

Vol. 11/ No. 43/Spring 2022

Research Article

Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials

Sepideh Rezaee, MsC Student ¹  | Yashar Zehforoosh, Associate Professor^{2*} 

¹Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Urmia, Iran, sepideh.a22a@gmail.com

²Microwave and Antenna Research Center, Islamic Azad University, Urmia Branch, Urmia, Iran, y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

Correspondence

Yashar Zehforoosh, Associate Professor of Microwave and Antenna Research Center, Islamic Azad University, Urmia Branch, Urmia, Iran, y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

Received: 10 December 2021

Revised: 16 January 2022

Accepted: 10 February 2022

Abstract

In this paper, a four-band microstrip antenna using metamaterial structure is presented. The antenna proposed in this article, has an asymmetric structure and it is made up of two identical radiation elements and ground plane at the back. In this design, each radiation element consists of a reciprocating capacitor, which is attached to a slotted triangular acetate at the end. The proposed antenna has a miniature dimension of 10×15 mm². Also the proposed antenna has four resonances in frequencies of 3.19 GHz (1.25%), 6.22 GHz (10.74%), 7.18 GHz (5.19%) and 9.12 GHz (4.52%). Pattern and gain of the antenna are acceptable at resonant frequencies and the good consistency between the test result and the simulation confirm the accuracy of the antenna design. The proposed antenna is made and tested in the antenna laboratory. The results of the measurements are presented in the paper. Good consistency between test and simulation results confirms the accuracy and efficiency of the proposed multirole microstrip antenna design.

Keywords: Microstrip, Planar Antenna, Metamaterial, IDC.

Highlights

- In this paper, a microstrip four-band antenna is introduced, which has been reduced in size by using metamaterial structures.
- The techniques used in designing the proposed antenna, in addition to miniaturizing it, have also resulted in appropriate radiation behavior.
- The proposed antenna can be suitable for Bluetooth, ISM, WLAN, satellite and radar applications.

Citation: S. Rezaee and Y. Zehforoosh, "Design of a Planar Multiband Antenna Using Metamaterials," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 43, pp. 15–26, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.689028. (in Persian).

مقاله پژوهشی

طراحی یک آنتن مسطح چند بانده با استفاده از مواد متامتریال

سپیده رضائی^۱ | یاشار زهفروش^{۲*} 

چکیده:

در این مقاله یک آنتن چهاربانده میکرواستریپی با استفاده از ساختارهای متامتریال ارائه شده است. آنتن پیشنهادی در این مقاله، دارای یک ساختار نامتقارن بوده و از دو المان تشعشعی یکسان و یک صفحه زمین در قسمت پشتی تشکیل شده است. در این طراحی، هر المان تشعشعی از یک خازن متقابل تشکیل شده است که در انتها به یک پچ مثلثی شکل تشعشعی با شکافهای دایروی وصل می‌شود. آنتن پیشنهادی دارای ابعاد مینیاتوری به صورت 15×10 میلی‌متر مربع است. همچنین آنتن پیشنهادی دارای چهار رزونانس در فرکانس‌های $3/19$ گیگاهرتز ($1/25\%$)، $6/22$ گیگاهرتز ($10/74\%$)، $7/18$ گیگاهرتز ($5/19\%$) و $9/12$ گیگاهرتز ($4/52\%$) است. پترن و بهره آنتن در فرکانس‌های رزونانس قابل قبول است. آنتن پیشنهادی ساخته شده و در آزمایشگاه آنتن مورد آزمایش‌های عملی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در مقاله ارائه شده و همخوانی خوب و مناسب بین نتایج تست و شبیه‌سازی، صحت و کارایی طراحی آنتن میکرواستریپی چندبانده پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلید واژه‌ها: میکرواستریپ، آنتن مسطح، متامتریال، خازن بین انگشتی (IDC)

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، sepideh.a22a@gmail.com

^۲ دانشیار، مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

نویسنده مسئول

* یاشار زهفروش، دانشیار، مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، y.zehforoosh@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۹ آذر ۱۴۰۰

تاریخ بازنگری: ۲۶ دی ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۲۱ بهمن ۱۴۰۰

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.689028>

۱- مقدمه

با توسعه سریع سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم، تقاضا برای آنتن‌های کوچک با ساختار ساده و توانایی پوشش چند باند فرکانسی افزایش یافته است. در دهه اخیر، تأثیر مثبت خط انتقال مصنوعی^۱ برای سنتز متامتریال یا فراماده^۲ جهت طراحی آنتن‌هایی با ویژگی‌های ذکر شده اثبات شده است [۱]-[۳].

در [۲]-[۳]، آنتن‌های کوچک با دو یا سه باند عملیاتی با استفاده از فراماده طراحی شده‌اند. در [۲]، یک ساختار کامپوزیت چندلایه دست راستی/دست چپی ($CRLH^3$) برای طراحی یک آنتن پچ سه بانده کوچک استفاده شده است که ظرفیت خازنی سری بزرگی را برای بهبود ویژگی‌های دست چپی فراهم می‌کند.

همچنین در [۳]، یک آنتن پچ دو بانده با پلاریزاسیون دوگانه و یک آنتن با پلاریزاسیون دایروی ارائه شده است. هر دوی این آنتن‌ها با استفاده از سطوح امیدانسی غیرفعال (RIS^4) و تشدیدکننده‌های $CRLH$ قارچی شکل طراحی شده‌اند که از ویژگی‌های فرا مواد در ساختار آن‌ها بهره گرفته شده است. یک آنتن پچ دو بانده تک‌لایه با پیکربندی ساده و با استفاده از ساختارهای فرا مواد در [۴] معرفی شده است. در این طراحی، یک ساختار مارپیچی گرد، بر روی یک پچ فلزی مربعی شکل حک شده و یک

¹ Artificial Transmission Line

² Metamaterial

³ Composite Right/Left-Handed

⁴ Reactive Impedance Surface

سوراخ متالیزه^۱ با شعاع ۰/۲ میلی‌متر، پنج تشعشعی را به صفحه زمین متصل می‌کند. همچنین در چهار لبه پنج تشعشعی، شاخه‌های هادی تاخوردی قرار گرفته‌اند.

