۲].

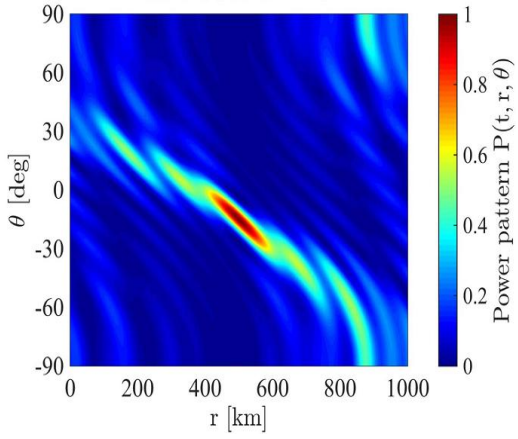
$$\theta_a = \arcsin\left\{\frac{f_0 sin\theta}{f} - \frac{\Delta f sin\theta}{f} + \frac{\Delta f R_0}{fd}\right\} \qquad (۲)$$

در آرایه FDA، راستای بیم اصلی مطابق رابطه (۲) تابعی متناوب از فاصله، زمان و زاویه است. بیشترین وزن در روند تحقیقاتی آرایه‌های FDA، آرایش فرکانس‌های تحریک یا جابه‌جایی براساس الگوهای خاص ریاضی بوده که تاکنون الگوهای متفاوت زیادی در مراجع بیان شده است [۵-۴]. نتایج تمام آرایش‌های ارائه‌شده، الگوی تشعشعی است که مطابق شکل (۲) در فضای دوبعدی از چندین ناحیه پیوسته یا گسسته با بهره حداکثر برخوردار است.

از آن‌جا که یکی از اهداف FDA، تمرکز انرژی الکترومغناطیسی در یک ناحیه از فضا است. در این زمینه تحقیقات جدیدی انجام شده که عمده آن‌ها بر دو محور استوار است. اولین محور، استفاده از فرکانس جابه‌جایی غیریکنواخت بوده که به عنوان مثال مرجع [۷]، غیریکنواختی از نوع لگاریتمی را پیشنهاد نموده است. از معایب روش مذکور، پیچیدگی تولید فرکانس غیریکنواخت از لحاظ سخت‌افزاری و پیچیدگی محاسباتی در تمرکز انرژی در محور تراز[۲] آرایه است. محور دوم، جهت تمرکز انرژی مطابق شکل (۳) استفاده از آرایه متقارن است [۸-۴]. مطابق شکل مذکور آرایه متقارن همان آرایه معمولی است ولی جابه‌جایی فرکانس عناصر آرایه نسبت به عنصر مرکزی آرایه به طور قرینه انجام می‌شود. در حقیقت آرایه متقارن ترکیب دو آرایه معمولی با شیفت فرکانسی قرینه هم است.



(الف)

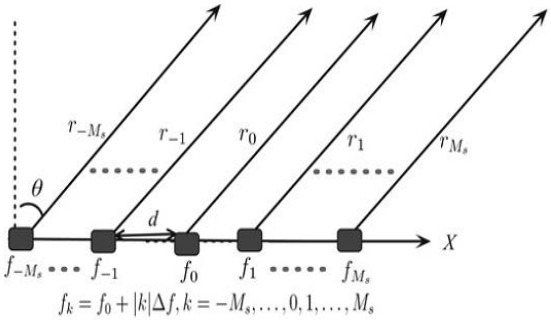


(ب)

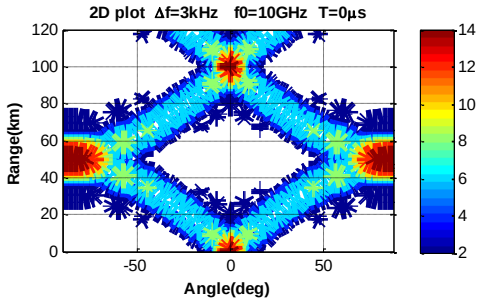
شکل (۲): الگوی تشعشعی FDA با تعداد ده عنصر در فرکانس مرکزی ۵ گیگاهرتز و فاصله بین عناصر به اندازه نیم طول موج [۶]
الف) آرایش فرکانس جابه‌جایی یا $\Delta f = 1kHz$ از نوع افزایش خطی
ب) آرایش فرکانس جابجایی از نوع لگاریتمی

