

Improvement and Optimization of Homogeneous Composite in Array Antennas using Convolutional Neural Network

Gohar Varamini^{1,2}, Assistant Professor, Behnam Dorostkar Yaghouti³, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering- Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran

²Chemical, Petroleum and Polymer Engineering Research Center- Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

³Department of Information and Communication Technology- Amin University, Tehran, Iran
gohar.varamini@iau.ac.ir, behnamdorostkar@gmail.com

Abstract

Antenna structure and performance, bandwidth, gain and guidance are the most important performance indicators. For this purpose, RL homogeneous transmission line is very important due to low loss, phase changes, frequency bandwidth, zero and negative order resonance, miniaturization and easy construction, and is very suitable in the design of broadband and array antennas. The right-left hand structure in the antennas due to the difference in the phase of the right part in the repetition of arrays and the thickness of the layer has phase delay and finally deviation of the radiation pattern. On the other hand, the blockage of the transmission line on the left causes bandwidth restriction and increasing the number of casualties in the system. In this paper, with the help of deep learning (DL), composite defects are solved and optimized arrayed antenna. The proposed antenna transmission line design in the range of 2-7 GHz, optimum resonance frequency of 4.5 GHz and convolution, dual resonance and spiral inductor neural algorithm are loaded onto the patch in four arrays. The use of convolutional neural network (CNN) in the left transmission line compensates for the right phase delay and finally enables optimal phase changes, correction of radiation pattern and continuous scanning of phase arrays. Also, by creating gaps in the microstrip patch, bandwidth limit is removed and the system losses are reduced. Secondary dimensions compared to the primary dimension are reduced to about 60% in size and miniature according to the smart modified model. The results of this improved composite showed an increase in bandwidth of 20.3 and the efficiency of the radiation pattern by more than 96%. On the other hand, small dimensions, appropriate frequency bandwidth and simple network design have been provided.

Keywords: array antenna, convolutional neural network, deep learning, homogeneous composite, micro-strip patch

Received: 9 June 2023

Revised: 4 August 2023

Accepted: 14 October 2023

Corresponding Author: Dr. Gohar Varamini

Citation: G. Varamini, B.D. Yaghouti, "Improvement and optimization of homogeneous composite in array antennas using convolutional neural network", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 17, no. 66, pp. 17-30, September 2026 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001>.....

مقاله پژوهشی

ارتقا و بهینه‌سازی کامپوزیت همگن در آنتن‌های آرایه‌ای با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن

گوهر ورامینی^{۱،۲}، استاد‌یار، بهنام درستکار یاقوتی^۳، استاد‌یار

۱- گروه مهندسی برق- واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران

۲- مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر- واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات-دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران، ایران

gohar.varamini@iau.ac.ir, behnamdorostkar@gmail.com

چکیده: ساختار و عملکرد آنتن‌ها، پهنای باند، بهره و هدایت مهمترین شاخص‌های عملکرد بشمار می‌آیند. برای این منظور خط انتقال همگن دست راست-چپ به دلیل تلفات کم، تغییرات فاز، پهنای باند فرکانس، رزونانس مرتبه صفر و منفی، مینیاتورسازی و ساخت آسان از اهمیت و جایگاه بالایی برخوردار و در طراحی آنتن پهن باند و آرایه ای بسیار مناسب است. ساختار دست راست-چپی در آنتن‌ها به دلیل تفاوت فاز بخش راست در تکرار آرایه‌ها و ضخامت لایه دچار تاخیر فاز و در نهایت انحراف الگوی تابشی است. از طرفی مسدود شدن خط انتقال در قسمت چپ باعث محدودیت پهنای باند و افزایش میزان تلفات سیستم می‌گردد. در این مقاله با کمک یادگیری عمیق نقایص کامپوزیت برطرف و بهینه‌سازی آنتن آرایه‌ای را شامل شده است. طراحی خط انتقال آنتن پیشنهادی در محدوده ۲ الی ۷ گیگاهرتز، فرکانس تشدید بهینه ۴/۵ گیگاهرتز و الگوریتم عصبی کانولوشن، رزونانس دوگانه و سلف مارپیچی در چهار آرایه بر روی پیچ بارگذاری شده است. استفاده از شبکه عصبی پیچشی در خط انتقال چپ، تاخیر فاز سمت راست را جبران و در نهایت تغییرات فاز بهینه و اصلاح الگوی تابشی و اسکن مداوم آرایه‌های فازی را مقدور می‌سازد. همچنین با ایجاد شکاف در پیچ میکرواستریپ محدودیت پهنای باند برطرف و تلفات سیستم کاهش می‌یابد. ابعاد ثانویه نسبت به بعد اولیه با توجه به مدل اصلاح شده هوشمند تا حدود ۶۰ درصد کاهش سایز و مینیاتورسازی صورت می‌گیرد. نتایج این کامپوزیت ارتقا یافته نشان دهنده افزایش پهنای باند ۲۰/۳ و بهره‌وری الگوی تابش بیش از ۹۶ درصد است. از طرفی ابعاد کوچک، پهنای باند فرکانسی مناسب و طراحی ساده شبکه نیز تامین شده است.

کلمات کلیدی: آنتن آرایه‌ای، پیچ میکرواستریپ، شبکه عصبی کانولوشن، کامپوزیت همگن، یادگیری عمیق

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر گوهر ورامینی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: فارس- بیضا- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استانداردهای بالا و الزامات اساسی در ساختار و عملکرد آنتن‌ها، به ویژه پهنای باند، بهره و ناپوری به مهمترین شاخص‌های عملکرد طراحی تبدیل و چگونگی گسترش پهنای باند به یک موضوع مهم و کلیدی در طراحی آنتن‌ها تبدیل شده است [۱]. ساختار خط انتقال دارای مزایایی از جمله پوشش چندین باند فرکانسی، اندازه کوچک و ساخت آسان و در طراحی آنتن‌های آرایه‌ای و پهن باند مناسب‌تر است. یکی از اساسی‌ترین قسمت‌ها در سیستم‌های کنترلی، مخابراتی و امنیتی وجود یک آنتن با چندین باند فرکانسی است. بنابراین سیستم‌های طیف گسترده، فرایه‌ن باند و آرایه‌ای در این میان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. آنتن آرایه‌ای و فرایه‌ن باند مینیاتوری به عنوان یک شاخه مهم و اساسی مخابرات هوشمند و کنترلی به شمار می‌آید [۳]. طراحی باند فرکانسی به منظور انتقال، دریافت، اسکن، هوش کنترلی، جهت یابی و کاربردهای ناپوری مورد توجه قرار دارند [۴]. پیچ فرکتال به عنوان یک عنصر دست راستی است و با اضافه کردن المان دست چپی، کوچک‌سازی آنتن با استفاده از روش بارگذاری فرامواد تامین و ایجاد می‌گردد [۵].

آنتن مورد نظر در محیط‌های بدون رسانای فیزیکی استفاده و با اتصال سلول‌های واحد و تغییرات طول موثر، باعث ایجاد امپدانس‌های متفاوت و قابلیت تنظیم مجدد آنتن، بهره و الگوی تابشی با قابلیت کنترل را شامل می‌شود [۶]. همچنین آنتن پیچ دارای پهنای باند و بهره کم است [۷]. کامپوزیت دست راست-چپ^۱ (CRLH) به دلیل تلفات کم، تغییرات فاز، پهنای باند فرکانس، رزونانس مرتبه صفر و منفی، مینیاتوری‌سازی در جهت طراحی آنتن پهن باند آرایه‌ای مناسب است [۸]. ساختار دست راست-چپی در آنتن‌ها به دلیل تفاوت فاز در حالت تکرار آرایه و ضخامت لایه‌ها دچار تاخیر فاز و در نهایت انحراف الگوی تابشی و از طرفی مسدود شدن خط انتقال باعث باریک شدن پهنای باند و افزایش تلفات در شبکه می‌گردد [۹].