معمولاً در فرکانس‌های میکروویوی می‌توان از ساختاری تشکیل شده از دی‌الکتریک به اضافه فلز کمک گرفت. در این مواد، با توجه به ویژگی‌هایی که دارند قوانین فیزیک نقض می‌شود، برای مثال قانون اسنل^۲ همواره در این مواد برقرار نیست [۵]. به‌طور کلی فرا مواد به دودسته تشدید شونده و تشدید نشونده تقسیم می‌شوند. در نوع تشدید شونده که موضوع مورد بحث در این مقاله است، دوره تناوب در حدود ۱۰ برابر طول موج است. ولی در دسته تشدید نشونده‌ها این عدد بسیار کوچک‌تر از طول موج بوده و از طرف دیگر هیچ تشدید رخ نمی‌دهد و تشدید اصولاً در فرکانس‌های بسیار بالا ایجاد خواهد شد [۶]. به‌صورت خلاصه بر اساس علامت μ و ϵ ، فرا مواد به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. در دسته اول μ و ϵ دارای علامت مثبت بوده، در دسته دوم یکی از آن‌ها مثبت و دیگری منفی و نهایتاً در دسته سوم هر دو دارای علامت منفی هستند. در این تقسیم‌بندی در واقع موادی که دارای μ و ϵ مثبت هستند، مواد طبیعی بوده و به مواد (دست-راستی) معروف‌اند در حالیکه موادی با μ و ϵ هر دو منفی، مواد (دست - چپی) نامیده شده و دارای ضریب بازتاب منفی هستند ($n < 0$) و به‌صورت مصنوعی ساخته می‌شوند. لذا اگر μ و ϵ توأماً منفی باشند، معادلات به صورتی تغییر می‌کنند که H یا E منفی در نظر گرفته شود، لذا به دلیل وابستگی این دو به بردار موج می‌توان K را منفی در نظر گرفت و این بدین معنی است که قانون دست-راست صادق نبوده و K در جهت منفی قرار دارد یا به عبارت ساده‌تر قانون دست-چپ برای آن صادق خواهد بود.

برای ساخت یک فرا مواد، از یک‌لایه دی‌الکتریک که غالباً به‌صورت مکعبی شکل با ضخامت کم (در حد میلی‌متر) است به‌عنوان لایه اصلی که همان زیر لایه نیز نامیده می‌شود، استفاده شده و با قرارگیری لایه‌های فلزی بر روی سطح آن یک تشدیدکننده به وجود می‌آید. استفاده از لایه‌های فلزی روی دی‌الکتریک سبب به وجود آمدن مدارات سلفی خازنی در کل حجم یک سلول واحد می‌شود بطوریکه مدار معادل آن دارای یک فرکانس تشدید باشد. کاربرد این ساختارها در طراحی موجبرها، فیلترها، کولرها و بخصوص در مبحث آنتن‌ها به‌سرعت در حال گسترش است. با پیشرفت فناوری و به‌تناسب آن پیشرفت ارتباطات بی‌سیم نیاز به افزایش سرعت و حجم انتقال اطلاعات نیز بیش از پیش احساس می‌شود. به عنوان نمونه در آنتن‌های چند ورودی و چندخروجی (MIMO^۳) با استفاده از خاصیت کنترل امواج الکترومغناطیسی، با استفاده از متامتریال‌ها، می‌توان ایزولاسیون بین آنتن‌ها را در حد قابل قبولی بهبود بخشید. متامتریال‌ها این قابلیت را دارند که با کنترل جریان‌های سطحی بر روی صفحه زمین آنتن تزویج بین آنتن‌ها را مهارکنند و موجب بهبود پارامترهای سیستم‌های MIMO شوند. در استفاده از متامتریال‌ها برای کاهش تزویج بین آنتن‌ها بر خلاف روش‌های مرسوم مانند دایورسیتی پترن و پلاریزاسیون تعداد آنتن‌ها مهم نبوده و با هر تعداد آنتن، پترن تشعشعی تقریباً یکسانی را تضمین می‌کند [۷].

برای افزایش بهره و پهنای باند آنتن‌های پنج میکرواستریپ می‌توان از فرا مواد به عنوان لایه بالایی استفاده کرد. در این آنتن‌ها فرا ماده به شکل امگای تغییر شکل یافته است که حول فرکانس تشدید در فرا ماده معرفی شده و دارای ضریب نفوذ مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی منفی می‌باشند. فرا ماده حاصل، از انتشار امواج سطحی ایجاد شده بر روی آنتن پنج جلوگیری کرده و باعث بهبود پارامترهای تشعشعی آنتن می‌شود. برای بررسی عملکرد لایه بالایی در مرجع [۸]، ابتدا یک آنتن پنج مستطیلی در باند C طراحی شده و سپس با به کارگیری فرا ماده معرفی شده به‌عنوان لایه بالایی، بهره آنتن در حدود ۱۱۶ درصد و پهنای باند آنتن در حدود ۹۰ درصد افزایش داده شده است.

آنتن MTM^۴ پیشنهادی در این مقاله، دارای چهار باند فرکانسی ۲/۳۶-۲/۵۰ گیگاهرتز، ۴/۷۴-۵/۵۰ گیگاهرتز، ۶/۶۴-۶/۷۵ گیگاهرتز و ۸/۶۳-۸/۷۹ گیگاهرتز به ترتیب در فرکانس‌های رزونانس ۲/۴۲، ۵، ۶/۷ و ۸/۷ گیگاهرتز است. با توجه به باندهای فرکانسی اشاره‌شده، آنتن پیشنهادی می‌تواند برای کاربردهای Bluetooth^۵ و ISM^۵ در باند فرکانسی ۲/۴ گیگاهرتز، WLAN در

¹ via

² Snell's law

³ Multiple Input, Multiple Output

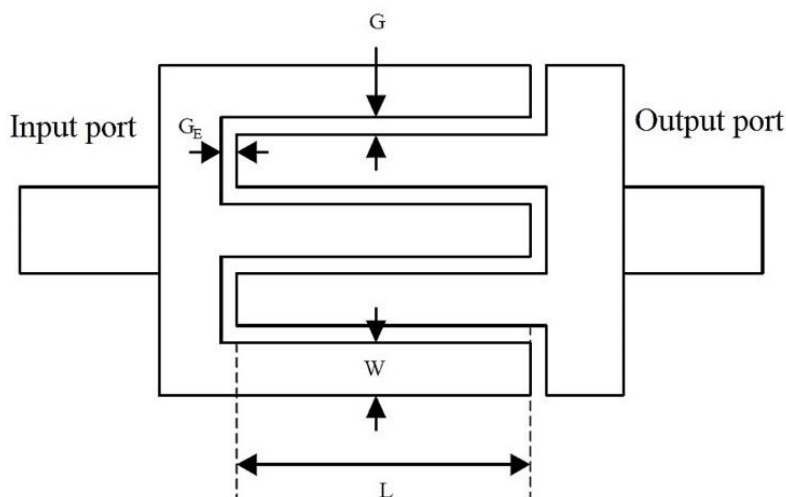
⁴ Metamaterial

⁵ Industrial, Scientific, and Medical

باند فرکانسی ۵/۳۵-۵/۱۵ گیگاهرتز، کاربردهای ماهواره‌ای در باند فرکانسی C (۴-۸ گیگاهرتز) و کاربردهای رادار در باند فرکانسی X (۸-۱۲ گیگاهرتز) مفید باشد.