2- Boresight

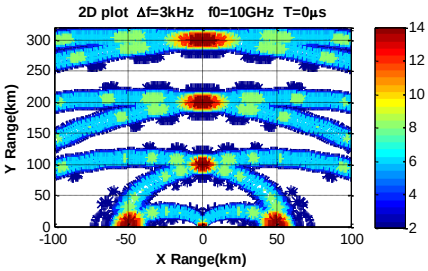
شکل (۴) الگوی تشعشعی شبیه‌سازی‌شده و الهام‌گرفته از مرجع [۴] را نشان می‌دهد. مطابق این شکل اگرچه انرژی در ناحیه‌ای از فضا متمرکز شده است ولی این نواحی برحسب فاصله تکرارپذیر است. دلیل این موضوع آن است که الگوی تشعشعی دو آرایه قرینه هم متناوب بوده که در نواحی محور تراز آنتن رفتار تمرکزی وتناوبی از خود نشان می‌دهد. با توجه به این‌که هدف نهایی، دسترسی به یک ناحیه تمرکز انرژی در محور آنتن است (تک نقطه)، بایستی از آرایه یک دوطرفه با آرایش جابه‌جایی فرکانس غیریکنواخت استفاده نمود.



شکل (۳): ساختار آرایه FDA متقارن [۴]



(الف)



(ب)

شکل (۴): الگوی تشعشعی دوبعدی آرایه FDA متقارن با جابجایی خطی فرکانس و N=15 و f0=10GHz و $\Delta f = 3kHz$

الف)فضای زاویه و فاصله ب)فضای فاصله عمودی و افقی

۳- طراحی و تحلیل آرایه FDA

همان‌طورکه ذکر شد، عناصر FDA توسط سیگنال‌هایی با اختلاف فرکانسی Δf، مطابق شکل (۱) تحریک می.شوند. الگوی تشعشعی آرایه متاثر از آرایش فرکانسی تحریک عناصر است. آرایش رایج، تحریک فرکانسی بگونه خطی، یعنی افزایش اندک فرکانس نسبت به عنصر مجاور، است.

۳-۱- توصیف آرایه FDA رایج

فرکانس تحریک عنصر mام در آرایش خطی (FDA رایج) از رابطه زیر به‌دست می آید:

$$f_m = f_0 + (m-1)\Delta f; \quad m = 0,1,\ldots,M-1 \qquad (۳)$$

که در آن، f_0 فرکانس حامل آرایه FDA و M تعداد عناصر آرایه است. با درنظرگرفتن نقطه مشاهده در میدان دور در فاصله R_0 که در زاویه شعاعی θ و فاصله r نسبت به عنصر اول آرایه قرار دارد، فاصله آن از عنصر mام را می‌توان به صورت تقریبی مطابق رابطه (۴) به‌دست آورد:

$$r_m = r - md\sin\theta; \quad m = 0,1,\ldots,M-1 \qquad (۴)$$

که در آن، d فاصله بین عناصر می‌باشد. با درنظرگرفتن عنصر اول به‌عنوان مرجع، الگوی تشعشعی آرایه FDA مطابق رابطه (۵) قابل محاسبه است [۴]:

$$p(f,t,R_0,\theta) = \sum_{m=0}^{M-1}\frac{a_m}{R_0}e^{-j2\pi\left(f_m t-\frac{R_m}{\lambda_m}\right)} \cong \left[\frac{\exp(j\emptyset_0)}{R_0}\right]\frac{\sin\left[\pi M\left(\Delta ft-\frac{\Delta fR_0}{c}-\frac{d\sin\theta}{\lambda_0}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\Delta ft-\frac{\Delta fR_0}{c}-\frac{d\sin\theta}{\lambda_0}\right)\right]} \qquad (۵)$$

که در آن، $\emptyset_0 = -2\pi f_0\left(t-\frac{R_0}{c}\right)$ درنظر گرفته شده است. واضح است که جمله اول داخل پرانتز ضریب آرایه فازی رایج می‌باشد. بقیه جملات دارای اهمیت است زیرا نشان می‌دهد که اختلاف فاز به فاصله، ضریب جابه‌جایی فرکانس و زمان وابسته است. الگوی تشعشعی برای یک زاویه مفروض در فاصله متناوب بوده و قله‌های آن به فاصله $\frac{c_0}{\Delta f}$ از یکدیگر قرار دارند. در حالت خاص، اگر افزایش فرکانس یعنی $\Delta f = 0$ گردد، مطابق رابطه ذیل، الگوی تشعشعی آرایه فازی رایج یعنی الگوی وابسته به زاویه حاصل می‌گردد.