در این مقاله ساختار و مدل آنتن آرایه‌ای در محدوده ۲ الی ۷ گیگاهرتز با کمک الگوریتم‌های یادگیری عمیق^۲ (DL)، کامپوزیت همگن RL بهینه‌سازی و ارتقا یافته، طراحی و پیاده‌سازی شده است. طراحی خط انتقال آنتن پیشنهادی بر اساس الگوریتم عصبی پیچشی (کانولوشن چند بلوکی)، نظریه رزونانس دوگانه و سلف مارپیچی طراحی و بهینه‌سازی خطوط انتقال ارائه گردیده است. مدل‌سازی آنتن برای چهار آرایه بارگذاری و با استفاده از شبکه عصبی پیچشی^۳ (CNN)، تاخیر فاز ایجاد شده در بخش سمت راست تا حدود بسیار زیادی جبران و در نهایت تغییرات فاز بهینه و الگوی تابشی^۴ اصلاح می‌گردد. از طرفی در آنتن پیشنهادی امکان پیاده‌سازی با کمترین خطا و تاخیر اسکن مداوم آرایه‌های فازی مقدور است. محدودیت و باریک شدن پهنای باند باعث ایجاد مسدودیت بخش دست چپی است از طریق شکاف و زمین ناقص^۵ در پیچ مایکرواستریپ برطرف و تلفات سیستم تا حد قابل قبولی کاهش می‌یابد.

نتایج ساختار یک مدل ارتقا یافته از کامپوزیت خط انتقال همگن خطی دست راست و چپی در آنتن آرایه‌ای با پیچ مایکرواستریپ را ارائه می‌دهد که نشان دهنده افزایش پهنای باند ۲۰/۳ درصدی، بهره‌وری الگوی تابش بیش از ۹۶ درصد و کوچک‌سازی ۶۰ درصد است. خصوصیات مهم طراحی و ساخت آنتن‌ها در شبکه طیف گسترده و فرایه‌ن باند نیز تا حد بسیار مطلوبی تامین می‌گردد. شبیه‌سازی آنتن از طریق نرم‌افزار^۶ (ADS) و الگوریتم یادگیری توسط نرم‌افزار پایتون انجام شده است. در بخش اول مقاله به معرفی یادگیری عمیق و الگوریتم عصبی کانولوشن در حالت تک و چند بلوکی (چند لایه) و نحوه مدل‌سازی و آموزش شبکه پرداخته شده است. در ادامه خطوط انتقال دست راست و چپی که به صورت همگن مد نظر است (مدل-سازی خطی). سپس عملکرد، بهینه‌سازی و در نهایت ارتقا کامپوزیت در آنتن‌های آرایه‌ای جهت چهار آرایه مورد تحلیل و در بخش نهایی نتایج شبیه‌سازی و روش ارائه شده با مدل‌های دیگر در این زمینه بررسی و مقایسه شده است.

۲- شبکه عصبی پیچشی-کانولوشن

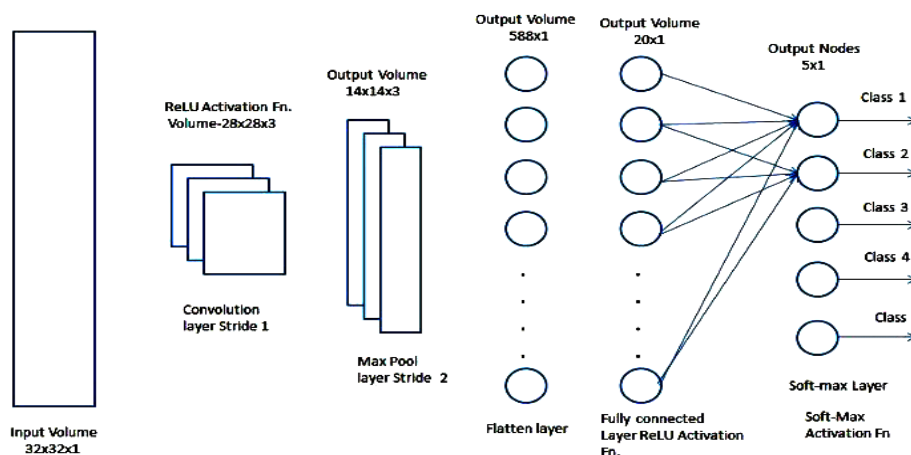
شبکه عصبی کانولوشن براساس یافته‌های یادگیری عمیق عمل می‌کند و از لایه‌هایی از نورون‌های مصنوعی به نام گره (محل تلاقی داده‌های موجود در لایه‌ها) ساخته شده است. گره‌ها توابعی هستند که مجموع وزنی ورودی‌ها را محاسبه و برمی‌گردانند [۱۰] و به عنوان یک بخش کانولوشنی شبکه عصبی است. شبکه عصبی کانولوشن نوع خاصی از شبکه عصبی با چندین لایه است که داده‌هایی با آرایش شبکه‌ای را پردازش و ویژگی‌های مهم و مورد نیاز را استخراج و طبقه‌بندی می‌کند [۱۱]. مزیت

استفاده از شبکه عصبی پیچشی نیاز به انجام پیش‌پردازش بر روی داده نیست. بنابراین چندان به مقادیر اولیه وابسته نیستند و به عنوان یک نقطه قدرت در الگوریتم‌های عصبی و یادگیری عمیق بشمار می‌آید. شبکه کانولوشن در واقع یک یادگیری عمیق است که داده‌های ورودی را دریافت و به هر یک از اطلاعات براساس میزان اهمیت (وزن‌های قابل یادگیری و بایاس) تخصیص می‌دهد و قادر به متمایزسازی آن‌ها است [۱۲] و با اعمال فیلتر روی داده‌های ورودی، الگوریتم مورد نظر و وزن دهی را اعمال و فیلترها را هم‌زمان با فرآیند آموزش تنظیم می‌کنند. به این ترتیب، حتی زمانی که مجموعه داده‌های وسیعی از آرایه‌ها را شامل شود، نتایج قابل اطمینان و بصورت سنکرون است. فیلترها را برای آموزش بهتر بروزرسانی و نیاز به فیلترهای دستی تا حد بسیار زیادی کم‌رنگ و در نهایت از بین می‌رود و باعث ایجاد انعطاف‌پذیری بیشتر در تعداد و ارتباط فیلترها بر روی مجموعه داده‌ها می‌گردد [۱۳].

هر نود در یک لایه توسط مقادیر وزنی تعریف و مشخص می‌شود. هنگامی که داده‌ها توسط شبکه عصبی پیچشی دریافت شود، هر لایه نگاشت‌ها را فعال‌سازی و ویژگی‌های مهم مجموعه داده را شناسایی می‌کند. آخرین لایه شبکه عصبی پیچشی لایه طبقه‌بندی است که مقادیر پیش‌بینی شده را براساس نگاشت فعال‌سازی تعیین می‌کند. از جمله مزایای شبکه پیشنهادی، آموزش مدل‌های شبکه عصبی پیچشی با پارامترهای اولیه کمتر و آسان‌تر از سایر شبکه‌های عصبی است. زیرا کانولوشن‌ها قادر به کشف تعداد زیادی لایه پنهان هستند و جهت پردازش به تعداد زیادی داده نیاز نخواهند داشت [۱۴]. شبکه‌های عصبی کانولوشن به‌صورت تک و چند بعدی طراحی و پیاده‌سازی شده است. مشابه با سایر شبکه‌های عصبی، شبکه کانولوشن هم از تابع تحریک غیرخطی بعد از لایه کانولوشنی بهره گرفته است. تابع غیرخطی باعث ایجاد خاصیت غیرخطی در شبکه به‌صورت جدا از لایه کانولوشنی انعطاف‌پذیر را ایجاد می‌کند.