۲- ساختارهای خازنی متقابل (IDC) Interdigital Capacitor

خازن بین انگشتی، المانی است که از خطوط میکرواستریپ تشکیل شده و می‌تواند یک خاصیت خازن مانند با ویژگی عبور بالا از خود نمایش دهد. شکل ۱ ساختار خازن بین انگشتی را به همراه پارامترهای آن نمایش می‌دهد. توجه داشته باشیم که شاخه‌های (انگشت‌های) با طول بیشتر می‌توانند بین پورت ورودی و خروجی ایجاد کوپلینگ نمایند [۹]. معمولاً فاصله بین انگشت‌ها (G) و فاصله انتهایی انگشت‌ها (GE) یکسان انتخاب می‌شوند. همچنین طول انگشت‌ها (L) و عرض آن‌ها (W) مشخص بوده و هنگام طراحی تعیین می‌شوند.



شکل ۱: ساختار خازن بین انگشتی (IDC)

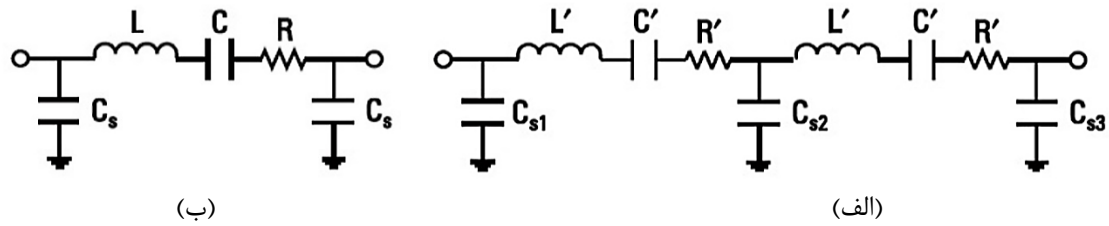
از آنجاکه بازوهای هادی در این ساختار بر روی زیر لایه قرار می‌گیرند، ویژگی‌های آن‌ها بر روی عملکرد سیستم تأثیر خواهد داشت؛ بنابراین ضخامت زیر لایه (h) و ضریب گذردهی آن (ϵ_r) از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۹]. اگر فضای اشغال شده توسط المان IDC در مقایسه با طول موج کوچک باشد، می‌توان آن را یک المان فشرده یکپارچه میکروویوی و یا فناوری چاپ بر روی فیبر مدار چاپی با استفاده از خطوط میکرو استریپی پیاده‌سازی کرد. ظرفیت خازنی کل که از المان‌های IDC می‌توان به دست آورد از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$C = (\epsilon_r + 1)l[(N-3)]A_1 + A_2 \quad (PF) \quad (1)$$

$$A_1 = 4.409 \tanh[0.55(h/w)^{-0.45}] \times 10^{-6} \quad (PF / \mu m) \quad (2)$$

$$A_2 = 9.92 \tanh[0.52(h/w)^{-0.5}] \times 10^{-6} \quad (PF / \mu m) \quad (3)$$

در این روابط، N تعداد بندهای انگشت مانند ساختار بوده و مقادیر تقریبی A_1 و A_2 از طریق روابط بالا محاسبه می‌شوند. همچنین مدار معادل ساختار IDC در شکل ۲ برای فرکانس‌های پایین و بالا رسم شده است [۱۱].

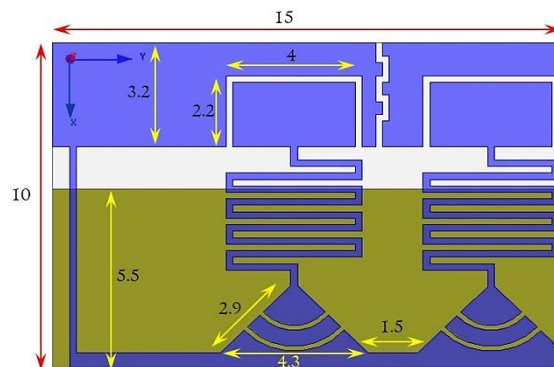


شکل ۲: ساختار خازن متقابل (IDC) برای، (الف) باند فرکانسی بالا (ب) باند فرکانسی پایین

وایاهای موجود در ساختار به عنوان سلف موازی هم استفاده می‌شوند. همچنین با ایجاد شیارهایی به شکل خازن اینتر دیجیتال، خازن سری در ساختار ایجاد شده که علاوه بر آن نقش عنصر تشعشع کننده را هم دارند. ایجاد خازن اینتر دیجیتال باعث می‌شود تا فرکانس‌های تشدید از مرتبه منفی تولید شوند که منجر به انتشار موج در زیر فرکانس قطع مد اصلی می‌شوند که این به معنای کوچک شدن اندازه ساختار و در نتیجه اندازه آنتن است.