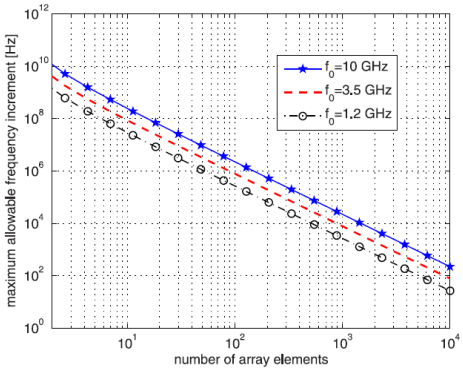
$$|p(f,t,R_0,\theta)| \cong \frac{\sin\left[\pi M\left(\frac{d\sin\theta}{\lambda_0}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\frac{d\sin\theta}{\lambda_0}\right)\right]} \qquad (۶)$$

رابطه (۶)، دقیقاً ضریب آرایه برای آرایه فازی رایج است که به دفعات در مقالات پردازش سیگنال آرایه ظاهر شده است. با توجه به این‌که مقدار جابه‌جایی فرکانس بسیار اندک است، در رابطه (۵) اگر، $(M-1)\Delta f \ll f_0$ برقرار باشد، آن‌گاه $m^2\Delta fd\sin\theta/c_0$ تقریباً با $m\Delta fd\sin\theta/c_0$ برابر خواهد بود. به منظور بررسی تقریب فوق، رابطه تجربی ذیل پیشنهاد شده است [۵]:

$$\frac{m^2\Delta fd\sin\theta}{c_0} - \frac{m\Delta fd\sin\theta}{c_0} \leq \frac{\pi}{4} \qquad (۷)$$

در شکل (۵)، حداکثر مقدار مجاز افزایش فرکانس برحسب

تابعی از تعداد عناصر آرایه در فرکانس‌های $f_0 = 10\ GHz$ (باند X)، $f_0 = 3.5\ GHz$ (باند S) و $f_0 = 1.2\ GHz$ (باند L)، با فرض زاویه شعاعی برابر $\theta = \pi/3$ و فاصله بین عناصر برابر نصف طول موج، نشان داده شده است. اعداد معرفی‌شده، فرکانس‌های حامل نمونه در سیستم‌های راداری رایج امروزی می باشند. ملاحظه می‌شود که این تقریب یک تقریب قابل قبول عملی در سامانه آرایه چندگانگی فرکانس می‌باشد.



شکل (۵): حداکثر مقدار افزایش فرکانس جابه‌جایی برحسب تعداد عناصر آرایه

مطابق مطالب پیش گفته، روابط (۵) و(۶) وابستگی الگوی تشعشعی به زمان، فاصله و زاویه را نشان می‌دهد. در آرایه، آنتن مبتنی بر چندگانگی فرکانس، می‌توان فرکانس‌های متفاوتی را با الگوهای مختلف، به یکایک عناصر آرایه اختصاص داد و عناصر آرایه در آرایش‌های متفاوت تحریک نمود. در نتیجه، الگوی تشعشعی، خواص متفاوتی نسبت به FDA رایج خواهد داشت. در بخش بعد، آرایه FDA مبتنی بر چندگانگی فرکانس تحریک غیریکنواخت منبعث از اصول بیضی، مورد بحث واقع می‌شود.

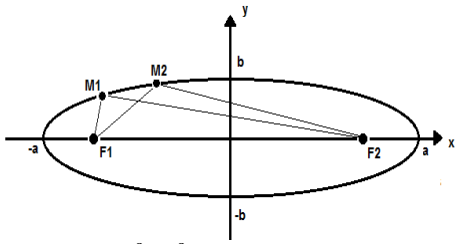
۳-۲- توصیف آرایه FDA با فرکانس جابه‌جایی غیریکنواخت مبتنی بر هندسه بیضی

در این حالت، آرایه FDA خطی با M عنصر، مطابق شکل (۱) درنظر گرفته می‌شود که عناصر آن به فاصله مساوی d از یکدیگر قرار گرفته‌اند. آرایه پالس‌های به عرض T و زمان تکرار پالس T_r ارسال می‌کند. این طرح مشابه FDA رایج بوده با این تفاوت که اختلاف فرکانسی بین عناصر به صورت غیریکنواخت می‌باشد. به عبارت دقیق‌تر، اختلاف فرکانسی به اندازه Δf_m، بین عنصر mام و فرکانس حامل مرجع f_0 برقرار است. در این حالت فرکانس عنصر mام برابر $f_m = f_0 + \Delta f_m$ فرض می‌شود که Δf_m فرکانس جابه‌جایی هر عنصر با عنصر دیگر غیریکنواخت بوده و تابع رابطه غیرخطی براساس هندسه بیضی می‌باشد. در این حالت هم همه عناصر در فاز همسان تحریک می‌شوند.