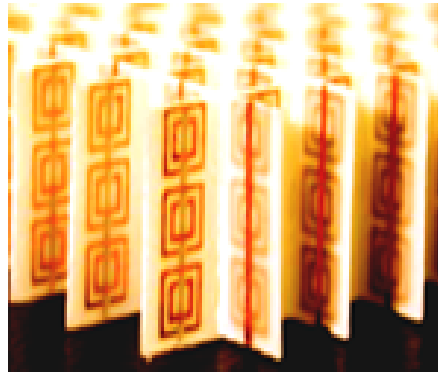
۳- خطوط انتقال همگن و خطی راست-چپ

- یک سلول واحد خط انتقال همگن دست راست-چپ شامل خط تغذیه‌ای است که به‌طور الکترومغناطیسی به پیچ فلزی تزویج شده است [۱۵]. فرکانس‌های تشدید مطابق با ضرب مدهای دست-چپ^۷ (LH) و دست-راست^۸ (RH) و با راندمان می‌توانند توسط تغییر اندازه پیچ، طول خط *via* که در واقع شکاف عمودی ایجاد شده‌ای است که مسیر رسانایی را بین دو یا چند لایه رسانا ایجاد می‌کند. طول خط تغذیه، فاصله بین عنصر آنتن، زمین و تغییر ابعاد دیگر کنترل شوند [۱۶]. اگر امپدانس و ادمیتانس بخش دست چپی برابر صفر باشد و تنها امپدانس و ادمیتانس ناشی از عناصر راست در مدار موجود باشند، مدل معادل خط انتقال راست دست می‌شود [۱۷]. برعکس اگر امپدانس ناشی از عناصر راست صفر باشد، مدار معادل تنها شامل عناصر دست چپی است و اگر کل عناصر غیر صفر باشند آن را خط انتقال در نظر می‌گیرند. در عمل خط انتقالی که به‌طور خالص دست چپی باشد، وجود ندارد [۱۸]، زیرا سلف سری و خازن موازی با افزایش فرکانس به علت شار جریان در فلز و گرادیان ولتاژ بین فلز و صفحه زمین افزایش می‌یابد [۱۹].

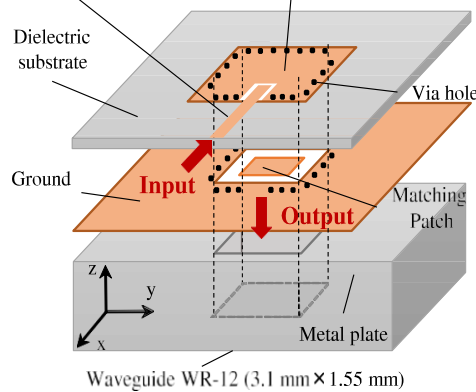


شکل (۱): ساختار عملکرد یک شبکه عصبی پیچشی چند لایه (کانولوشن بلوکی)

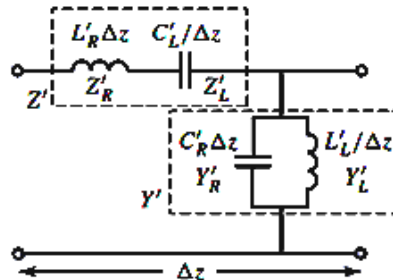
Figure (1): Functional structure of a multi-layer convolutional neural network



(الف) ساختار آنتن آرایه ای متشکل از سلف‌های پیچشی [۱۶]
Microstrip line Waveguide short



(ب) کامپوزیت با وزن داده‌های یادگیری عمیق



(ج) مدل مداری خط انتقال همگن راست-چپ [۱۷]

شکل (۲): مدل کلی از خط انتقال همگن و یادگیری عمیق

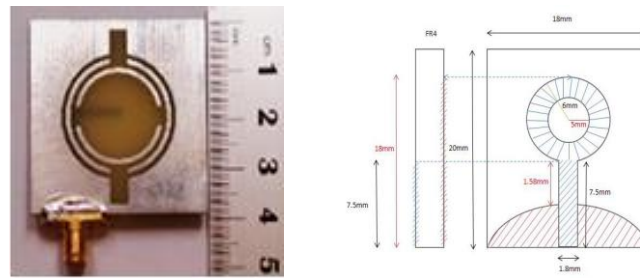
Figure (2): General model of homogeneous transmission line and deep learning, (a) The CRLH structure consists of torsional inductors [16], (b) Composite with the weight of deep learning data, (c) Orbital model of RL homogeneous transmission line [17]

یک ساختار فرامواد شامل سلف موازی و خازن سری، سلف سری و خازن موازی است. سلف و خازن سری مشخصه انتشار مود دست چپی و سلف و خازن موازی مشخصه انتشار مود دست-راستی را تعیین می‌کند [۲۰]. با استفاده از این روش می‌توان به طراحی آنتن بر اساس خصوصیات منحصر بفرد کامپوزیت انتقال دست چپ-انتقال همگن^۹ (CRLH-TL) که از آن جمله می‌توان به عدم موازی بودن، سرعت فاز^{۱۰}، سرعت گروه^{۱۱} و ثابت انتشار صفر^{۱۲} (طول موج بینهایت) در یک فرکانس خاص و در مد اصلی اشاره کرد. در این مود با کاهش فرکانس، ثابت انتشار افزایش یافته و طول موج کاهش می‌یابد و آنتن با طول تشدید کوچک‌تر حاصل می‌گردد [۲۰]. بنابراین خط انتقال بارگذاری شده توسط سلف و خازن، توزیع میدان مربوط به طول را به ازای ابعاد کوچک‌تری ایجاد و آنتن پیچ کوچک‌تری نسبت به آنتن معمولی ایجاد می‌کند و حالت مینیاتوری تا حدودی تامین می‌گردد. از طرفی طول موج مستقل از طول خط انتقال است، در نتیجه می‌توان به یک آنتن از نظر الکتریکی کوچک دست یافت. طول الکتریکی خط انتقال متعادل به شدت وابسته به ابعاد فیزیکی است، بنابراین کاهش اندازه آنتن به معنای افزایش فرکانس عملکرد است. توزیع میدان خط انتقال تنها به پارامترهای مدار از قبیل سلف و خازن‌ها وابسته است که باعث تغییرات فاز،

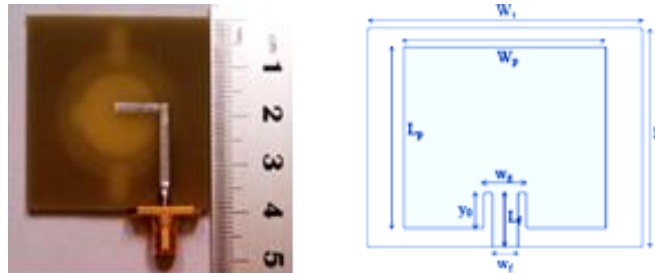
الگوی تشعشعی نامتقارن و مسدود شدن پهنای باند می‌گردد. اندازه فیزیکی و فرکانس کار آنتن وابسته به ابعاد سلول واحد و پارامترهای مدار معادل خط انتقال است و با افزایش سلف موازی و خازن سری کاهش ابعاد بیشتر می‌شود [۲۱]. در اکثر طراحی‌های آنتن طیف گسترده از تشدید گرهای مود مرتبه صفر، که دارای طول موج بی‌نهایت (در فرکانس غیر صفر) هستند، استفاده شده است [۲۱]. همچنین خط انتقال بارگذاری شده توسط سلف و خازن، توزیع میدان مربوط به طول را به ازای طول کوچک‌تری ایجاد می‌کند. بنابراین آنتن پیچ کوچک‌تری نسبت به آنتن معمولی ایجاد می‌گردد. استفاده از این روش برای طراحی آنتن در فرکانس‌های پایین با محدودیت‌هایی مواجه است، زیرا به مقدار سلف موازی و خازن سری بزرگی احتیاج و دستیابی به مقادیر بزرگ این پارامترها در تکنولوژی میکرواستریپ دشوار است. استفاده از این روش کوچک‌سازی سبب کاهش بهره آنتن پیچ نسبت به آنتن معمولی می‌گردد. طول الکتریکی یک خط انتقال معمولی به شدت وابسته به ابعاد فیزیکی است، بنابراین کاهش اندازه آنتن به معنای افزایش فرکانس عملکرد است. توزیع میدان خط انتقال تنها به پارامترهای مدار از قبیل سلف‌ها و خازن‌ها وابسته است. اندازه فیزیکی و فرکانس کار آنتن وابسته به ابعاد سلول واحد و پارامترهای مدار خط انتقال است. بنابراین با افزایش سلف موازی و خازن سری کاهش ابعاد ایجاد می‌شود. تشدیدگرهای مود مرتبه صفر، که دارای طول موج بی‌نهایت (در فرکانس غیر صفر)، در طراحی آنتن استفاده شده است.