۳- ساختار آنتن پیشنهادی

شکل ۳ پیکربندی آنتن متامتریال پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. تغذیه این آنتن MTM به صورت خط میکرواستریپ بوده و از دو المان خازن بین انگشتی متصل به استاب مثلثی شکل شکاف دار تشکیل شده است. ابعاد کلی این آنتن 10×15 میلی‌متر مربع بوده و بر روی یک لایه FR4 با ضریب گذردی $4/4$ و تانژانت تلفات 0.02 و ضخامت $1/6$ میلی‌متر چاپ شده است. بر روی این لایه المان‌های تشعشعی و ساختارهای IDC قرار گرفته و در پشت زیر لایه، یک صفحه زمین به ابعاد $15 \times 3/2$ میلی‌متر مربع قرار دارد. این آنتن دارای ساختاری نامتقارن بوده و به وسیله یک خط میکرواستریپ 50 اهمی تغذیه می‌شود. در واقع قسمتی از لایه فوقانی که دارای عرض $3/2$ میلی‌متر بوده به همراه صفحه زمین در لایه تحتانی و در طرف مقابل، خط تغذیه آنتن را تشکیل داده و محل اتصال SMA^1 به آنتن می‌باشند. المان‌های IDC از 9 بازو (انگشت^۲) با ابعاد $3/8 \times 0.2$ میلی‌متر مربع تشکیل شده و در انتها به یک پیچ مثلثی شکل با دو شکاف شعاعی^۳ به طول‌های 3 و 2 میلی‌متر و عرض 0.15 میلی‌متر متصل می‌شوند.



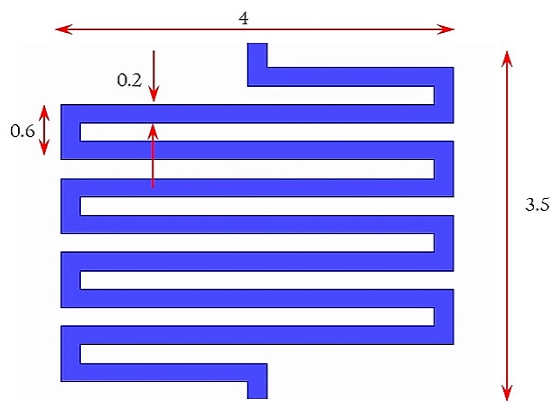
شکل ۳: آنتن متامتریال پیشنهادی

ساختار المان IDC به کاررفته در آنتن پیشنهادی در این مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت تسهیل در انجام محاسبه ظرفیت خازنی تولیدشده توسط المان IDC می‌توان از نرم‌افزارهای موجود نیز استفاده کرد. یک نمونه از این نرم‌افزارهای آنلاین به صورتی است که با وارد نمودن اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار، ظرفیت خازنی IDC محاسبه می‌شود [۱۲].

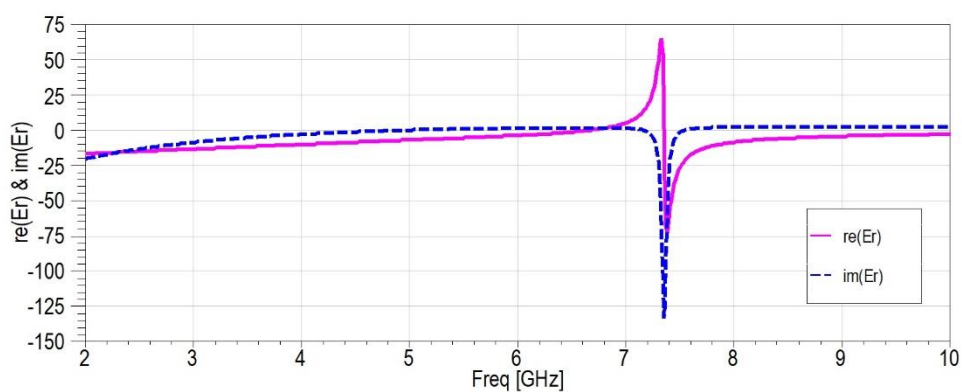
¹ SubMiniature version A

² Finger

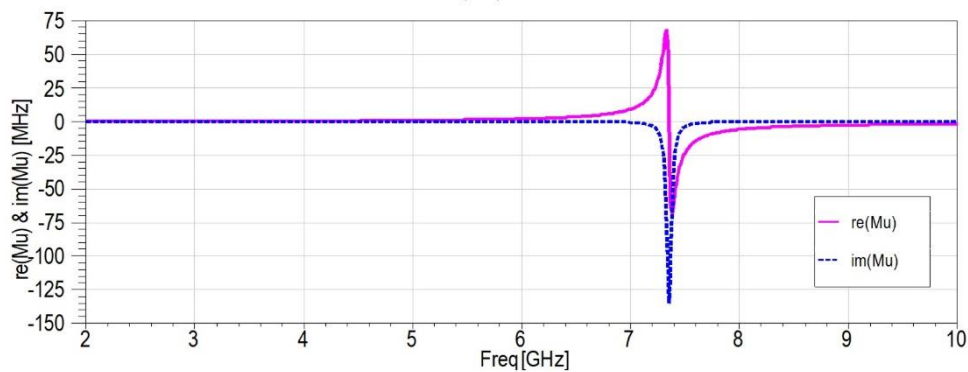
³ Radial



شکل ۴: ساختار IDC به کاررفته در آنتن متامتریال پیشنهادی



(الف)



(ب)

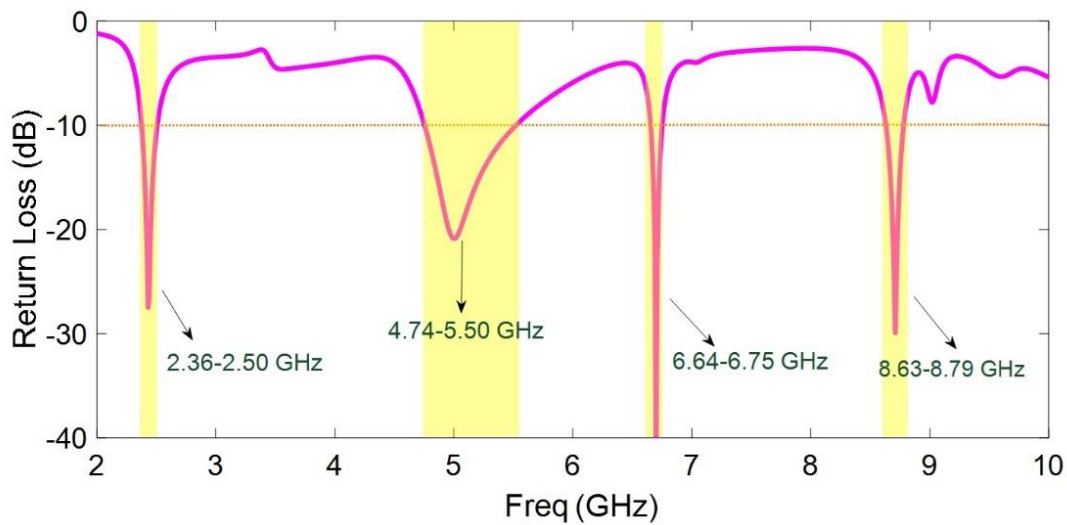
شکل ۵: نتایج مربوط به المان IDC (الف) ضریب گذردهی الکتریکی و (ب) ضریب نفوذ مغناطیسی

در شکل ۵ مقادیر حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذ مغناطیسی المان IDC نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، مشاهده می شود که مقادیر حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذ مغناطیسی این المان در فرکانس ۴/۷ گیگاهرتز همزمان منفی می شوند. این موضوع نشان می دهد که المان IDC به کار رفته دارای مشخصات مواد متامتریال بوده و خواص دست چپی از خود نمایش می دهد.

