

طراحی و سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت در آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپ با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

ناصر منتصری^{۱*}، یعقوب قانع قره‌باغ^۲

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه شاهد ۲- عضو هیئت علمی، دانشگاه امام حسین

(دریافت: ۹۵/۱۱/۰۳؛ پذیرش: ۹۶/۰۸/۲۹)

چکیده

در این مقاله طراحی، سنتز و شبیه‌سازی آرایه خطی ۱۲ المانی از آنتن مایکرواستریپ با الگوی تشعشی مجذور کسکانت در فرکانس ۹/۸ GHz بررسی شده است. آنتن شامل سه زیر لایه مایکرواستریپ می‌باشد که دو زیر لایه پایینی شبکه تغذیه و زیر لایه بالایی، پچ‌های تشعشی می‌باشند که از طریق شیار در صفحه زمین، تحریک شده‌اند. یکی از مهمترین مزایای این آنتن دامنه قطبش متقاطع کمتر از ۵۰ dB- می‌باشد که به خاطر حذف تشعشات ناشی از شبکه تغذیه می‌باشد. برای سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن اثر تزویج متقابل المان‌ها استفاده شده است. در این روش، دامنه و فاز میدان‌های ناحیه دور هریک از المان‌ها با در نظر گرفتن اثر تزویج محاسبه و در بهینه‌سازی قرار داده شده‌اند. متناسب با دامنه و فازهای محاسبه شده از الگوریتم ژنتیک، شبکه تغذیه طراحی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، درستی تمامی مراحل طراحی و سنتز را اثبات می‌کند.

واژگان کلیدی

آنتن مایکرواستریپ، الگوی تشعشی مجذور کسکانت، الگوریتم ژنتیک (GA)، شبکه تغذیه

۱- مقدمه

کمترین نوسان نسبت به منحنی ایده‌آل، بهینه‌سازی و حاصل می‌گردد. در [۶] و [۷] با تغییر و بهینه‌سازی سطح مقطع آنتن شیپوری، روش طراحی الگوی تشعشی مجذور کسکانت ارائه گردیده است. یکی دیگر از روش‌های ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت، آنتن‌های آرایه‌ای است که در [۸] و [۹] بررسی شده است.

الگوی تشعشی مجذور کسکانت برای سیستم‌های برد بلند با بهره بالا در زاویه دید افقی و بهره کم در زاویه دید عمودی کاربرد می‌باشد [۱۰]. شکل (۱) موقعیت هدف (هواپیما) و رادار را نشان می‌دهد. از طرفی در معادله رادار توان برگشتی از هدف (P_r) به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 R^4} \quad (1)$$

که در آن، P_t توان ارسالی، G بهره آنتن، λ طول موج، σ سطح مقطع راداری هدف و R فاصله هدف از رادار می‌باشد. با توجه به شکل (۱)، اگر هدف در ارتفاع ثابت h به رادار نزدیک شود، فاصله هدف از رادار به صورت رابطه $R = h \cdot \csc(\theta)$ ساده می‌شود. بنابراین با ثابت در نظر گرفتن P_t ، λ و σ در معادله رادار، اگر بهره آنتن متناسب با $\csc^2(\theta)$ شود، توان دریافتی در

در سیستم‌های مدرن امروزی، تابه‌های شکل داده شده^۱ دارای اهمیت زیادی در ماهواره‌ها و رادارهای نظامی می‌باشند. الگوی تشعشی مجذور کسکانت^۲، نوعی تابه شکل داده شده می‌باشد که عموماً در رادارهای هوا برد^۳ و رادارهای جستجوگر زمینی استفاده می‌شود [۱]. برای ایجاد تابه مجذور کسکانت، انواع مختلفی از آنتن‌ها (آرایه‌ای، رفلکتوری و شیپوری) به کار گرفته می‌شوند. یکی از روش‌های اولیه و مرسوم برای ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت، آنتن‌های رفلکتوری بوده است. در [۲]-[۴] با تغییر شکل رفلکتور و روش‌های بهینه‌سازی، منحنی مناسب جهت ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت محاسبه گردیده است. اخیراً از روش بهینه‌سازی IWO^۴ برای سنتز منحنی رفلکتور در ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت استفاده شده است [۵]. در این روش، الگوی تشعشی مجذور کسکانت با

* نویسنده مسئول: n.montaseri@shahed.ac.ir

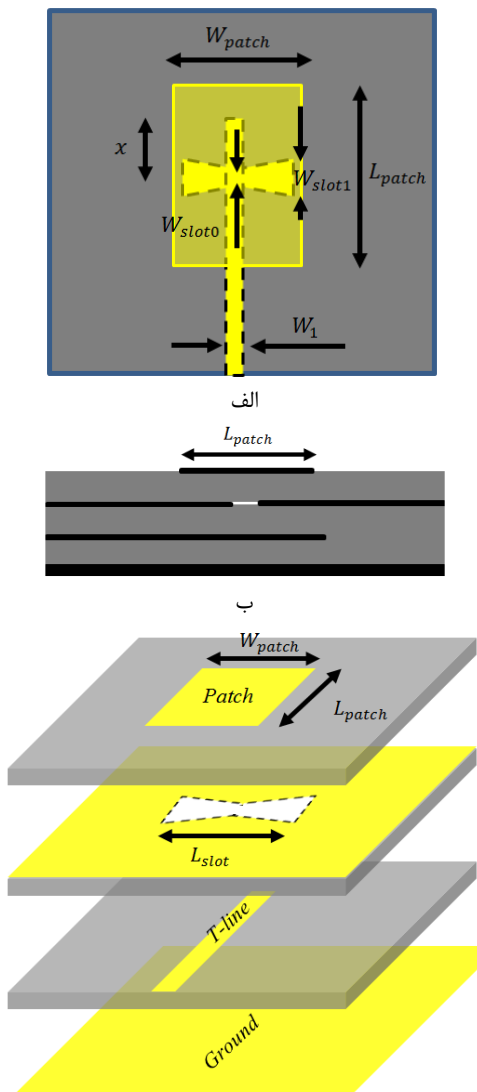
- 1- Shaped Beams
- 2- Cosecant Square Pattern
- 3- Airborne
- 4- Invasive Weed Optimization (IWO)

۲- آنتن و آرایه

به منظور طراحی و سنتز آنتن، ابتدا در این قسمت تک المان میکرواستریپ طراحی و شبیه سازی شده است. سپس مراحل سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت در برد بلند و زاویه کم نسبت به افق و در برد کوتاه و زاویه زیاد نسبت به افق به ترتیب بهره زیاد و کمی دارد. در نتیجه، توان دریافتی گیرنده رادار را به ازای زوایای مختلف (و در نتیجه بردهای کوتاه و بلند) یکنواخت توزیع می کند. این یکنواختی توان دریافتی در گیرنده رادار سبب کاهش محدوده دینامیکی^۱ می شود.