۴- طراحی و ارتقا کامپوزیت همگن راست-چپ با استفاده از شبکه عصبی کانولوشن

جهت‌گیری الگوی تشعشعی^{۱۳} آرایه‌ها و ایجاد اسکن مناسب در طراحی خط انتقال آنتن پیشنهادی براساس الگوریتم عصبی پیچشی (کانولوشن)، نظریه رزونانس دوگانه و سلف مارپیچی طراحی می‌گردد. مدل‌سازی آنتن به همراه چهار آرایه بارگذاری و استفاده از شبکه عصبی پیچشی تاخیر فاز سمت راست جبران و در نهایت تغییرات فاز سیستم بهینه و الگوی تابشی اصلاح می‌گردد. در آنتن پیشنهادی با کمترین خطا و تغییر فاز امکان اسکن مداوم آرایه‌های فازی مقدور می‌گردد. مشکل مربوط به محدودیت و باریک شدن پهنای باند از طریق ایجاد شکاف در صفحه و زمین ناقص در پیچ میکرواستریپ برطرف و تلفات سیستم کاهش می‌یابد. طراحی خط انتقال آنتن پیشنهادی بر اساس الگوریتم عصبی پیچشی (کانولوشن)، نظریه رزونانس دوگانه و سلف مارپیچی طراحی شده است. در این بخش به طراحی و مدل‌سازی کامپوزیت خط انتقال و ترکیب با الگوریتم یادگیری عمیق پرداخته و مراحل به‌صورت گام به گام الگوسازی شده است. ابعاد آنتن $(\frac{1}{6} * 40 * 40)$ که به‌دلیل وجود پیچ و شبکه عصبی کانولوشن تا حد مطلوبی کاهش یافته و مینیاتوری‌سازی^{۱۴} تا حدود ۶۰ درصد ایجاد می‌گردد. پهنای باند محدوده کاری ۲ الی ۷ گیگاهرتز و فرکانس تشدید اصلی در $\frac{4}{5}$ گیگاهرتز رخ می‌دهد. یکی از روش‌های ایجاد سلف موازی استفاده از via است. در این حالت در داخل زیر لایه یک حفره استوانه‌ای^{۱۵} ایجاد و سپس یک استوانه هادی در داخل آن قرار داده می‌شود. در روش مینیاتوری نیاز به ایجاد خازن سری است که به خازن دست چپی معروف است. در این مرحله رفع مشکل مسدودسازی از طریق خازن سری و ایجاد شکاف بر روی پیچ صورت می‌گیرد. در ادامه شکاف متداول ایجاد شده در بخش میکرواستریپ به همراه مدار معادل نشان داده شده است. در کوچک‌سازی با روش CRLH-TL نیاز به حضور سلف موازی است. با وصل کردن سلف‌های سری که از تکرار داده‌های کانولوشنی و وزن دهی به زمین مجازی^{۱۶} ایجاد شده است، می‌توان به سلف موازی دست یافت و زمین مجازی برای رسیدن به سلف موازی استفاده شده است. در طراحی آنتن ابتدایی از ترکیب دو روش آنتن میکرواستریپ و ساختار تمام‌تریال رله حالت جامد^{۱۷} (SRR) استفاده شده است. سپس این داده‌ها و ساختار آنتن به عنوان آموزش اولیه شبکه عصبی و وزن‌گیری الگوریتم جهت تکرارهای آرایه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. جنس زیرلایه (دی الکتریک) مدار چاپی از نوع FR-4 با ضریب نفوذپذیری الکتریکی نسبی $\frac{4}{4}$ و ضخامت $\frac{1}{6}$ میلی‌متر است. تغذیه آنتن همان خط میکرواستریپ و اتصال دهنده فشنگ (موشک) سطح هوا^{۱۸} (SMA) با مشخصه ۵۰ اهم متصل شده است. پاسخ تلفات بازگشتی آنتن برای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی در شکل (۳) ارائه گردیده است. به‌طور کلی فرکانس کاری، بازده و الگوی تشعشعی، تلفات بازگشتی و سایر پارامترهای آنتن با ابعاد پیچ وابسته است. در طراحی آنتن‌ها با توجه به ضریب نفوذپذیری نسبی و جنس زیر لایه ابعاد پیچ و پارامترهای مورد نیاز با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شده است.



(الف) ساختار رویین



(ب) نمای پشت آنتن

شکل (۳): نمای هندسی ازمدلسازی ساخت آنتن اولیه طراحی و پیاده‌سازی شده

Figure (3): Geometric view of modeling the construction of the initial antenna designed and implemented, a) Up structure, b) Antenna backside view

$$m = m(W) = L_r^g - \frac{1}{W^2 C_1^g} = \frac{Z^g}{jW} \quad (1)$$

$$e = e(w) = L_r^g - \frac{1}{w^2 c_1^g} = \frac{Z}{jw} \quad (2)$$

در اینجا خازن به دلیل شکاف، توسط مدار معادلی که برای میکرواستریپ توضیح داده شده است، به دست می‌آید که در آن طول و عرض شکاف‌ها به عنوان پارامترهای اصلی برای تخمین ظرفیت و از خازن‌های موازی در مدار معادل شکاف‌ها صرف نظر می‌شود. از سوی دیگر، خط میکرواستریپ می‌تواند به عنوان سلف دست چپی استفاده شود. w و b به ترتیب طول و عرض نوار هستند که بر روی بستری با ضخامت h قرار گرفته‌اند. همچنین برای سلف وایا، d به عنوان شعاع وایا است. به این ترتیب، سلف کل با جمع هر دو مقدار به دست خواهد آمد.

$$e = e(w) = L_r^g - \frac{1}{w^2 c_1^g} = \frac{Z}{jw} \quad (3)$$

$$m = m(w) = L_r^g - \frac{1}{w^2 c_1^g} = \frac{Z^g}{jw} \quad (4)$$

$$L_{\text{via}} = 5.08h \left(\ln \left(\frac{2h}{d} \right) + 1 \right) nH \quad (5)$$

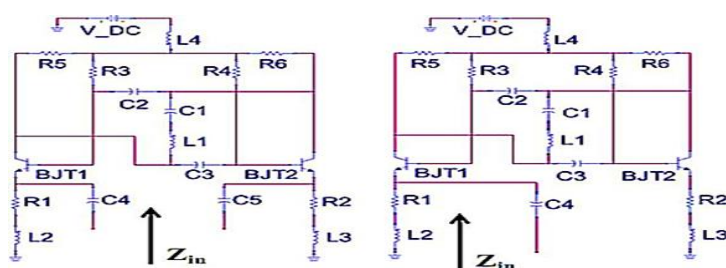
ظرفیت شکاف به عنوان خازن سری شناخته شده و بخش دست چپی است و می‌تواند توسط روش‌های مختلف مدل‌سازی شود. همچنین از ظرفیت مهار کننده در شکاف با توجه به مقدار کوچک آن‌ها می‌توان صرف نظر نمود. تشدید نهایی که به آن تشدید مرتبه صفر (ZOR) نیز گفته می‌شود.