۴- نتایج شبیه سازی آنتن پیشنهادی

شکل (۶) نتایج پارامترهای S این آنتن را نشان می دهد. با توجه به منحنی S_{11} شکل ۶، آنتن MTM پیشنهادی دارای پهنای باندهای فرکانسی ۲/۳۶-۲/۵۰ گیگاهرتز، ۴/۷۴-۵/۵۰ گیگاهرتز، ۶/۶۴-۶/۷۵ گیگاهرتز و ۸/۶۳-۸/۷۹ گیگاهرتز به ترتیب در فرکانس های رزونانس ۲/۴۲، ۵، ۶/۷ و ۸/۷ گیگاهرتز است.

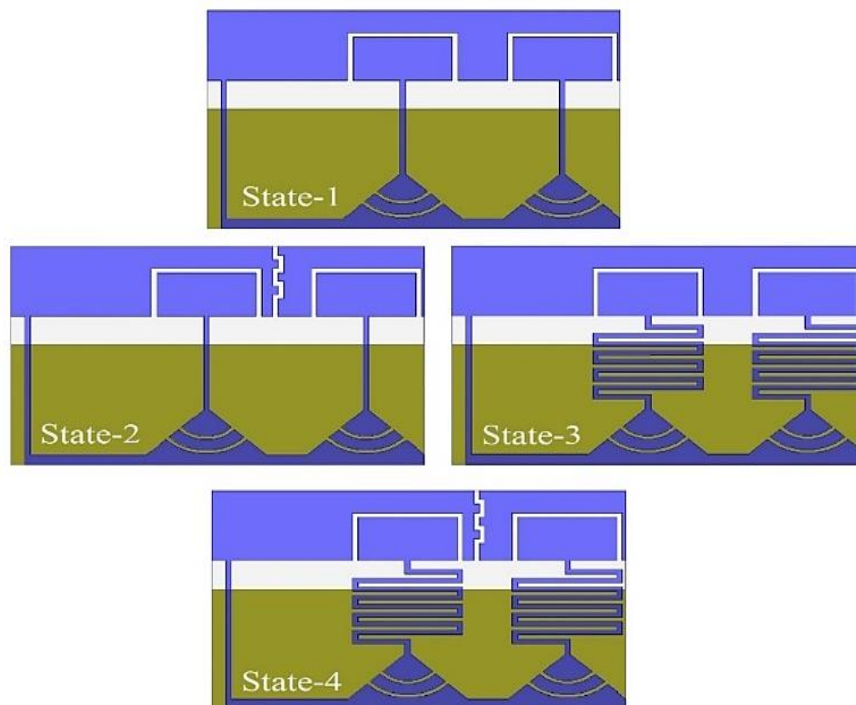
با توجه به باندهای فرکانسی اشاره شده، آنتن پیشنهادی می تواند برای کاربردهای Bluetooth و ISM در باند فرکانسی ۲/۴ گیگاهرتز، $WLAN^1$ در باند فرکانسی ۵/۱۵-۵/۳۵ گیگاهرتز، کاربردهای ماهواره ای در باند فرکانسی C (۸-۴ گیگاهرتز) و کاربردهای رادار در باند فرکانسی X (۱۲-۸ گیگاهرتز) مفید باشد.



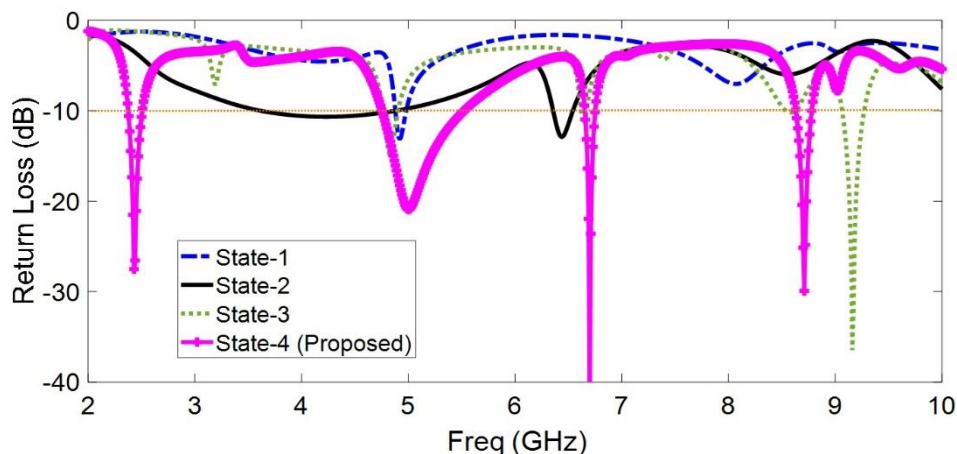
شکل ۶: منحنی S_{11} آنتن MTM پیشنهادی

برای ارائه درک بهتری از عملکرد المان های IDC در آنتن پیشنهادی، در شکل ۷ سیر تکاملی طراحی آنتن پیشنهادی نشان داده شده است. همچنین نتایج این روند تکاملی در شکل ۸ به صورت نمودارهای افت بازگشتی رسم شده است. با توجه به شکل ۷، آنتن در حالت اول، فقط شامل خط میکرواستریپ، صفحه زمین و پیچ های تشعشی مثلثی شکل است.