Δf_m مولد فرکانس جابه‌جایی نامیده شده که ادامه به محاسبه مقدار آن پرداخته می‌شود. در FDA رایج، فرکانس جابه‌جایی به‌صورت یکنواخت افزایش می‌یابد واختلاف فرکانسی افزایشی به اندازه Δf بین هر دو عنصر مجاور برقرار است، یعنی $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$. با توجه به این‌که تصاعد حسابی بین فرکانس عناصر برقرار است، لذا رابطه (۸) بین فرکانس عناصر صادق است. برای سادگی در نوشتن روابط مقدار M، زوج فرض می‌شود.

$$f_0 + f_{M-1} = f_1 + f_{M-2} = \cdots = f_k + f_{M-k-1} = 2f_0 + (M-1)\Delta f \qquad (۸)$$

حال روشی مطرح می‌گردد که رابطه (۸) در آن برقرار بوده ولی توزیع فرکانس جابه‌جایی به‌صورت غیریکنواخت باشد. برای این منظور، از روابط حاکم بر بیضی بهره‌برداری می‌گردد. با توجه به آن‌که مجموع فواصل هر نقطه روی محیط بیضی از دو نقطه ثابت به‌نام کانون، همواره ثابت است. از این ویژگی بیضی می‌توان به‌عنوان ضرایب فرکانس جابه‌جایی بین عناصر آرایه بهره جست. این موضوع در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): بیضی با معادله $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$ در دستگاه مختصات مرجع xoy

با توجه به شکل (۶) می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} M_1F_1 + M_1F_2 = 2a \\ M_2F_1 + M_2F_2 = 2a \\ \cdots \\ M_NF_1 + M_NF_2 = 2a \end{cases} \qquad (۹)$$

از روابط فوق، می‌توان به نحوه اختصاص‌دادن فرکانس جابه‌جایی به عناصر آرایه استفاده نمود. یعنی برای یک آرایه خطی Mتایی، می‌توان M نقطه روی محیط بیضی انتخاب نموده و فاصله آن‌ها را تا کانون محاسبه کرده و به‌عنوان ضریب فرکانس جابه‌جایی آرایه‌ها مورد استفاده قرار داد. به عبارت دقیق‌تر، با توجه به شکل (۶)، فاصله نقاط تا کانون‌های F1 و F2 محاسبه شده و پس از نرمالیزه‌کردن به عنوان فرکانس جابه‌جایی به M عنصر آرایه خطی اعمال می‌شود. یعنی،

$$(M_1F_1, M_2F_1, \ldots\ldots\ldots\ M_2F_2, M_1F_2)\Delta f_n \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، جهت هم‌خوانی با آرایه FDA معمولی مقدار Δf_n به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که $2a = (M-1)\,\Delta f$ رابطه (۸) برقرار باشد. به منظور انتخاب نقاط M_m شکل (۶) روی محیط

بیضی بایستی ابتدا نقاط متناظر (x_m, y_m) مشخص شود. در این مقاله، مقادیر x_m با استفاده از توزیع کسینوسی با استفاده از رابطه ذیل انتخاب می‌شود. اگرچه استفاده از توزیع‌های دیگر هم خللی در کل مسئله ایجاد نمی‌نماید.

$$x_m = a\cos\left(\frac{m}{M-1}\pi\right) \quad m = 0,1,2,3,\dots\dots M-1 \qquad (۱۱)$$

با توجه به رابطه، $c^2 = a^2 - b^2$ می‌توان نوشت:

$$M_mF_1 = \left(a + \frac{c}{a}x_m\right) \rightarrow$$
$$\Delta f_m = \Delta f_n\left(a + \frac{c}{a}x_m\right)$$
$$= \frac{(M-1)\Delta f}{M_1F_1}\left(a + \frac{c}{a}x_m\right)$$
$$= \Delta f_n\left(a + c\cos\left(\frac{m}{M-1}\pi\right)\right) \qquad (۱۲)$$

بنابراین، عبارت الگوی تشعشعی $p(f,t,R_0,\theta)$ برابر خواهد بود با:

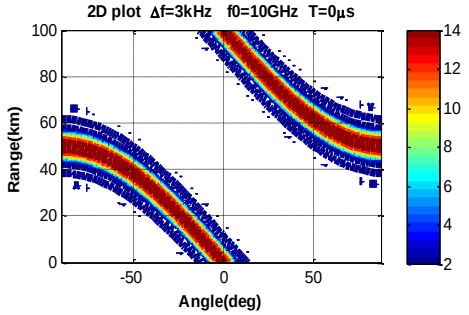
$$p(f,t,R_0,\theta) = \sum_{m=0}^{M-1}\frac{a_m}{R_0}\sum_{m=0}^{M-1}\frac{a_m}{R_0}e^{-j2\pi f_m\left(t-\frac{R_m}{c}\right)} =$$
$$\sum_{m=0}^{N-1}\frac{a_m}{R_0}e^{-j2\pi(f_0+\Delta f_n(a+c\cos\left(\frac{m}{M-1}\pi\right)))\left(t-\frac{R_m}{c}\right)} \qquad (۱۳)$$

که در آن، $R_m = R_0 + md\sin\theta$ است. در این‌جا، با توجه به نوع انتخاب Δf_m که از نوع غیرخطی برمبنای هندسه بیضی است، الگوی تشعشعی نسبت به فاصله، تناوبی نیست و فقط در یک ناحیه هندسی خاص حداکثر می‌شود.

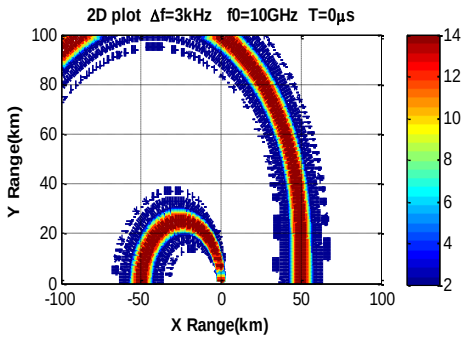
۴- شبیه‌سازی و صحت آزمایی

به منظور اطمینان از صحت نتایج، از ساختار مرجع [۴] جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. بدین لحاظ، یک آرایه با تعداد ۱۵ عنصر همسان‌گرد که فاصله بین عناصر نیم طول موج بیشترین فرکانس تحریک است، با فرکانس مرکزی ۱۰ گیگاهرتز انتخاب شده است. شکل (۷) الگوی تشعشعی آرایه یک‌طرفه با چندگانگی فرکانس خطی در دو مختصات فاصله‌ای xy و مختصات فاصله- زاویه را برای $\Delta f = 3KHz$ با حداکثر فرکانس جابه‌جایی در عنصر پانزدهم به اندازه 42KHz را نشان می دهد. مطابق شکل (۷) ضریب آرایه نسبت به فاصله، تکرارپذیر است و فاصله تناوب در حوزه فاصله به اندازه $\frac{c}{\Delta f} = 100km$ می‌باشد. حال اگر از این ساختار به‌صورت متقارن مطابق شکل (۳) استفاده شود، الگوی تشعشعی مطابق شکل (۴) حاصل می‌شود که اگرچه انرژی را در محور تراز آنتن متمرکز نموده است ولی نقاط تمرکز متناوب بوده و فاصله بین آن‌ها ۱۰۰ km است.

همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، به منظور تمرکز انرژی، یا حذف تناوب نقاط با بهره حداکثر در الگوی تشعشعی، فرکانس جابه‌جایی عناصر آرایه بایستی غیریکنواخت باشد. در ادامه شبیه‌سازی‌ها، از آرایش غیریکنواخت چندگانگی فرکانس مبتنی‌بر هندسه بیضی معرفی‌شده در بخش قبل استفاده می‌شود. بدین لحاظ، ابتدا یک ساختار یک‌طرفه مطابق شکل (۱) با ۱۵ عنصر همسان‌گرد که فاصله بین عناصر، نیم طول موج فرکانس تحریک عنصر پانزدهم است، درنظر گرفته می‌شود. جهت هم‌خوانی با شبیه‌سازی آرایه خطی، فرکانس جابه‌جایی عنصر پانزدهم همانند آرایه فوق یعنی ۴۲ کیلوهرتز انتخاب شده است. ولی آرایش فرکانس‌های سایر عناصر غیریکنواخت مبتنی بر روابط بخش قبل است.