$$f_{\text{ZOR}} = \sqrt{f_{\text{RH}} \times f_{\text{LH}}} \quad (6)$$

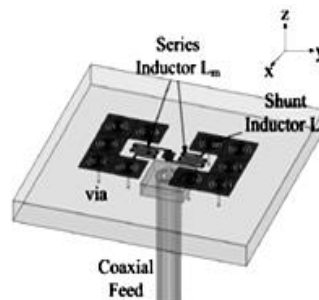
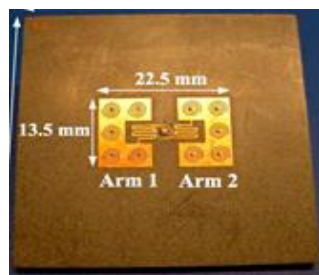
ساختار خطوط انتقال همگن دست راست - چپ قادر به نمایش سرعت فاز و گروه به صورت موازی و غیرموازی بر حسب فرکانس عملکرد است. فرکانسی که ناحیه دست چپ را از ناحیه دست راست جدا می‌کند را فرکانس انتقال می‌نامند و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f_0 = \frac{1}{2p\sqrt{C_r L_r C_L L_L}} \quad (7)$$

تغییرات فاز باعث ایجاد خازن چند تیغه‌ای با استفاده از شبکه هوش مصنوعی است، که به صورت متناوب قرار گرفته‌اند. این ساختار از وزن دهی و کانولوشن دو لایه با خازنی که بین هادی‌های باریک در شکاف و ضریب کیفیت یک خازن بسیار بزرگ تشکیل شده است. ظرفیت خازن را می‌توان با بالا بردن تعداد تیغه‌ها، افزایش طول تیغه‌ها و استفاده از زیر لایه نازک با ثابت دی الکتریک بالا افزایش داد. خازن‌های اینتر دیجیتال در محدوده ۰/۵ الی ۰/۵ پیکوفاراد قرار گرفته‌اند. با استفاده از شکاف ناقص و ویا سلف مارپیچ به زمین متصل و به صورت موازی طراحی می‌شود. سوراخ عمودی ایجاد شده که به ویا معروف است، سلف مارپیچ را اتصال کوتاه و با استفاده از این روش ساختار کوچک سازی قابل قبولی در حد $(\lambda/4 * \lambda/7 * \lambda/29)$ به دست آمده است. در این مدل سازی تیغه‌های خازن اینتر دیجیتال به صورت L شکل طراحی و خازن‌ها به صورت موازی قرار گرفته است. موازی شدن خازن‌ها، ظرفیت معادل را افزایش و عناصر نقش خازن چپ و ویا نقش سلف چپ دستی را ایفا می‌کنند. بنابراین مشکل مسدود شدن بخش سمت چپی و تاخیر فاز تعدیل و در نهایت الگوی تابشی اصلاح می‌گردد. این آنتن دارای حدود ۶۰ درصد مینیاتور سازی نسبت به روش‌های مشابه و در بازه فرکانسی ۲ الی ۷ گیگاهرتز دارای یک فرکانس تشدید در ۴/۵ گیگاهرتز در سمت چپ و اصلاح تفاوت فاز است. مکان قرار گرفتن عناصر دست راست و چپی که شامل خازن و سلف موازی هستند بر روی رفتار تلف بازگشتی تاثیر دارد. بنابراین میزان فاصله شکاف نوار و طول سلف موازی بسیار حائز اهمیت است. از نظر تئوری هر چه ضخامت دی الکتریک کمتر باشد ظرفیت خازن موجود بیشتر و هر چه شکاف دارای عرض کمتری باشد ظرفیت خازن افزایش و عنصر دست چپی قوی تری ایجاد و در نتیجه جریان سطحی بیشتری را شامل می‌گردد. مدل مداری پیشنهادی باعث بهبود فرکانس تشدید و افزایش بهره شده و در نهایت تلفات بازگشتی مورد قبولی ایجاد می‌کند. سپس نمودار پراکندگی برای سلول‌های فرامواد رسم و پهنای باند در وضعیت شکاف‌های متنوع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. هر چه شکاف دارای عرض کمتری باشد، ظرفیت خازن افزایش، عنصر دست چپی قوی تر و در نتیجه جریان سطحی بیشتری ایجاد می‌شود. از طرفی با توجه به ایجاد مرحله به مرحله آرایه‌ها می‌توان از طریق نمودار پراکندگی سلول‌ها در حضور فرامواد نتیجه گرفت، هر چه ارتفاع سلف کمتر باشد، با سلف بزرگتری از نظر شار مغناطیسی روبه‌رو و این امر باعث افزایش جریان سطحی و ایجاد شرایط مطلوب تری در خط انتقال است.



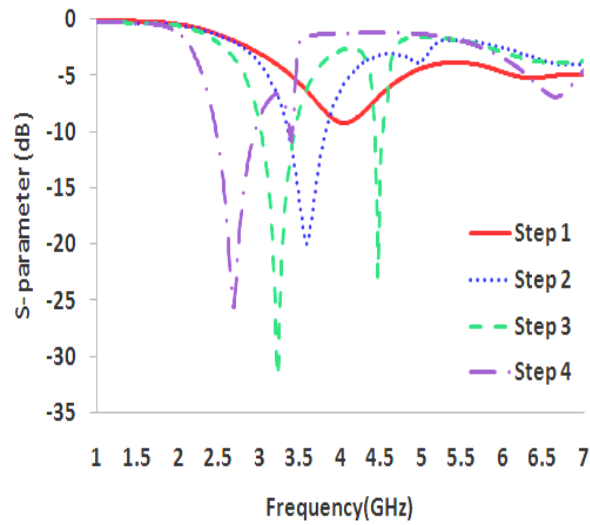
(الف) مدل مداری دو بازو



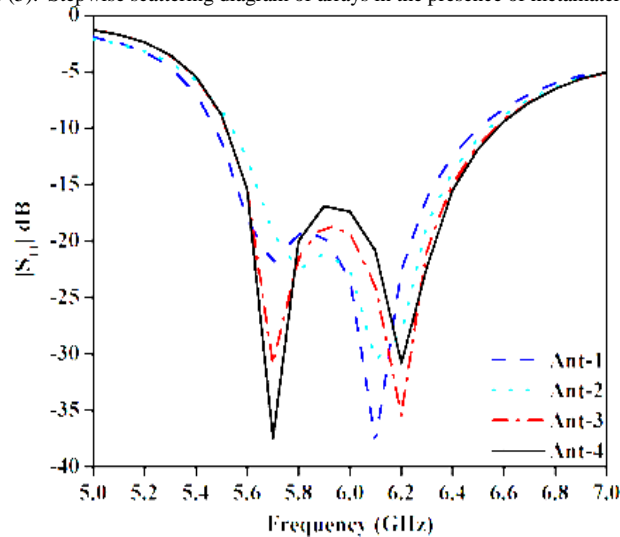
(ب) ساخت آنتن آرایه ای با کامپوزیت راست و چپ

شکل (۴): مدل و ساختار کامپوزیت انتقال

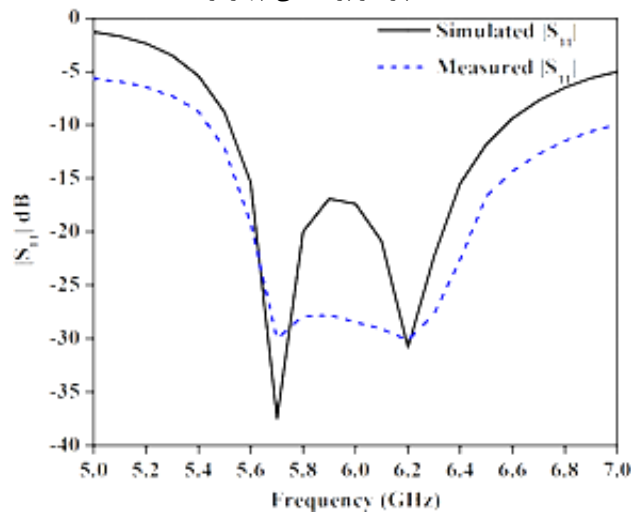
Figure (4): Model and structure of composite transmission, a) Orbital model of two arms, b) Creation of array antenna with right and left composites