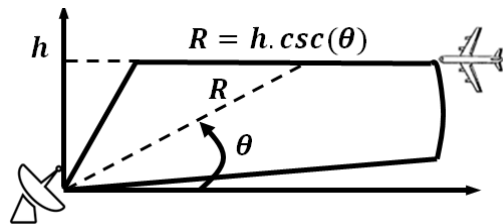
۲-۱- طراحی المان میکرواستریپ از آنتن آرایه‌ای

به منظور ایجاد الگوی تشعشی با قطبش متقاطع کم، آنتن میکرواستریپ به صورت سه لایه طراحی شده است [۲۰]. در شکل (۲)، ساختار ارائه شده برای تک سلول آنتن نشان داده شده است. هر سه لایه میکرواستریپ از زیرلایه Rogers RO4003 با ضریب نفوذپذیری الکتریکی $\epsilon_r = 3.38$ ، ضریب تلفات $\tan \delta = 0.0027$ و با ضخامت 0.813 mm انتخاب شده‌اند. همچنین در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای تک سلول آنتن مشخص شده‌اند.



شکل (۲): تک سلول آنتن با سه لایه میکرواستریپ

رادار ثابت می ماند. به همین جهت، در طول آشکارسازی سیگنال در مسیر پرواز هواپیما، سیگنال دریافتی در ارتفاع ثابت با برد مختلف به صورت یکنواخت به گیرنده رادار می رسد. در واقع، الگوی تشعشی مجذور کسکانت در برد بلند و زاویه کم نسبت به افق و در برد کوتاه و زاویه زیاد نسبت به افق به ترتیب بهره زیاد و کمی دارد. در نتیجه، توان دریافتی گیرنده رادار را به ازای زوایای مختلف (و در نتیجه بردهای کوتاه و بلند) یکنواخت توزیع می کند. این یکنواختی توان دریافتی در گیرنده رادار سبب کاهش محدوده دینامیکی^۱ می شود.

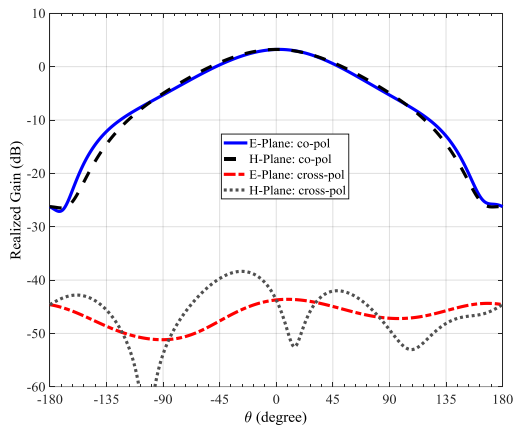


شکل (۱): موقعیت هواپیما (به عنوان هدف) و آنتن رادار

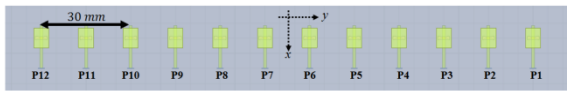
در سنتز الگوهای تشعشی شکل داده شده مثل مجذور کسکانت، لازم است از روش بهینه سازی مناسبی برای محاسبه دامنه و فاز المان های آرایه استفاده شود. در سال های اخیر از روش های مختلف بهینه سازی مثل الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) و ازدحام ذرات^۳ (PSO) برای سنتز الگوهای تشعشی بسیار به کار گرفته شده است [۱۴-۱۱]. دو روش PSO و GA تا حدودی شبیه هم هستند. به بیان دیگر، در هر دو روش جستجوگر از یک نقطه (از جمعیت اولیه) به نقطه ای دیگر حرکت می کند ولی روش GA نسبت به PSO دارای توانایی بهتر در حل مسائل غیرخطی و سیستم های مهندسی پیچیده را دارد. همین قابلیت باعث پیچیده تر شدن ابزار GA و در نتیجه کاهش سرعت آن نسبت به PSO شده است [۱۵].

آنتن های آرایه ای برای ایجاد الگوی تشعشی شکل داده شده بسیار به کار گرفته شده اند. در صورتی که از آنتن آرایه ای استفاده شود، بین المان های آرایه تزویج متقابل بوجود می آید. در مقاله های [۱۶-۱۹] تزویج متقابل بین المان های آرایه که در الگوی تشعشی تاثیر گذار است، نشان داده شده است. به صورت خلاصه می توان گفت در این مقاله، سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت آرایه خطی میکرواستریپ با در نظر گرفتن تزویج متقابل بین المان ها بررسی شده و با توجه به دقت بالای روش بهینه سازی GA، از آن برای سنتز الگوی تشعشی به کار گرفته شده است.

- 1- Dynamic Range
- 2- Genetic Algorithm (GA)
- 3- Particle Swarm Optimization (PSO)



شکل (۵): الگوی تشعشی قطبش‌های همسو و متقاطع تک عنصر



شکل (۶): آرایه خطی آنتن مایکرواستریپ با ۱۲ المان

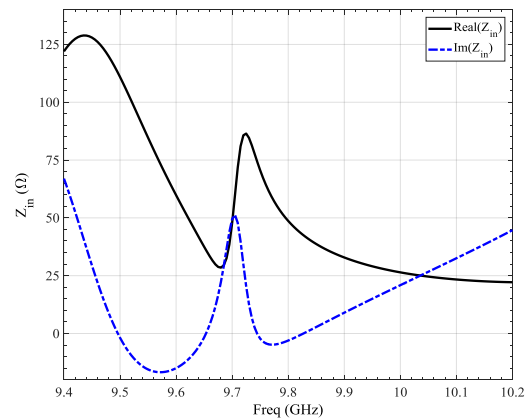
۲-۲- آرایه خطی مایکرواستریپ

برای ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت، به آرایه خطی از آنتن مایکرواستریپ نیاز است. در آنتن‌های آرایه‌ای به ازای طول ثابت مجموعه آرایه، هرچه تعداد المان‌های آرایه بیشتر باشد الگوی تشعشی مطلوب راحت‌تر حاصل می‌گردد. از طرفی، به خاطر تزویج متقابل بین المان‌های آرایه نمی‌توان تعداد المان‌ها را افزایش داد زیرا فاصله کم المان‌ها از یکدیگر سبب افزایش تزویج متقابل می‌شود و در نتیجه طراحی پیچیده می‌گردد. به عنوان مثال، به ازای طول ۱۸ cm در فرکانس ۹/۸ GHz، برای داشتن حداقل تزویج بین المان‌ها و داشتن بیشترین تعداد المان، می‌توان فاصله بین المان‌ها را حدود نیم طول موج فضای آزاد (۱۵ mm) در نظر گرفت. در این صورت، تعداد المان به ازای طول مذکور ۱۲ عدد می‌شود. در صورتی که فاصله المان‌ها افزایش یابد (مثلاً ۹ المان به فاصله ۲۰ mm از یکدیگر)، به خاطر به‌وجود آمدن گلبرگ‌های بزرگ^۱، رسیدن به پرتوی مجذور کسکانت مطلوب امکان‌پذیر نخواهد بود. در صورتی که تعداد المان‌ها را ۱۵ عدد (به فاصله ۱۲ mm از یکدیگر) در نظر گرفته شود، تزویج متقابل بین المان‌ها سبب افزایش تلفات بازگشتی و در نتیجه، کاهش راندمان کل در آنتن می‌شود. با توجه به دلایل گفته‌شده، در این مقاله تعداد المان‌ها ۱۲ عدد و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۱۵ mm منظور شده است (شکل (۶)). در عمل، تزویج متقابل ناچیز بین هر ۱۲ آرایه باعث می‌شود، دامنه و فاز میدان‌های ناحیه دور آنتن تغییر