(الف)

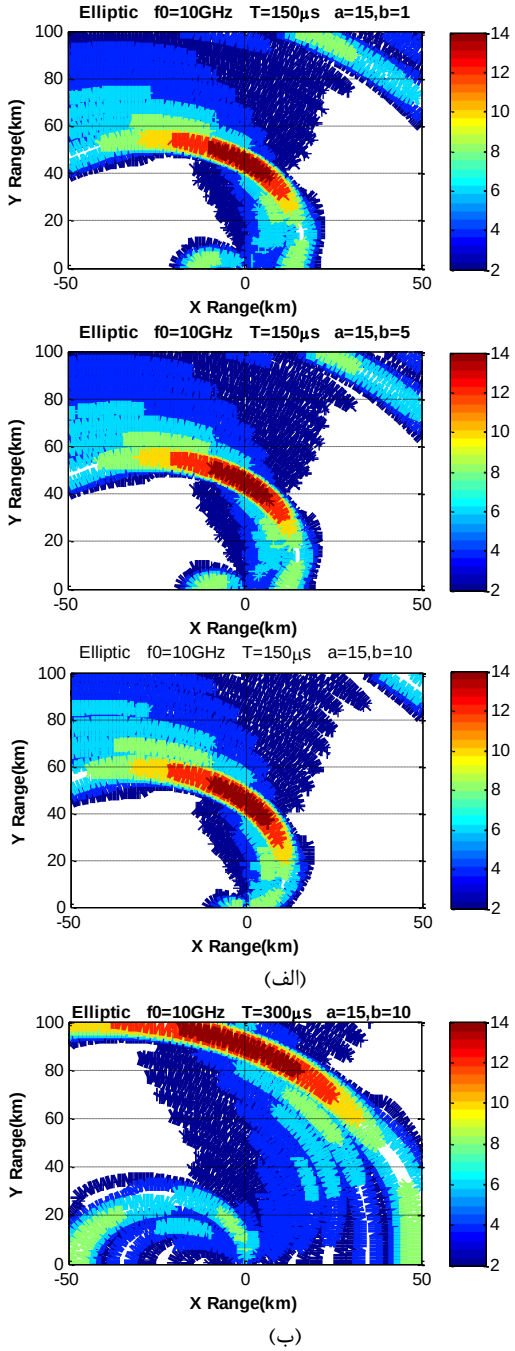


(ب)

شکل (۷): الگوی تشعشعی آرایه با چندگانگی فرکانس یک طرفه ۱۵ عنصره با افزایش فرکانس خطی
الف) فضای زاویه و فاصله ب) فضای فاصله عمودی و افقی

شکل (۸) الگوی تشعشعی آرایه مذکور را برای سه نوع بیضی با اقطار متفاوت (a=15,b=10-a=15,b=5,a=15,b=1) در زمان‌های مشاهده ۱۵۰ و ۳۰۰ μsec را نشان می‌دهد. از بررسی الگوهای شکل (۸) نتایج ذیل قابل مشاهده است. اول آن‌که جابه‌جایی غیریکنواخت فرکانس تحریک، تناوبی‌بودن الگو را حذف می‌کند. این بدان معنی است که انرژی الکترومغناطیسی در یک ناحیه با شکل هندسی غیرمنظم متمرکز شده است. دوم آن‌که سطح تمرکز انرژی با افزایش زمان مشاهده افزایش می‌یابد. سوم آن‌که اقطار بیضی در شکل الگو تاثیر آن‌چنانی ندارد. چهارم آن‌که ساختار جابه‌جایی مبتنی‌بر هندسه بیضی، باعث شده است که محور تراز آنتن به ازای تمام زمان‌های مشاهده، در ناحیه تمرکز انرژی واقع شود. درحالی‌که آرایش‌های غیرخطی دیگر اگرچه تمرکز انرژی در یک ناحیه ایجاد می‌کند ولی ممکن است این

ناحیه برحسب زمان از محور تراز آرایه خارج شود [۷]. خاصیت چهارم که باعث شده است که محور تراز آنتن همیشه در ناحیه تمرکز انرژی قرار گیرد، این نکته را در ذهن متبادر می‌سازد که چنان‌چه آرایه متقارن گردد، تمرکز انرژی، در محور تراز آنتن تک نقطه‌ای با سطح هندسی منظم است.