شکل (۵): نمودار پراکندگی مرحله به مرحله آرایه‌ها در حضور سلول‌های فرامواد
Figure (5): Stepwise scattering diagram of arrays in the presence of metamaterial cells



(الف) پارامتر پراکندگی چهار آرایه



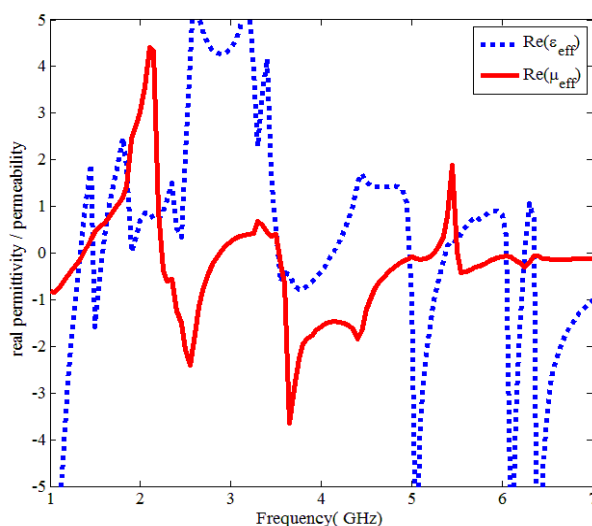
(ب) پارامتر پراکندگی ساختار کلی آنتن آرایه‌ای

شکل (۶): بررسی پارامتر پراکندگی

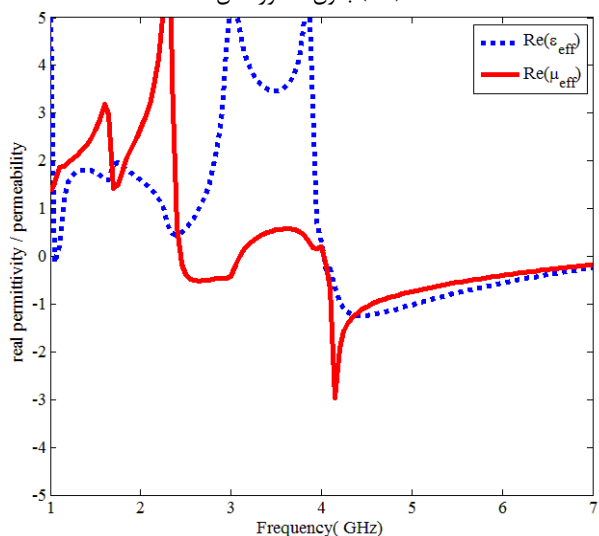
Figure (6): Dispersion parameter survey, a) Scattering parameter of four arrays, b) Dispersion parameter of the overall structure of the array antenna in construction and simulation mode

در ادامه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و الکتریکی در طراحی آنتن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. گذردهی و نفوذپذیری در فرکانس های ۴/۵ و ۶ گیگاهرتز منفی است و باعث ایجاد تشدید هایی در این فرکانس ها می گردد. همچنین نفوذپذیری منفی در ۲/۵ و ۴/۵ گیگاهرتز را ایجاد می کند. بر این اساس مشاهده می گردد که مشخصه منفی سطح فرامواد مستقیم بر روی تشدید آنتن از طریق تغییرات امپدانس موج در زیر لایه اثر می گذارد. بخش واقعی ضریب نفوذ پذیری و گذردهی در شبیه سازی نمایش داده شده است.

الگوی آنتن در ۴/۵ گیگاهرتز به دست آمده و دو الگوی تابشی اصلی و متعامد برابر با صفر و ۹۰ ارائه شده است. برای نشان دادن الگوی تابشی آنتن، آزمایش بر روی الگوی استوانه ای سمت چپ^{۱۹} (LHCP) و الگوی استوانه ای سمت راست^{۲۰} (RHCP) انجام و نتایج الگوی تابشی دایروی نمایش داده شده است، الگوی دو جهت اصلاح و مشکلات مربوط به اختلاف و تاخیر فاز تا حدود بسیار زیاد رفع و اصلاح الگوی تابشی کاملاً مشهود است. روش ارتقا یافته مشکلات تاخیر فاز را تا حدود بسیار زیادی رفع و باعث بهبود کیفیت و تقارن الگوی تابشی می گردد و یک ایده کاربردی مناسب در سمت گیری و تغییرات فاز است.



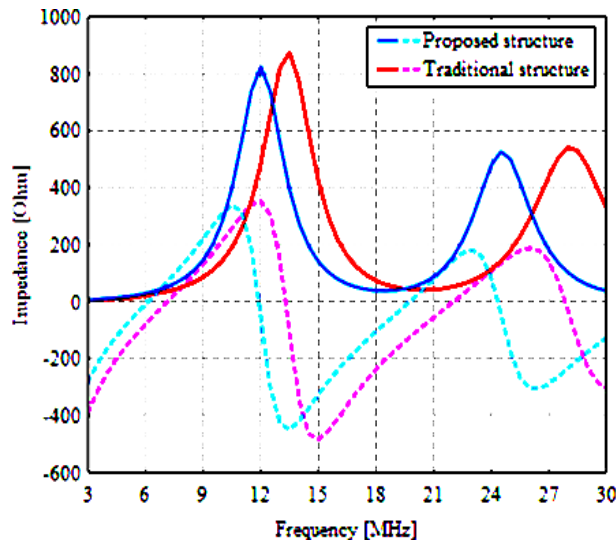
(الف) بدون حضور آنتن



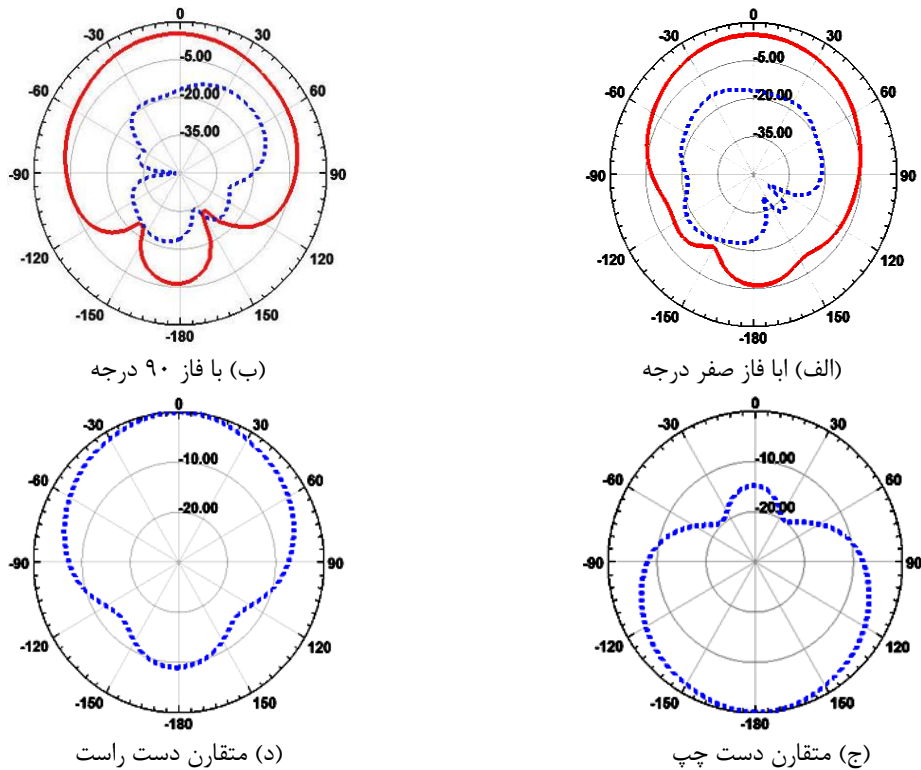
(ب) در حضور آنتن

شکل (۷): مقایسه گذردهی و نفوذ پذیری فرامواد برای مدل پیشنهادی

Figure (7): Comparison of permeability and permeability of metamaterials for proposed model, a) without the presence of antenna, b) in the presence of the antenna