جدول (۱): پارامترهای تک سلول آنتن مایکرواستریپ (mm)

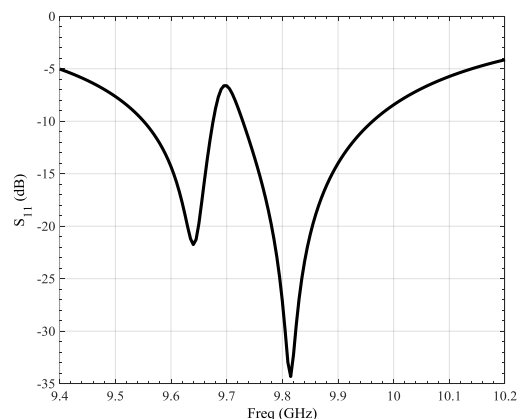
W_{patch}	L_{patch}	W_{slot0}	W_{slot1}	L_{slot}	x	W_1
۵	۶/۵	۰/۸	۱/۱	۴	۴/۱	۰/۹۵

خط انتقال مایکرواستریپ، میدان الکتریکی را در شیار زیر پیچ ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی جریان سطحی را روی پیچ مایکرواستریپ تزویج می‌کند. در واقع، صفحه زمین که شامل شیار می‌باشد، همانند یک مبدل امپدانس عمل می‌کند. در شکل (۳)، نمودارهای حقیقی و موهومی امپدانس ورودی آنتن شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار HFSS نشان داده شده است. امپدانس ورودی آنتن در فرکانس ۹/۸ GHz حدوداً ۵۰ ohm می‌باشد. همچنین در شکل (۴)، نمودار S_{11} (dB) آنتن به ازای مرجع امپدانس ۵۰ ohm نشان داده شده است. روشن است که در بازه فرکانسی ۹/۷۵ GHz تا ۹/۹ GHz، $S_{11} < -12$ dB است.



شکل (۳): امپدانس ورودی آنتن

شکل (۵) الگوهای تشعشی آنتن در دو صفحه E و H برای هر دو قطبش را نشان می‌دهد. نتیجه الگوی تشعشی نشان می‌دهد که آنتن دارای میزان قطبش متقاطع مطلوبی است. همچنین در شکل (۶) آرایه خطی از ۱۲ المان نشان داده شده است.

شکل (۴): نمودار S_{11} (dB) آنتن تک عنصر به ازای امپدانس مرجع

۵۰ ohm

۳- سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت با الگوریتم ژنتیک

به منظور سنتز الگوی تشعشی مورد نیاز، در این قسمت ابتدا مختصری از روش بهینه‌سازی ارائه گردیده است. سپس تابع هدف و نحوه رسیدن به الگوی تشعشی بررسی شده است.

۳-۱- آشنایی با الگوریتم ژنتیک

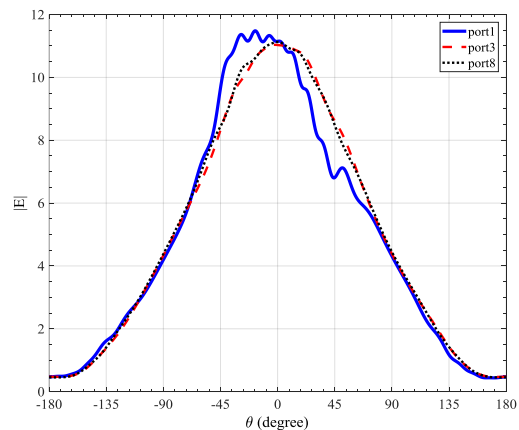
الگوریتم ژنتیک، نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی تکاملی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند [۲۱]. از مزایای این الگوریتم این است که در حداقل محلی متوقف نمی‌شود اما اصولاً الگوریتم کندی محسوب می‌شود. از GA به منظور بهینه‌سازی آنتن بازتابنده شکل داده‌شده با تابه کانتوری برای پوشش کشور ژاپن استفاده شده است [۲۲]. در این روش، شکل سطح آنتن با یکسری نقاط کنترل می‌شود که این نقاط را به عنوان ژن در GA در نظر می‌گیرند و مجموعه کامل این ژن‌ها تشکیل یک کروموزوم می‌دهد که به عنوان یک المان جمعیت در نظر گرفته می‌شود. در [۲۳] مثالی دیگر از کاربرد GA در بهینه‌سازی مسائل تابه کانتوری ارائه شده است. لازم به ذکر است در [۲۳] از بسط ویولت میدان دور، برای سنتز آنتن بازتابنده با تغذیه آرایه‌ای برای پوشش اروپا استفاده شده است.

۳-۲- تعریف تابع در الگوریتم ژنتیک

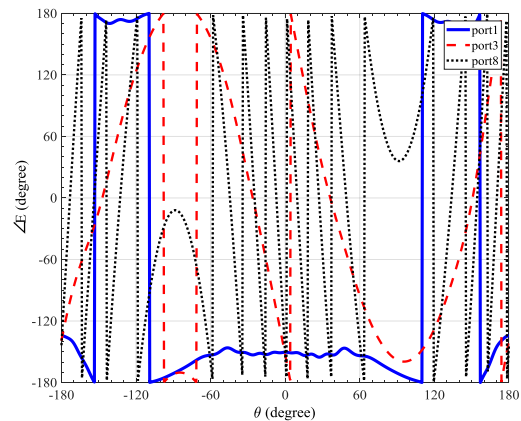
پس از طراحی آنتن آرایه خطی ۱۲ المانی، باید دامنه و فاز تحریک هر یک از آرایه‌ها برای ایجاد الگوی تشعشی مجذور کسکانت در الگوریتم ژنتیک به نحوی تعریف گردند.

در GA، مولفه اصلی کروموزوم است که نمایانگر یک مسیر مناسب در فضای جستجو برای بهینه‌سازی تابع هدف می‌باشد. هر کروموزوم از ژن‌هایی تشکیل شده است. ژن‌ها نمایانگر پارامترهای تابع هستند که در این مساله تابع شامل ۲۴ پارامتر است (۱۲ دامنه و ۱۲ فاز). هر یک از متغیرهای تابع می‌بایست در یک بازه معلوم و قابل قبولی تعریف شوند. در این مقاله متغیرهای دامنه در بازه [۱۰-۱] و متغیرهای فاز در بازه [۰-۳۶۰] درجه تعریف شده‌اند. در نتیجه، این محدودیت بازه‌ای برای متغیرها، الگوریتم ژنتیک به دنبال مقادیری از متغیرها در بازه تعریف شده‌شان می‌گردد. شکل (۸)، تابع هدف برای رسیدن به الگوی تشعشی مجذور کسکانت بهینه را نشان می‌دهد.