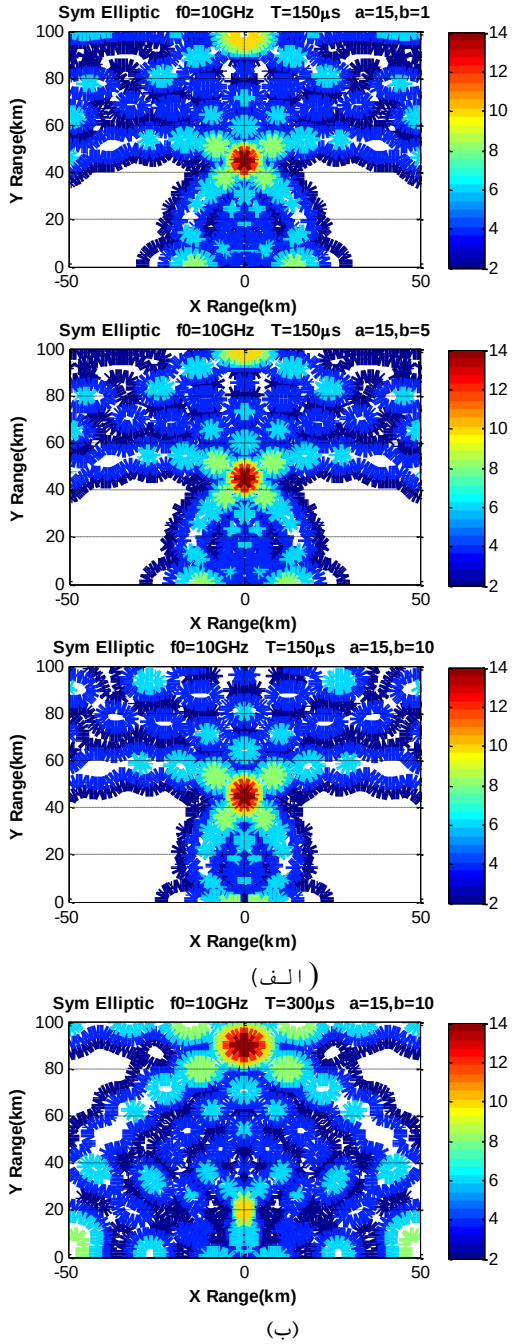
(الف)

(ب)

شکل (۸): الگوی تشعشعی آرایه با چندگانگی فرکانس یک طرفه ۱۵ عنصره با افزایش فرکانس غیر خطی مبتنی بر هندسه بیضی با سه نوع قطر (a=15,b=10-a=15,b=5,a=15,b=1) در دو زمان مشاهده

الف) ۱۵۰ µsec ب) ۳۰۰ µsec

به‌منظور تمرکز انرژی تک‌نقطه‌ای از آرایه متقارن مطابق شکل (۳) با تحریک یک‌نواخت مبتنی‌بر هندسه بیضی استفاده می‌شود. همان‌طورکه انتظار می‌رفت، قرینه‌سازی عناصر باعث تمرکز انرژی نقطه‌ای در محور تراز آرایه می‌شود. ورودهای شبیه‌سازی همان مثال بخش قبل یعنی یک آرایه ۱۵ عنصره متقارن در فرکانس مرکزی 10GHz است.



(الف)

(ب)

شکل (۹): الگوی تشعشعی تک‌نقطه‌ای آرایه با چندگانگی فرکانس متقارن ۱۵ عنصره با افزایش فرکانس غیرخطی مبتنی‌بر هندسه بیضی به سه نوع قطر (a=15,b=10-a=15,b=5,a=15,b=1) در دو زمان مشاهده

الف) ۱۵۰ µsec ب) ۳۰۰ µsec

شکل (۹) الگوی تشعشعی آرایه متقارن مذکور را برای سه نوع

بیضی با اقطار متفاوت (a=15,b=10-a=15,b=5,a=15,b=1) در زمان‌های مشاهده ۱۵۰ و ۳۰۰ μsec را نشان می‌دهد. مطابق الگوهای شکل (۹) مشاهده می‌شود که در هر زمان مشاهده فقط انرژی در یک نقطه متمرکز شده است و آن نقطه دقیقاً منطبق بر محور تراز آرایه آنتن است. درضمن، ناحیه تمرکز از یک شکل هندسی منظم برخوردار است. بدین لحاظ، هدف نهایی که تمرکز انرژی در محور تراز آرایه به‌صورت تک‌نقطه‌ای می‌باشد، محقق گشته است.