شکل (۸): ضریب گذردهی زیر لایه
Figure (8): Transmission Line Impedance



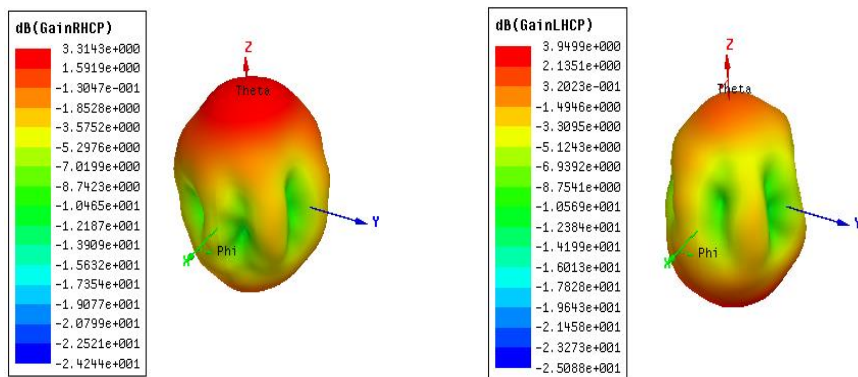
شکل (۹): الگوی تابشی در صفحه دو بعدی

Figure (9): Radiant pattern in 2D screen, a) The main and orthogonal radiative pattern of $\phi=0^\circ$, b) radiant pattern $\phi=90^\circ$, c) LHCP pattern, d) RHCP pattern

۵- نتیجه‌گیری

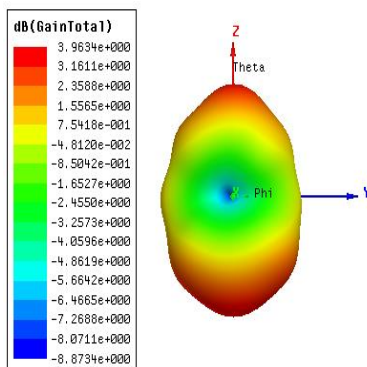
ساختار و مدل‌سازی مناسب آنتن جز مهمترین شاخص‌های عملکرد بشمار می‌آید. برای این منظور خطوط انتقال از اهمیت بالایی برخوردار هستند. کامپوزیت همگن به دلیل تلفات کم، پهنای باند فرکانس، رزونانس مرتبه صفر و منفی، مینیاتورسازی و ساخت آسان از جایگاه مهمی برخوردار و در طراحی آنتن پهن باند و آرایه‌ای بسیار مناسب است. همان‌طور که در طرح پیشنهادی و مطالعات پیشین مطرح شد، ساختار دست راست-چپ در آنتن‌های پهن باند و آرایه‌ای به دلیل تفاوت فاز بخش راست در حالت تکرار آرایه و ضخامت لایه‌ها به عنوان نقطه ضعف اصلی در مدل‌سازی بشمار می‌آیند، دچار تغییرات و در

نتیجه تاخیر فاز و در نهایت انحراف الگوی تابشی می‌گردد و عدم وجود یک الگوی تابشی مناسب را ایجاد می‌کند. از طرف دیگر مسدود شدن خط انتقال در قسمت چپ باعث باریک شدن پهنای باند و افزایش تلفات در شبکه و کاهش عملکرد، بهره و ضریب اطمینان می‌گردد.



(ب) بدون فرامواد برای الگوی استوانه ای سمت راست

(الف) بدون فرامواد برای الگوی استوانه ای سمت چپ



(ج) اصلاح شده با فرامواد در فرکانس تشدید

شکل (۱۰): بهره آنتن در شرایط مختلف فاز

Figure (10): Gain antenna in different phase conditions, a) Without metamaterials for LHCP, b) Without metamaterials for RHCP, c) Modified with metamaterials at resonant frequency

Table (1): Check the values and parameters of the modified and primary antenna

جدول (۱): بررسی مقادیر و پارامترهای آنتن اصلاح شده و اولیه

پارامتر	آنتن اولیه	آنتن اصلاح شده
C_p	۰/۰۵ پیکوفاراد	۰/۵ پیکوفاراد
شکاف	۰/۷ میلی متر	۰/۳ میلی متر
فرکانس تشدید	۵/۵ گیگاهرتز	۴/۲۵ گیگاهرتز
پهنای باند	۳-۶ گیگاهرتز	۲-۷ گیگاهرتز
ابعاد	۱/۵ * ۶۵ * ۶۵ میلی متر	۱/۶ * ۴۰ * ۴۰ میلی متر
C_1	-	۰/۶ پیکوفاراد
C_2	-	۰/۸ پیکوفاراد
C_3	-	۰/۸ پیکوفاراد
C_4	-	۰/۷ پیکوفاراد
L_1	-	۷۳/۶ نانو هانری
L_2	-	۶۱/۲ نانو هانری
L_3	-	۳۳ نانو هانری
L_4	-	۱۸ نانو هانری

Table (2): Results of simulation of the gain and return of the proposed antenna and initial antenna radiation pattern

جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهره و بازده تشعشعی آنتن پیشنهادی و آنتن اولیه

فرکانس (گیگاهرتز)	بیشینه نسبت بهره بدون کامپوزیت اصلاح شده	بیشینه نسبت بهره با کامپوزیت اصلاح شده	بازده تشعشعی آنتن اولیه	بازده تشعشعی آنتن پیشنهادی
۲/۵	۳/۶	-۴	۶۵٪	۹۲٪
۴/۵	۲	۳/۹۶	۷۲٪	۹۶٪
۶	۲/۷	۳/۸	۷۳٪	۹۵٪

Table (3): Comparison of performance of intelligent modified composite structure and previous studies in this field

جدول (۳): مقایسه عملکرد ساختار کامپوزیت اصلاح شده هوشمند و مطالعات پیشین در این زمینه

راندمان (ماکزیمم)	نسبت بهره (ماکزیمم)	نمودار بهره آنتن	آرایه	اصلاح الگوی تابشی	پهنای باند (گیگاهرتز)	درصد مینیاتوری	الگوریتم هوشمند	ابعاد آنتن (میلیمتر مربع)	مدل‌های ارائه شده
۹۲٪ ۶۰٪	۳/۹۵ ۲/۶	الگوی همه جهته متقارن	۴	۹۶٪	۲-۷ گیگاهرتز	۶۰٪	شبکه عصبی کانولوشن پیچشی	۴۰*۴۰*۱/۶ میلیمتر مربع	مدل پیشنهادی
۸۶٪ ۴۳٪	۳/۱ ۱/۶	کشیدگی به سمت راست	۱	۵۸٪	۲-۶ گیگاهرتز	۴۳٪	----	۴۵*۴۵*۱/۶ میلیمتر مربع	[۲]
۷۱٪ ۴۶٪	۲/۲ ۱/۸	همه جهته نامتقارن	۲	۷۹٪	۳-۶ گیگاهرتز	۲۸٪	فرکتال هیلبرت	۵۰*۶۰*۱/۷ میلیمتر مربع	[۵]
۸۹٪ ۵۶٪	۳/۲ ۲/۳	همه جهته با کشیدگی مشهود	۴	۸۶٪	۲-۷ گیگاهرتز	۵۴٪	شبکه عصبی کانولوشن VGG-11	۴۵*۴۵*۱/۹ میلیمتر مربع	[۷]
۶۵٪ ۴۹٪	۲/۸ ۱/۹	همه جهته با عدم تقارن کم	۴	۹۱٪	۲-۵ گیگاهرتز	۵۷٪	شبکه عصبی کانولوشن VGG-16	۴۰*۵۰*۲/۱ میلیمتر مربع	[۸]

در این مقاله همان‌طور که پیشتر مطرح شد با کمک یادگیری عمیق نقایص اساسی کامپوزیت همگن برطرف و بهینه‌سازی در ساختار و عملکرد آنتن آرایه‌ای را شامل می‌گردد. طراحی خط انتقال آنتن پیشنهادی بر اساس الگوریتم عصبی کانولوشن، نظریه رزونانس دوگانه و سلف مارپیچی در چهار آرایه و بروی پچ بارگذاری می‌گردد. عملکرد آنتن در محدوده ۲ الی ۷ گیگاهرتز و رزونانس اصلی بهینه ۴/۵ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد.