کند. برای افزایش دقت سنتز نیاز است که اثر تزویج متقابل در میدان‌های ناحیه دور المان‌ها در نظر گرفته شود. به همین دلیل، برای این که اثر تزویج متقابل لحاظ شود، کل آرایه با ۱۲ درگاه تحریک در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده است. در شکل (۷-الف) دامنه و (۷-ب) فاز میدان‌های ناحیه دور آنتن (بر حسب درجه) به ازای درگاه‌های ۱، ۳ و ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که میدان‌ها در صفحه YZ ($\varphi = 90^\circ$) اندازه‌گیری شده‌اند. اختلاف دامنه و فاز میدان‌های دور هر یک از درگاه‌ها به خاطر اثر تزویج بین آرایه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در هر یک از نمودارها، دامنه دیگر درگاه‌ها صفر در نظر گرفته شده است. برای سنتز الگوی تشعشی دامنه و فاز ناحیه دور آنتن به ازای تک تک درگاه‌ها محاسبه شده است. در بخش بعد با استفاده از روش بهینه‌سازی GA، میزان دامنه و فاز تحریک هر یک از المان‌ها (درگاه‌ها) محاسبه و الگوی تشعشی نهایی سنتز شده است.



الف

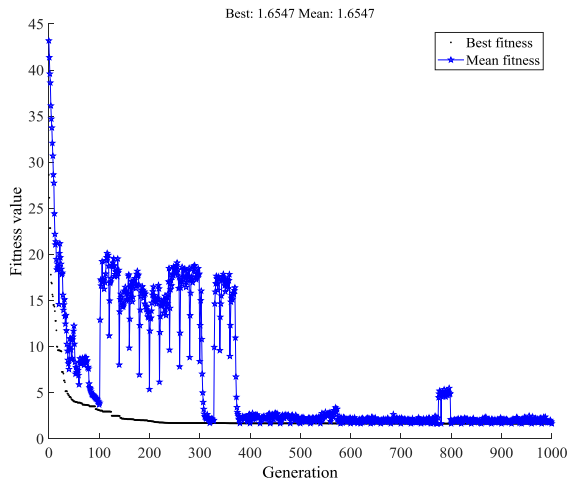


ب

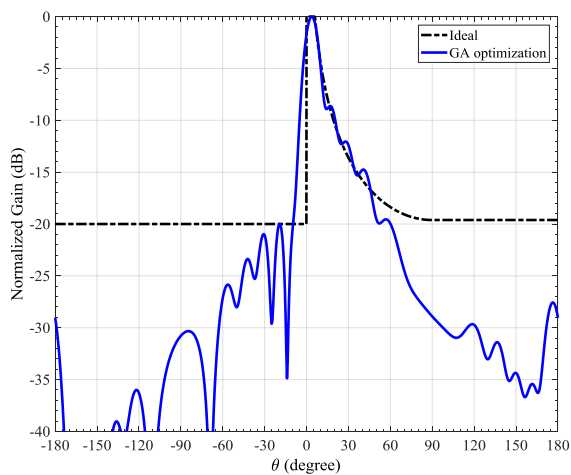
شکل (۷): الف) دامنه و ب) فاز آرایه خطی ۱۲ المانی به ازای تحریک درگاه‌های ۱، ۳ و ۸

$$Out = \sum_{i=1}^5 w_i Out_i = w_1 Out_1 + \dots + w_5 Out_5 \quad (۶)$$

این ضرایب با توجه به دقت مورد نیاز در بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. در این مقاله با توجه به اختلاف زاویه کم بین θ_0 و θ_1 ، Out_2 در بهینه‌سازی لحاظ نشده است (یعنی $w_2 = 0$). با توجه به این که شکل پرتوی مجذور کسکانت و حداقل میزان لوب‌های کناری بیشتر مورد تاکید است، ضرایب به صورت $w_4 = 2$ ، $w_3 = 0.5$ و $w_1 = w_5 = 1$ در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۹)، نمودار همگرایی متغیرها (دامنه و فاز تحریک هریک از درگاه‌ها) در بهینه‌سازی GA نشان داده شده است.

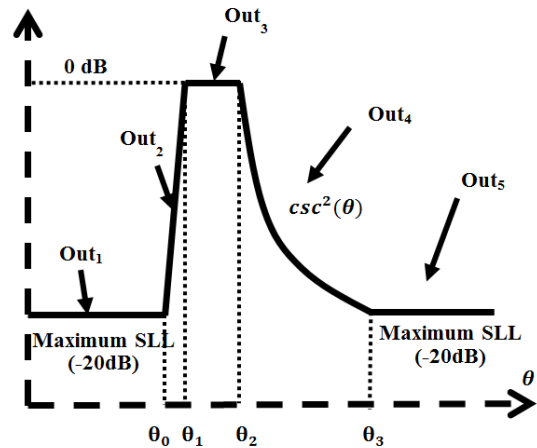


شکل (۹): نمودارهای همگرایی پارامترهای بهینه‌سازی در GA



شکل (۱۰): نمودارهای الگوی تشعشی مجذور کسکانت در حالت ایده‌آل و بهینه‌سازی شده با الگوریتم ژنتیک

در شکل (۱۰)، الگوی تشعشی مجذور کسکانت در دو حالت ایده‌آل و بهینه‌سازی شده با GA نشان داده شده است. منحنی



شکل (۸): تابع هدف برای رسیدن به الگوی تشعشی مجذور کسکانت

تابع هدف شامل ۵ قسمت $Out_1, Out_2, Out_3, Out_4, Out_5$ می‌باشد که ورودی تابع مورد نظر برای بهینه‌سازی، میدان‌های ناحیه دور آنتن به ازای هریک از المان‌ها است. پارامترهای خروجی الگوریتم پس از بهینه‌سازی، ۱۲ دامنه و ۱۲ فاز درگاه‌ها می‌باشند. در انتهای بهینه‌سازی الگوی تشعشی بهینه نیز محاسبه شده است. در بهینه‌سازی، برای رسیدن به الگوی تشعشی مورد نظر بایستی پنج تابع (Out_5 تا Out_1) حداقل شوند. در معادلات زیر شرایط دلخواه در هر بازه زاویه‌ای و تابع هدف نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، برای داشتن الگوی تشعشی مناسب در بازه $(-180^\circ, \theta_0)$ ، باید بهره آنتن کمتر از SLL1 مورد نظر باشد. به همین جهت، تابعی که برای این حالت باید حداقل شود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$-180^\circ < \theta < \theta_0 : Gain(\theta) \leq -SLL_1 \Rightarrow Out_1 = \max(Gain(\theta) - SLL_1) \quad (۲)$$

به همین صورت، روابط لازم برای حداقل کردن دیگر بازه‌های زاویه‌ای به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_1 < \theta < \theta_2 : -1dB \leq Gain(\theta) \leq 0dB \Rightarrow Out_3 = \max(-1dB - Gain(\theta)) \quad (۳)$$

$$\theta_2 < \theta < \theta_3 : Gain(\theta) \cong csc^2(\theta) \Rightarrow Out_4 = |Gain(\theta) - csc^2(\theta)| \quad (۴)$$

$$\theta_3 < \theta < 180^\circ : Gain(\theta) \leq -SLL_2 \Rightarrow Out_5 = \max(Gain(\theta) - SLL_2) \quad (۵)$$

در این جا، GA تنها یک تابع را حداقل می‌کند. بنابراین با جمع ۵ تابع، تابع کلی که بایستی حداقل شود، حاصل می‌شود. می‌توان برای بهینه‌سازی در زوایای مختلف از وزن‌دهی توابع استفاده کرد. در معادله زیر w_i ($i=1, \dots, 5$) ضرایب وزن‌دهی در هر بازه زاویه‌ای برای بهینه‌سازی هستند.