¹ Wireless Local Area Network



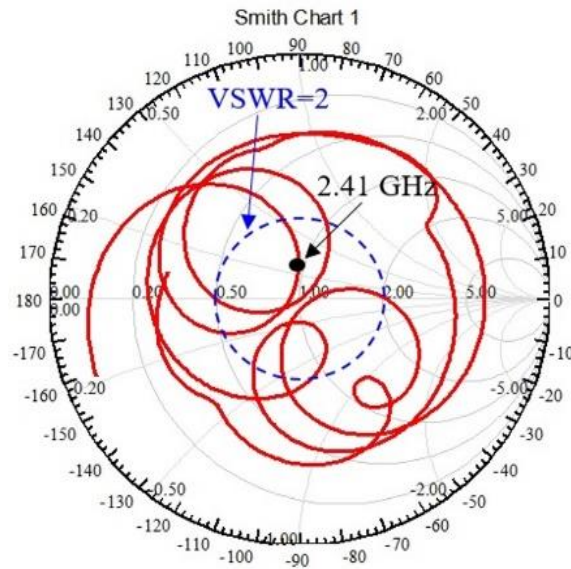
شکل ۷: سیر تکاملی طراحی آنتن MTM پیشنهادی



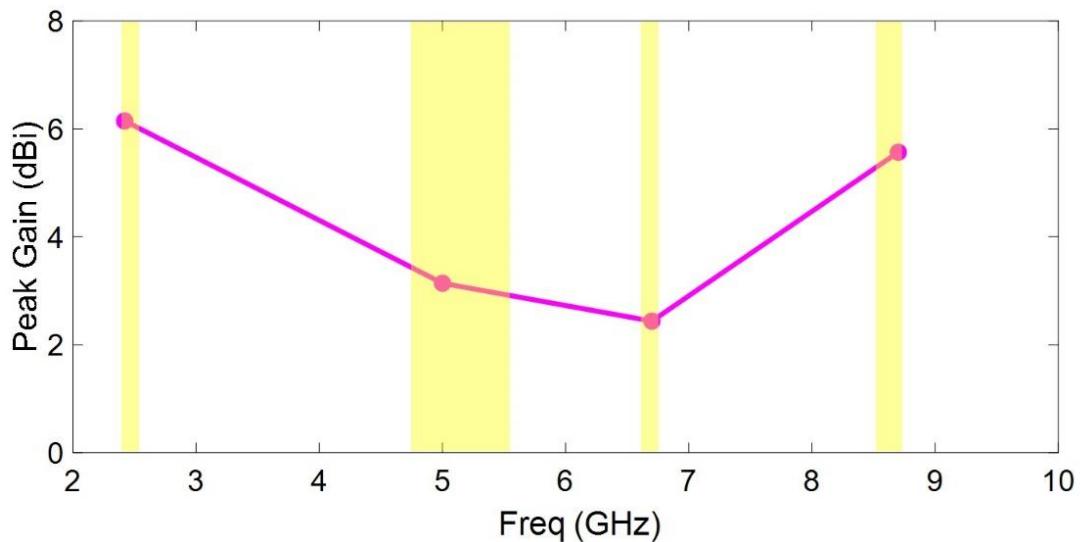
شکل ۸: نتایج افت بازگشتی سیر تکاملی آنتن MTM پیشنهادی

در این مرحله المان‌های IDC به پیچ‌های تشعشعی هنوز اضافه نشده‌اند و خط میکرواستریپ نیز شکاف IDC را ندارد. در مرحله دوم، شکاف IDC به خط میکرواستریپ بین دو المان اضافه می‌شود؛ و پیچ‌های مثلثی به صورت مستقیم به خط میکرواستریپ متصل هستند. در مرحله سوم، شکاف IDC از خط میکرواستریپ حذف شده و المان‌های IDC به پیچ‌های تشعشعی متصل می‌شوند؛ و در نهایت در مرحله آخر (مرحله چهارم) هم شکاف IDC به خط میکرواستریپ و هم المان IDC به پیچ‌های تشعشعی اضافه می‌شوند و ساختار نهایی آنتن را تشکیل می‌دهند. با توجه به منحنی‌های شکل ۸، شکاف IDC خط میکرواستریپ در مرحله سوم مسئول ایجاد رزونانس در فرکانس ۶/۵ گیگاهرتز بوده و المان IDC در کنار پیچ‌های تشعشعی رزونانس را در فرکانس ۹ گیگاهرتز ایجاد می‌نماید. همچنین با توجه به شکل آنتن در مرحله چهارم، به خوبی مشاهده می‌شود که همکاری المان‌های IDC متصل به پیچ‌ها و شکاف IDC روی خط میکرواستریپ، رزونانس‌های قبلی را تقویت کرده و علاوه بر آن یک رزونانس ارزشمند در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز تولید می‌نماید. این موضوع به خوبی در نمودار امپدانس مشخصه آنتن شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، در مرحله چهارم طراحی و با همکاری تمام المان‌های IDC هم بر روی خط میکرواستریپ و هم

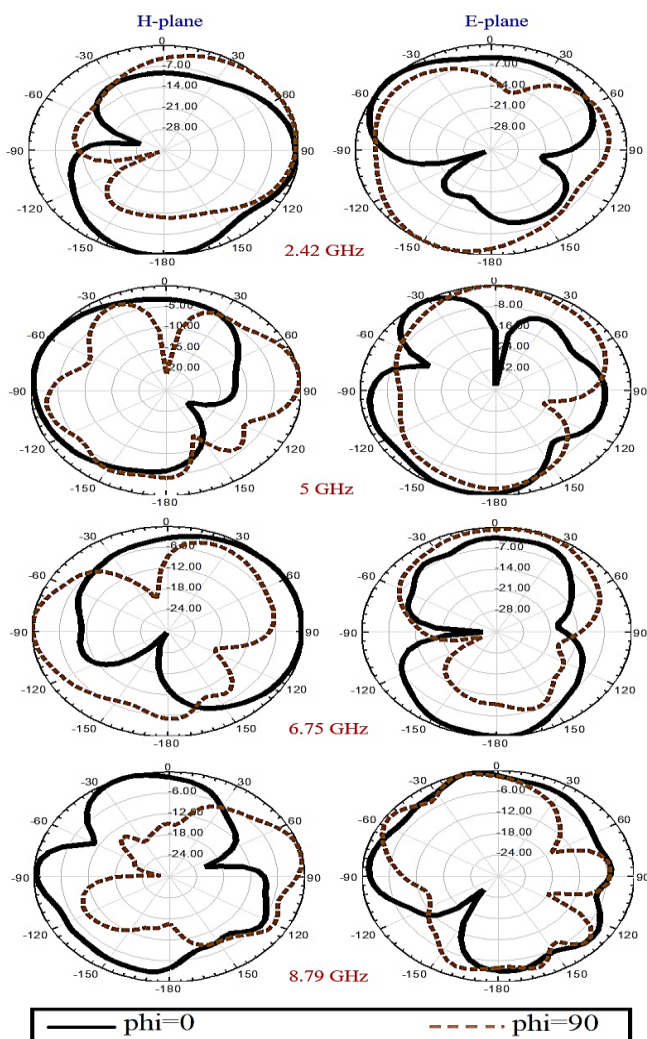
کنار پچ‌های تشعشعی، یک خاصیت خازنی در فرکانس رزونانس $2/41$ گیگاهرتز مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ بهره آنتن پیشنهادی در چهار باند فرکانسی مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودار بهره، آنتن MTM پیشنهادی در فرکانس رزونانس $2/41$ گیگاهرتز دارای بیشینه بهره $6/14$ دسی‌بل، در فرکانس رزونانس 5 گیگاهرتز $3/14$ دسی‌بل، در فرکانس رزونانس $6/7$ گیگاهرتز $2/44$ دسی‌بل و در فرکانس رزونانس $8/7$ گیگاهرتز دارای بهره $5/56$ دسی‌بل است.