با استفاده از شبکه عصبی پیچشی خط انتقال چپ تاخیر فاز سمت راست جبران و در نهایت تغییرات فاز بهینه و اصلاح الگوی تابشی و اسکن مداوم آرایه‌های فازی را مقدور می‌سازد. همچنین با ایجاد شکاف در پچ مایکرواستریپ محدودیت پهنای باند برطرف و تلفات سیستم کاهش می‌یابد. نتایج این ساختار ارتقا یافته نشان دهنده افزایش پهنای باند ۲/۳ و بهره‌وری الگوی تابش بیش از ۹۶ درصد است. بنابراین معایب باریک شدن پهنای باند در اثر مسدودیت شبکه و همچنین تغییرات ناگهانی فاز، تاخیر و در نهایت عدم تطبیق الگوی تابشی اصلاح و ارتقا می‌یابد. براساس مقایسه ابعاد اولیه و اصلاح شده مینیاتوری سازی تا حدود ۶۰ درصد افزایش و از طرفی خصوصیات ابعاد کوچک، پهنای باند فرکانسی مناسب و طراحی ساده شبکه نیز تامین می‌گردد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از فعالیت تحقیقاتی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] X.M. Yang, Q.H. Sun, Y. Jing, Q. Cheng, X.Y. Zhou, H.W. Kong, T.J. Cui, "Increasing the bandwidth of microstrip patch antenna", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 12, pp. 373-378, 2022 (doi: 10.1109/IECAP.2022.6333156).
- [2] P.S. Jack, G.A.E. Vandenbosch, S.L. Ooi, M.R.N. Husna, "Wearable dual-band Sierpinski fractal PIFA using conductive fabric", *Electronics Letters*, vol. 57, no. 6, pp. 365-367, Sept. 2022 (doi: 10.1109/PICAP.2022.6-457123).
- [3] Y. Mei, Z. Gao, "CS-based CSIT estimation for downlink pilot decontamination in multi-cell FDD massive MIMO", *Proceeding of the IEEE/ICCC*, pp. 1-5, China, Aug. 2021 (doi: 10.1109/ICCC52777.2021.958039-8).
- [4] H. Fawaz, M.E. Helou, S. Lahoud, K. Khawam, "A reinforcement learning approach to queue-aware scheduling in full-duplex wireless networks", *Computer Networks*, vol.189, Article Number: 107893, April 2021 (doi: 10.1016/j.comnet.2021.107893).
- [5] R. Vijayanand, D. Devaraj, "A novel feature selection method using whale optimization algorithm and genetic operators for intrusion detection system in wireless mesh network", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56847-56854, March 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978035).
- [6] G. Varamini, A. Keshtkar, M. Naser-Moghadasi, "Compact and miniaturized microstrip antenna based on fractal and metamaterial loads with reconfigurable qualification", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 83, pp. 213-221, May 2020 (doi: 10.1109/AECAP.2020.723221).
- [7] A. Akbarpour-Kasgari, M. Ardebilipour, "Massive MIMO-OFDM channel estimation via distributed compressed sensing", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 376-379, April 2019 (doi: 10.1109/L-WC.2018.2873339).
- [8] W. Cui, K. Shen, W. Yu, "Spatial deep learning for wireless scheduling", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 6, pp. 1248-1261, March 2019 (doi: 10.1109/JSAC.2019.2904352).
- [9] E. Hosseini, E. Aghadavoodi, G. Shahgholian, H. Mahdavi-Nasab, "Intelligent pitch angle control based on gain-scheduled recurrent ANFIS", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 6, no. 1, pp. 36-45, April 2019 (doi: 10.30501/jree.2019.95920).
- [10] A. Bhattacharya, B. Roy, S.K. Chowdhury, A.K. Bhattacharjee, "Design and analysis of a koch snowflake fractal monopole antenna for wideband communication", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 32, no. 6, pp.356-369, May 2017 (doi: 10.1109/APCAP.2017.6123156).
- [11] S. Jacobsson, G. Durisi, M. Coldrey, T. Goldstein, C. Studer, "Quantized precoding for massive MU-MIMO", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 65, no. 11, pp. 4670-4684, July 2017 (doi: 10.1109/TCOMM.2017.2-723000).
- [12] M. Behnam, H. Pourghassem, "Spectral correlation power-based seizure detection using statistical multi-level dimensionality reduction and PSO-PNN optimization algorithm", *IETE Journal of Research*, vol. 63, no. 5, pp. 736-753, April 2017 (doi: 10.1080/03772063.2017.1308845).
- [13] K.T. Chandrasekaran, M.F. Karim, N. Nasimuddin, A. Alphones. "CRLH structure-based high-impedance surface for performance enhancement of planar antennas", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 818-826, April 2016 (doi: 10.1109/IECAP.2016.6344156).
- [14] A. Pirooj, M. Naser-Moghadasi, F.B. Zarrabi. "Design of compact slot antenna based on split ring resonator for 2.45/5 GHz WLAN applications with circular polarization", *Microwave and Optical Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 12-16, May 2016 (doi: 10.1109/RDCAPE.2016.7281302).
- [15] A. Behdan, B. Fani, E. Adib, "Reliability evaluation of power system SVC types using a markov chain", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 193-212, Sept. 2015 (doi: 10.1001.1.23223871.1394.6.22.2.8).
- [16] N. Ojaroudi, Y. Ojaroudi, S. Ojaroudi. "Novel design of UWB band-stop filter (BSF) based on koch fractal structures", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, no. 15, vol. 7, pp. 89-97, July 2015 (doi: 10.1109/RDCAPE.2015.7281362).
- [17] S. Oymak, A. Jalali, M. Fazel, Y.C. Eldar, B. Hassibi, "Simultaneously structured models with application to sparse and low-rank matrices", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2886-2908, May

- 2015 (doi: 10.1109/TIT.2015.2401574).
- [18] J.S. Gomez-Diaz, A. Alvarez-Melcon, J. Perruisseau-Carrier, "Analysis of the radiation characteristics of CRLH LWAs around broadside", Proceeding of the IEEE/EUCAP, pp. 2876-2880, Prague, Czech Republic, March 2012 (doi: 10.1109/EuCAP.2012.6205934).
- [19] D. M Blough, G. Resta, P. Santi, R. Srinivasan, L.M. Cortes-Pena, "Optimal one-shot scheduling for MIMO networks", Proceeding of the IEEE/SECON, pp. 404-412, Salt Lake City, UT, USA, June 2011 (doi: 10.1109/SAHCN.2011.5984924).
- [20] B. Mumey, J. Tang, T. Hahn, "Algorithmic aspects of communications in multihop wireless networks with MIMO links", Proceeding of the IEEE/ICC, pp. 1-6, Cape Town, South Africa, May 2010 (doi: 10.1109/IC-C.2010.5502358).
- [21] J. Faiz, M. Ebrahimi-Salari, G. Shahgholian, "Reduction of cogging force in linear permanent magnet generators", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 40, no. 1, pp.123-134, Jan. 2010 (doi: 10.1109/TMAG.2009.2-027900).

زیر نویس‌ها

1. Left-hand transmission composite
2. Deep learning
3. Convolutional neural network
4. Radiant pattern
5. Incomplete earth
6. Advance design system
7. Left-hand
8. Right-hand
9. Left-hand transmission composite-homogeneous transmission
10. Phase speed
11. Group speed
12. Phase propagation constant
13. Radiation patter
14. Cylindrical cavity
15. Miniature
16. Virtual land (VIA)
17. Solid state relay
18. Surface missile air (SMA)
19. Left-hand cylindrical pattern
20. Right-hand cylindrical pattern