درگاه‌های آرایه در جدول (۲) آورده شده‌اند. همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است، مقادیر دامنه هریک از درگاه‌ها به صورت خطی افزایش یافته‌اند ولی تغییرات فاز درگاه‌ها تقریباً به صورت نمایی می‌باشد. لازم به ذکر است که نتیجه حاصل از بهینه‌سازی به صورت گردشده در جدول (۲) قرار داده شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی، در مرحله بعد شبکه تغذیه متناسب با جدول (۲) طراحی شده است.

جدول (۲): مقادیر دامنه و فاز به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک

شماره درگاه (i)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
$ a_i $	۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
$\angle (a_i)_{deg}$	۰	۰	۰	۰	۱۰	۲۰	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۸۰	۱۵۰

طراحی اولیه شبکه تغذیه در نرم‌افزار ADS، برای دقت بیشتر از نرم‌افزار HFSS استفاده شده است. در این مرحله ابعاد اولیه طراحی را از ADS به HFSS منتقل می‌کنیم و با تغییر پارامترها شبکه تغذیه را بهینه‌سازی می‌کنیم.

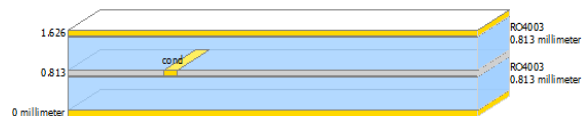
شکل (۱۲)، شبکه تغذیه نهایی با نسبت‌های توان هریک از تقسیم‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، عرض خطوط انتقال طراحی شده برای هر تقسیم‌کننده توان نیز به شکل اضافه شده است. برای تطبیق خطوط انتقال از روش tapering استفاده شده است به گونه‌ای که خطوط انتقال قبل و بعد از تقسیم‌کننده‌های توان به خط انتقال ۵۰ Ohm (با عرض ۰/۹۵ mm) به صورت تپ‌شده متصل گردیده‌اند. با تنظیم طول خطوط انتقال در شبکه تغذیه (خطوط ۵۰ Ohm)، اختلاف فازهای مورد نیاز حاصل گردیده است. در شکل (۱۳)، نمودار تلفات بازگشتی شبکه تغذیه (S_{00}) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که درگاه‌های ۱ تا ۱۲ به امپدانس ۵۰ Ohm ختم شده‌اند و در فرکانس ۹/۸ GHz، $S_{00} < -17$ dB می‌باشد.

در طراحی شبکه تغذیه بایستی مقادیر $|S_{i,0}/S_{1,0}|^2$ به ازای $i=1,2, \dots, 12$ برابر با مقادیر دامنه a_i به‌دست‌آمده از GA باشد. در شکل (۱۴)، برخی از این مقادیر در پهنای باند فرکانسی ۹/۷ GHz تا ۹/۹ GHz نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۲)، برای تنظیم فاز خروجی طول خطوط انتقال در برخی از تقسیم‌کننده‌ها به صورت مارپیچ طراحی شده‌اند.

بهینه‌سازی شده در بازه زاویه‌ای $\theta_2 = 6^\circ$ تا $\theta_3 = 50^\circ$ دارای تطابق خوبی با منحنی ایده‌آل دارد. رابطه‌های (۵-۲) نشان می‌دهند که هرچه دامنه گلب‌رگ‌های فرعی در این دو بازه کمتر باشد، تابع بهینه‌تر است. به همین جهت، در دو بازه زاویه‌ای $[-180^\circ - \theta_0]$ مربوط به رابطه (۲) و $[180^\circ - \theta_3]$ مربوط به رابطه (۵) دامنه گلب‌رگ‌های فرعی بسیار کمتر از حداکثر SLL مجاز به‌دست آمده است. مقادیر دامنه و فاز تحریک هر یک از

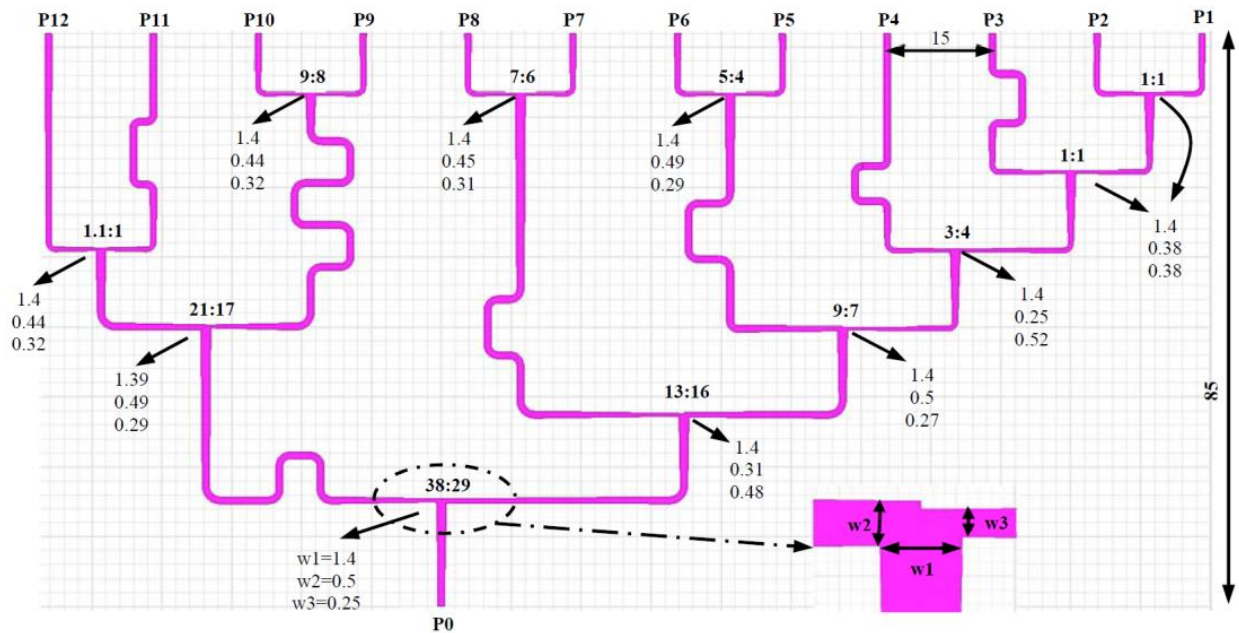
۴- طراحی و شبیه‌سازی شبکه تغذیه

پس از محاسبه دامنه و فاز مناسب برای هریک از آرایه‌ها، می‌بایست شبکه تغذیه مناسب طراحی گردد. در این قسمت طراحی شبکه تغذیه برای آرایه ۱۲ درگاهی آنتن بررسی شده است. به دلیل تعداد درگاه زیاد و زمان شبیه‌سازی طولانی، برای طراحی شبکه تغذیه ابتدا از نرم‌افزار ADS استفاده شده است. شکل (۱۱) خط Stripline را در نرم‌افزار ADS نشان می‌دهد که از دو زیرلایه RO4003 تشکیل شده است.