شکل ۹: نمودار اسمیت آنتن مربوط به مرحله چهارم طراحی



شکل ۱۰: بهره شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در باندهای فرکانسی



شکل ۱۱: پترن تشعشی E-plane و H-plane آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های رزونانس

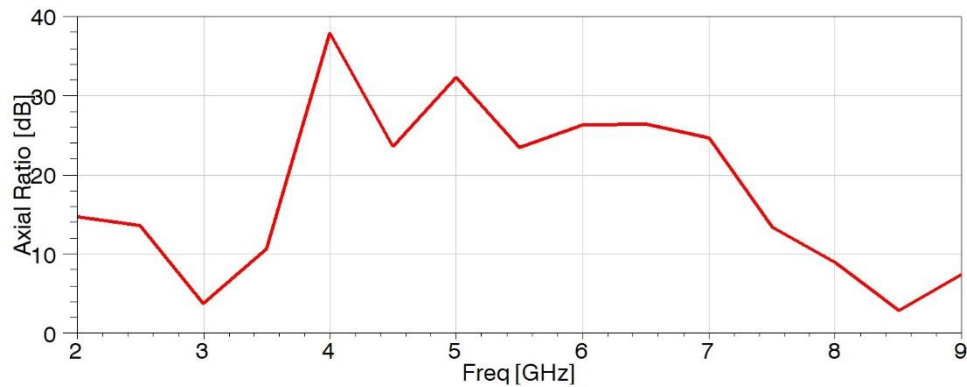
شکل ۱۱ پترن تشعشی E-plane و H-plane آنتن پیشنهادی را در فرکانس‌های رزونانس خود نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، می‌توان نتیجه گرفت که آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های رزونانس خود دارای پترن تقریباً پایدار بوده و یک تشعشع همه جهته از آنتن مشاهده می‌شود.

جهت بررسی وجود یا عدم وجود پلاریزاسیون دایروی آنتن پیشنهادی، منحنی نسبت محوری این آنتن در شکل ۱۲ رسم شده است. با توجه به شکل و ملاحظه مقدار بسیار بالای نسبت محوری، نتیجه گرفته می‌شود که آنتن پیشنهادی در بازه فرکانسی خود دارای پلاریزاسیون خطی است. طبق تعریف اگر بردار یک میدان الکتریکی در یک نقطه از فضا در جهت یک خط مستقیم در هر لحظه از زمان جهت‌گیری کند، میدان هارمونیک زمانی^۱ در آن نقطه از فضا پلاریزاسیون خطی دارد. اگر بردار میدان الکتریکی به یکی از دو صورت زیر باشد، گفته می‌شود که پلاریزاسیون خطی دارد:

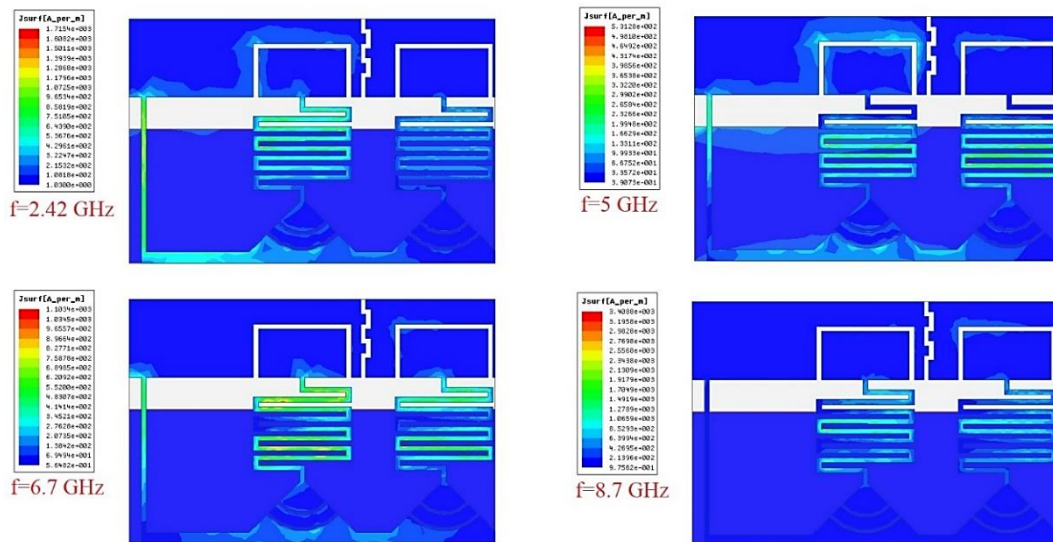
- فقط یک مؤلفه داشته باشد.
- دو مؤلفه متعامد با پلاریزاسیون خطی داشته باشد که هم‌فاز هستند یا اختلاف‌فاز آن‌ها مضرب صحیحی از 180° درجه است.

¹ Time Harmonic

در این نمودار با توجه به تعاریف گفته شده، اگر در مقدار عدد ۱۰ بروی محور عمودی خطی به موازات محور افق رسم کنیم، بیشترین مقدار نمودار بالای محور افق قرار خواهد گرفت و این نشانه خطی بودن نمودار است.