۵- نتیجه گیری

الگوی تشعشعی آرایه FDA ضمن تناوب، تابع زمان، فاصله و زاویه است. چنان‌چه آرایه FDA متقارن شود، بدین مفهوم که تساوی در فرکانس تحریک عناصر قرینه، نسبت به عنصر وسط برقرار باشد، الگوی تشعشعی دارای نواحی متمرکز انرژی (بهره حداکثر) روی محور تراز آرایه با مشخصه تکرارپذیری خواهد بود. با آرایش‌های غیریکنواخت فرکانس تحریک عناصر آرایه، می‌توان تناوب نواحی بیشینه انرژی الگو را حذف نمود. در این حالت با استفاده از بهینه‌سازی آرایش فرکانس تحریک عناصر آرایه، توانمندی تمرکز انرژی در یک یا چند نقطه از فضا حتی خارج از محور تراز حاصل می‌شود. اما کنترل و تعیین نقطه تمرکز انرژی برحسب زمان بسیار مشکل و گاهاً امکان‌ناپذیر است. در این مقاله، یک نوع آرایش غیرخطی فرکانس تحریک، مبتنی بر هندسه بیضی، معرفی گردید که بیشینه مقدار الگوی تشعشعی در محور تراز آنتن واقع می‌شود. ویژگی آرایش فرکانسی مذکور، سادگی پیاده‌سازی و تمرکز انرژی در یک نقطه روی محور تراز است. استفاده از آرایش تحریک عناصر پیشنهادشده در یک ساختار متقارن، باعث تمرکز انرژی تک‌نقطه‌ای دقیقاً روی محور تراز آنتن شده است. بدین لحاظ، کنترل و تعیین موقعیت نقطه تمرکز برخلاف ره‌یافت‌های دیگر باز قابلیت تحقق‌پذیری بیشتری برخوردار است. در نهایت، ترکیب سه حالت متصور برای بیضی، معرفی و شبیه‌سازی شد و ثابت گردید که با استفاده از آرایه متقارن FDA با فرکانس تحریک غیریکنواخت مبتنی‌بر هندسه بیضی، می‌توان یک ساختار متمرکزکننده انرژی الکترومغناطیسی تحقق پذیر روی محور تراز آنتن پیاده‌سازی نمود.

۶- مراجع

[1] H. Shanks, "A new technique for electronic scanning," IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 9, no. 2, pp. 162-166, March 1961.

[2] 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.

[3] S. H. Mohseni Armaki, M. Askari, and M. Fallah, "Radiation Pattern Analysis of Frequency Diverse Array Based on Square Frequency Modulated Continuous Wave," Journal of Radar, vol. 3, pp. 25-34, 2015. (In Persian)

[4] W. Q. Wang, "Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications," In IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 10, no. 6, pp. 1001-1012, 2016.

[5] 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.

[6] A. M. Yao, W. Wu, and D. G. Fang, "Frequency Diverse Array Antenna Using Time-Modulated Optimized Frequency Offset to Obtain Time-Invariant Spatial Fine Focusing Beam pattern," In IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 10, pp. 4434-4446, Oct. 2016.

[7] W. Khan, I. M. Qureshi, A. Basit, and W. Khan, "Range-Bins-Based MIMO Frequency Diverse Array Radar with Logarithmic Frequency Offset," In IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 885-888, 2016.

[8] H. Shao, J. Dai, J. Xiong, H. Chen, and W. Q. Wang, "Dot-Shaped Range-Angle Beam pattern Synthesis for Frequency Diverse Array," In IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 1703-1706, 2016.

Journal of Applied Electromagnetics
Vol. 4, No. 1, 2016 (Serial No. 10)

Single Dot-Shaped Radiation Pattern Using Frequency Diverse

S. Rastgar Kisomi, S. H. Mohseni Armaki*, A. J. Rashidi, M. Fallah

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 08/06/2017, Accepted: 26/09/2017)

Abstract

Frequency diverse array (FDA) is a new antenna array concept that is different from phased-array which offers range independent beam pattern. FDA using linearly increasing tiny frequency increment yields an S-shaped range-angle radiation pattern. This enables the array beam to scan without the need for phase shifters or mechanical steering. It is possible to apply different frequencies with different patterns to the elements of FDA to achieve different radiation pattern. However, the FDA transmit beam pattern is coupled in range and angle dimensions. It has been shown that the beam pattern of this form of FDA is range-angle-dependent, and it exhibits maxima at multiple range values. In this paper, we propose a single dot-shaped beam pattern analysis using symmetrical FDA with non-uniform inter-element frequency offset called elliptic-FDA. To validate the proposed approach, simulation example of non-uniformly elliptic based exited symmetrical FDA are reported and discussed.

Keywords: Frequency Diverse Array, Range-Dependent Beam Pattern, Dot-Shaped Beam Pattern, Symmetrical FDA

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