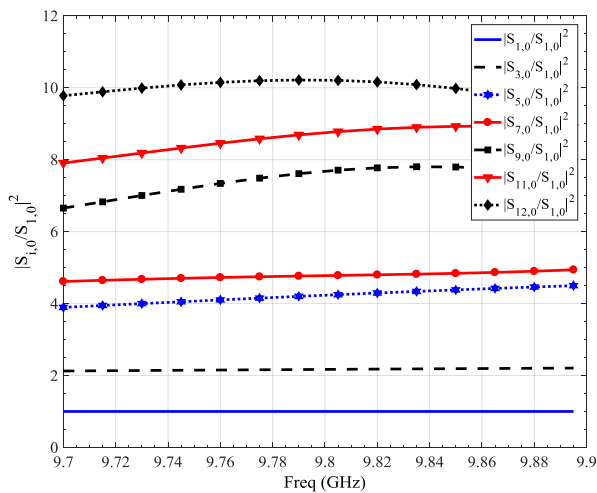


شکل (۱۱): خط انتقال شبکه تغذیه آنتن در نرم‌افزار ADS

برای رسیدن به مقادیر جدول (۲) از ۱۱ تقسیم‌کننده توان سه‌درگاهی استفاده شده است. لازم به ذکر است که همه تقسیم‌کننده‌های توان سه‌درگاهی متقارن (3dB) نیستند و برخی از آن‌ها با توجه به مقادیر دامنه در جدول (۲) به صورت نامتقارن طراحی شده‌اند. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار ADS روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به این‌که شبکه تغذیه دارای ابعاد بزرگی می‌باشد و از طرفی بین خطوط تغذیه در تقسیم‌کننده‌های توان، تزویج وجود دارد، روش Momentum Microwave به‌کار گرفته شده است. در کل شبکه تغذیه دارای ۱۱ تقسیم‌کننده توان ۱ به ۲ می‌باشد. پس از



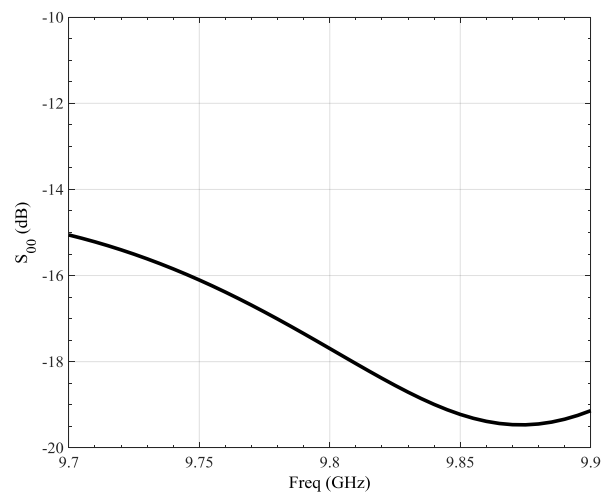
شکل (۱۲): شبکه تغذیه ورودی آنتن و ابعاد آن برحسب mm



شکل (۱۴): نمودار $|S_{i,0}/S_{1,0}|^2$ شبکه تغذیه آنتن به ازای

$$i = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 12$$

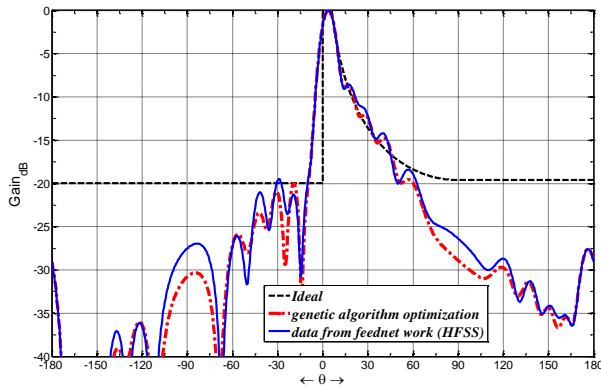
تشعشی نشان داده شده است: الگوی تشعشی مجذور کسکانت ایده‌آل، الگوی تشعشی مجذور کسکانت خروجی GA (براساس پارامترهای جدول (۲)) و الگوی تشعشی مجذور کسکانت به‌دست‌آمده از مقادیر خروجی شبکه تغذیه (براساس جدول (۳)) و اعمال شده به آرایه در نرم‌افزار HFSS. شکل (۱۶) نشان می‌دهد که تغییرات بسیار کمی بین الگوی تشعشی GA و شبکه تغذیه وجود دارد. بنابراین، می‌توان گفت که شبکه تغذیه طراحی شده برای آرایه ۱۲ درگاهی مناسب می‌باشد.



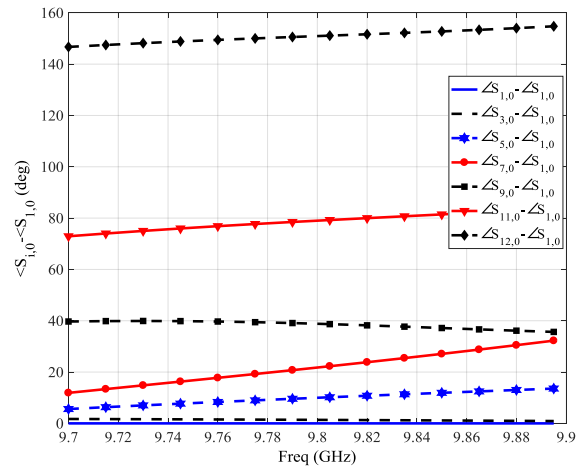
شکل (۱۳): نمودار $S_{0,0}$ شبکه تغذیه

در شکل (۱۵)، نمودار فازهای ۱۲ درگاه برحسب فاز خروجی درگاه ۱ $(\angle(S_{i,0} - S_{1,0})_{deg})$ به ازای $i = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 12$ نشان داده شده‌اند. در جدول (۳)، مقادیر دامنه و فاز به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی شبکه تغذیه نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به GA بسیار نزدیک می‌باشد.

نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی شبکه تغذیه کمی با نتایج به‌دست‌آمده از GA تفاوت دارد. به همین دلیل، این مقادیر به نرم‌افزار HFSS اعمال می‌شود. در شکل (۱۶)، سه الگوی



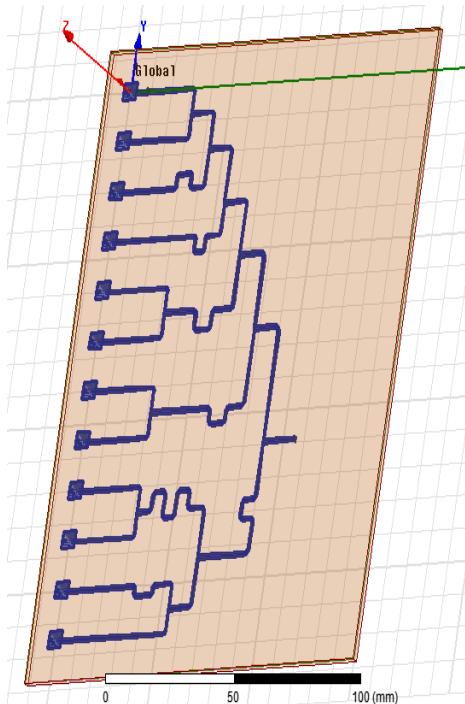
شکل (۱۶): نمودارهای الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در حالت ایده‌آل، الگوریتم ژنتیک و خروجی شبکه تغذیه



شکل (۱۵): نمودار $\langle S_{i,0} - S_{1,0} \rangle_{deg}$ شبکه تغذیه آنتن به ازای $i = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 12$

جدول (۳): مقادیر دامنه و فاز به دست آمده از شبیه‌سازی شبکه تغذیه

شماره درگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
$ S_{i,0}/S_{1,0} ^2$	۱	۱	۲/۲	۳/۸	۴/۲	۴/۲	۴/۸	۴/۸	۷/۷	۷/۷	۸/۷	۱۰/۲
$\langle (S_{i,0} - S_{1,0})_{deg} \rangle$	۰	۰	۱/۳	۲/۶	۱۰	۱۰	۲۲	۲۲	۴۰	۴۰	۷۹	۱۵۱

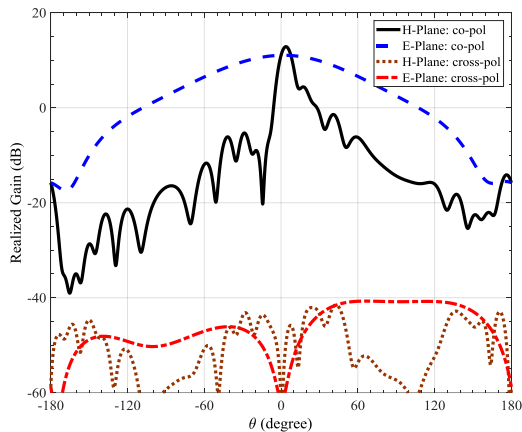


شکل (۱۷): ساختار کامل آرایه خطی میکرواستریپ ۱۲×۱

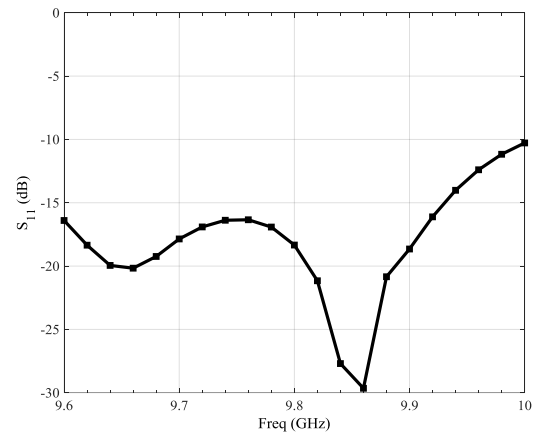
۵- شبیه‌سازی کل ساختار در نرم‌افزار HFSS

نرم‌افزار HFSS از روش عددی المان محدود برای محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌کند. به همین جهت و برای اطمینان کامل از طراحی و سنتز، کل ساختار آنتن به همراه شبکه تغذیه در دو نرم‌افزار (روش المان محدود در HFSS و روش معادله انتگرالی حوزه زمان در CST) شبیه‌سازی شده‌اند که با توجه به محدودیت‌های تجاری نرم‌افزارها، مقایسه آن‌ها در مقاله نشان داده نشده است. لازم به ذکر است که نمودارهای به دست آمده از نرم‌افزار HFSS با CST دارای تطابق خوبی می‌باشند.

در شکل (۱۷) کل آرایه خطی آنتن میکرواستریپ در نرم‌افزار HFSS نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمودار تلفات انعکاسی براساس مرجع امپدانس ۵۰ Ohm محاسبه شده است. در شکل (۱۸) نمودار S_{00} محاسبه شده آنتن در نرم‌افزار HFSS به ازای امپدانس مرجع ۵۰ Ohm نشان داده شده است.



شکل (۲۰): الگوی تشعشی قطبش‌های همسو و متقاطع

شکل (۱۸): نمودار S_{00} آنتن به ازای امپدانس ورودی 50Ω

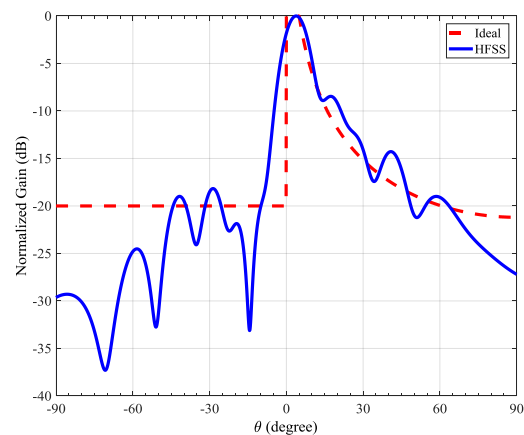
۶- نتیجه گیری

در این مقاله، برای رسیدن به الگوی تشعشی مجذور کسکانت در فرکانس مرکزی ۹/۸ GHz از آرایه خطی 1×12 استفاده شده است. برای حذف تشعشع ناخواسته از شبکه تغذیه و تحریک پیچ‌ها، آنتن به صورت سه‌لایه طراحی شده است که دو لایه زیری شبکه تغذیه (شامل خطوط انتقال) و لایه بالایی پیچ‌های میکرواستریپ می‌باشند. به‌خاطر حذف تشعشع ناخواسته از شبکه تغذیه و تحریک پیچ‌ها، دامنه قطبش متقاطع در تشعشع آنتن کمتر از -50 dB شده است. در ادامه برای سنتز الگوی تشعشی مجذور کسکانت از روش بهینه‌سازی GA استفاده شده است. برای افزایش دقت در سنتز آنتن، اثر تزویج بین آرایه‌ها نیز در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. هر چند GA نسبت به برخی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی (مثل PSO) کندتر می‌باشد، ولی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. در این مقاله نتایج به‌دست‌آمده از روش بهینه‌سازی GA با HFSS مقایسه شده است و دقت مراحل طی شده را اثبات می‌کند. همچنین، برای آرایه خطی با توجه به ضرایب تحریک به‌دست‌آمده از سنتز آرایه، شبکه تغذیه طراحی شده است. شبکه تغذیه طراحی شده دارای ۱۱ تقسیم‌کننده ۱ به ۲ می‌باشد که توزیع دامنه تحریک در آن صورت می‌گیرد. با افزایش و کاهش طول خطوط تغذیه، توزیع فاز تحریک نیز حاصل شده است. در نهایت، برای تصدیق تمامی مراحل سنتز و طراحی، آرایه خطی به همراه شبکه تغذیه به صورت کامل در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل‌شده از شبیه‌سازی با حالت ایده‌آل تطابق داشته و روش دستیابی به الگوی تشعشی مجذور کسکانت را اثبات می‌کنند.

۷- مراجع

- [1] M. J. Buckley, "Synthesis of shaped beam antenna patterns using implicitly constrained current

در شکل (۱۹)، الگوی تشعشی حاصل‌شده از شبیه‌سازی آنتن در نرم‌افزار HFSS و حالت ایده‌آل در فرکانس مرکزی ۹/۸ GHz با یکدیگر مقایسه شده‌اند. الگوی تشعشی شبیه‌سازی شده در بازه زاویه‌ای $\theta_2 = 6^\circ$ تا $\theta_2 = 50^\circ$ تطابق خوبی با حالت ایده‌آل $\cos^2(\theta)$ دارد. لازم به ذکر است که حداکثر بهره آنتن در نرم‌افزار HFSS حدوداً $11/6$ dB محاسبه‌شده ولی در شکل (۱۹) به‌خاطر مقایسه با حالت ایده‌آل، به صورت نرمالیزه‌شده نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱۹): مقایسه الگوی تشعشی آنتن در نرم‌افزار HFSS و حالت ایده‌آل در فرکانس ۹/۸ GHz

از مهمترین دستاوردهای این مقاله حداقل دامنه قطبش متقاطع میدان‌ها در ناحیه دور از آنتن نیز می‌باشد. به‌دلیل آن‌که ساختار به صورت سه‌لایه می‌باشد، خطوط تغذیه آنتن به فضای بیرونی تشعشی ندارند بنابراین، میزان قطبش متقاطع بسیار کم خواهد بود. در شکل (۲۰) الگوهای تشعشی قطبش همسو و متقاطع آنتن در دو صفحه E و H نشان داده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که دامنه قطبش متقاطع کمتر از -50 dB می‌باشد.

- [12] D. Kurup, M. Himdi, and A. Rydberg, "Synthesis of uniform amplitude unequally spaced antenna arrays using the differential algorithm," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, pp. 2210-2217, 2003.
- [13] D. Gies and Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization for reconfigurable phase differentiated array design," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 38, pp. 168-175, 2003.
- [14] D. W. Boeringer and D. H. Werner, "Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, pp. 771-779, 2004.
- [15] R. Hassan, B. Cohanin, and O. D. Weck, "A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, pp. 1-13, 2004.
- [16] I. J. Gupta and A. A. Ksienski, "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, pp. 785-791, 1983.
- [17] D. F. Kelley and W. L. Stutzman, "Array antenna pattern modelling method that includes mutual coupling effects," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, pp. 1625-1632, 1993.
- [18] P. Darwood, P. N. Fletcher, and G. S. Hilton, "Mutual coupling compensation in small planar array antennas," *IEEE Proc. Microw. Antennas Propagation*, vol. 145, no. 1, pp. 1-6, 1998.
- [19] A. Pirhadi, M. H. Rahmani, and A. Mallahzadeh, "Shaped beam array synthesis using particle swarm optimisation method with mutual coupling compensation and wideband feeding network," *IET, Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 8, pp. 549-555, 2014.
- [20] N. Montaseri and Y. Qaneh Qarehbagh, "Designing and Simulation of the Microstrip Antenna Array with Series Feed," *Journal of Radar*, vol. 4, no. 3, pp. 33-38, 2016.
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm.
- [22] M. Vall-llossera, J. M. Rius, N. Duffo, and A. Cardama, "Design of single-shaped reflector antennas for the synthesis of shaped contour beams using genetic algorithms," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, pp. 358-361, 2000.
- [23] F. Vipiana, G. Vecchi, and N. Sabbadini, "A multiresolution approach to contoured-beam antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, pp. 684-697, 2007.
- elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, pp. 192-197, 1996.
- [2] T. F. Carberry, "Analysis theory for the shaped-beam doubly curved reflector antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 17, pp. 131-138, 1969.
- [3] C. F. Winter, "Dual vertical beam properties of doubly curved reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, pp. 174-180, 1971.
- [4] A. Brunner, "Possibilities of dimensioning doubly curved reflectors for azimuth-search radar antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, pp. 52-57, 1971.
- [5] A. Dastranj, H. Abiri, and A. Mallahzadeh, "Design of a broadband cosecant squared pattern reflector antenna using IWO algorithm," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, pp. 3895-3900, 2013.
- [6] K. Sha, M. Suzuki, W. Nakata, and S. Adachi, "Design of E-plane cosecant square beam horn antennas based on ray theory and their radiation characteristics," *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, vol. 64, pp. 100-107, 1981.
- [7] K. Sha, K. Sato, M. Suzuki, and S. Adachi, "The design and radiation characteristics of dielectric loaded H-plane cosecant square beam horn antenna," *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, vol. 65, pp. 72-81, 1982.
- [8] H. Zhengxing and R. Yingzheng, "A method of csc 2 pattern synthesis for planar phased arrays," in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 479-482, 1985.
- [9] A. Chakraborty, B. Das, and G. S. Sanyal, "Determination of phase functions for a desired one-dimensional pattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, pp. 502-506, 1981.
- [10] X. M. Zhang, K. M. Luk, Q. F. Wu, T. Ying, X. Bai, and L. Pu, "Cosecant-square pattern synthesis with particle swarm optimization for non-uniformly spaced linear array antennas," in *Proc. of 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, pp. 193-196, 2008.
- [11] F. M. Ares, J. A. Rodriguez, E. Villanueva, et al, "Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array pattern," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, pp. 506-510, 1999.

Design and Synthesis of Cosecant-Squared Pattern in Microstrip Array Antenna using Genetic Algorithm Optimization

N. Montaseri*, Y. Qane Qarebagh

Shahed University

(Received: 22/01/2017, Accepted: 20/11/2017)

Abstract

In this paper, the design, synthesis, and simulation of 12 linear arrays of microstrip antenna is considered with cosecant squared pattern in 9.8 GHz. The structure involves 3 layers: the feed network has 2 bottom layers and the top layer is the microstrip patch excited by a slot. One of the advantages is low cross-polarization (less than -50 dB) that is due to removing the radiation fields of the feed network. For synthesis of cosecant squared pattern, the genetic algorithm method is used while the mutual coupling is considered. In this method, the far fields of each array are applied to the optimization. Proportional to the amplitudes and calculated phases by genetic algorithm, the feed network is designed. The simulation results verify the accuracy of design and synthesis.

Keywords: Microstrip Antenna, Cosecant-Squared Pattern, Genetic Algorithm (GA), Feed Network

* Corresponding author E-mail: n.montaseri@shahed.ac.ir