شکل ۱۲: منحنی نسبت محوری آنتن پیشنهادی

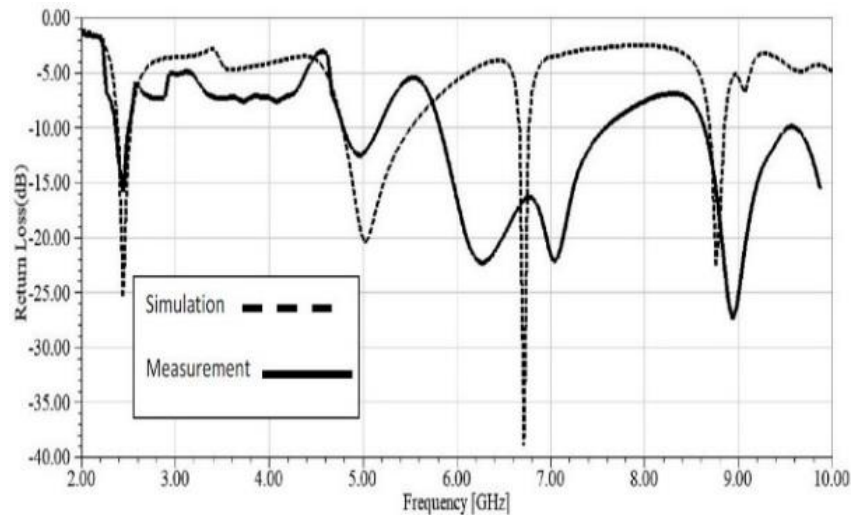


شکل ۱۳: توزیع جریان‌های سطحی آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های رزونانس

جهت بررسی عملکرد المان MTM به کار رفته در طراحی آنتن، توزیع جریان‌های سطحی آن در چهار فرکانس رزونانس ۲/۴۲، ۵، ۶/۷ و ۸/۷ گیگاهرتز در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که تمرکز جریان‌های سطحی در این چهار فرکانس بر روی المان IDC (بر روی خط میکرواستریپ) است.

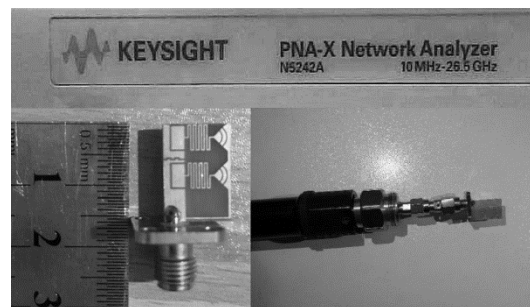
۵- نتایج ساخت و تست آنتن پیشنهادی

آنتن پیشنهادی در این مقاله، پس از طی مراحل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، ساخته شد و در آزمایشگاه آنتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه توسط دستگاه تحلیل‌گر شبکه Keysight مدل N5242A تحت تست و آزمایش قرار گرفت. شکل ۱۴ مقایسه بین نتایج تست و شبیه‌سازی آنتن MTM ساخته شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در تمام مراحل شبیه‌سازی آنتن ارائه شده در این مقاله، از نرم افزار HFSS Ver.13 استفاده شده است.



شکل ۱۴: مقایسه نتایج تست و شبیه‌سازی آنتن MTM ساخته‌شده

با توجه به شکل، مقداری اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که این موضوع ناشی از وجود خطاهای انسانی هنگام ساخت و تست آنتن بوده و همچنین وجود نویز و تأثیر کانکتور نیز در شدت گرفتن این خطاها مؤثر هستند.



شکل ۱۵: عکس آنتن MTM ساخته‌شده

شکل ۱۵ نمونه اولیه آنتن MTM ساخته‌شده در این مقاله را به همراه یک عدد کانکتور متصل به پورت آن نشان می‌دهد. در مرجع [۱۳] یک آنتن تمام‌تریال میکرواستریپی با تغذیه موجبر هم سطح معرفی شده است که از دو استاپ مثلثی شکل به عنوان تشعشع‌کننده با ایجاد اسلات در صفحه زمین تشکیل شده است. این آنتن دارای دو باند کاری در بازه‌ی فرکانسی ۳/۴-۵/۱۱-۵/۳۹ گیگاهرتز است. ابعاد این آنتن $۱۸ \times ۱۲/۵ \times ۱/۵۷$ میلی‌متر مکعب بوده بر روی زیر لایه‌ی Rogers RT/Duroid ۳/۴ و ۵۸۸۰ با ضریب گذردهی ۲/۲ و تانژانت تلفات ۰/۰۲ ساخته شده است. در جدول ۱ نتایج آنتن ارائه شده در این مقاله با آنتن مرجع [۱۳] مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۱: مقایسه نتایج آنتن پیشنهادی با آنتن مرجع [۱۳]

آنتن	سایز (mm^2)	پهنای باند امیدانسی (درصد)	تعداد مود رزونانسی	ماکزیمم بهره (dB)
آنتن مرجع	$۱۸ \times ۱۲/۵$	۶/۶ %	۲	۳/۹
آنتن پیشنهادی	۱۵×۱۰	۱۰/۷۴ %	۴	۶

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن چهار بانده میکرواستریپی با استفاده از ساختارهای متامتریال نامتقارن و با استفاده از دو المان تشعشعی یکسان و یک صفحه زمین در قسمت پشتی باعث ایجاد چهار مود رزونانسی در فرکانس‌های ۳/۱۹ (۱/۲۵٪) گیگاهرتز، ۶/۲۲ (۱۰/۷۴٪) گیگاهرتز، ۷/۱۸ (۵/۱۹٪) گیگاهرتز و ۹/۱۲ (۴/۵۲٪) گیگاهرتز است. آنتن پیشنهادی دارای ابعاد مینیاتوری به صورت ۱۰×۱۵ میلی‌متر مربع است که از لحاظ اندازه نیز ابعاد کوچکی دارد و همچنین آنتن پیشنهادی دارای ماکزیمم بهره ۶ دسی بل است که با توجه به ابعاد آنتن قابل ملاحظه است.

مراجع

- [1] S. Sharma and R. Mehra, "Printed Monopole Slot Antenna Inspired by Metamaterial Unit Cell for Wireless Applications," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 413-424, 2021.
- [2] B. Swamy, C. Tavade and K. Singh, "A ring monopole quad band antenna loaded with metamaterial and slots for wireless applications," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 5, pp. 2716-2723, 2021, doi:10.11591/eei.v10i5.3185.
- [3] K. Hossain et al., "A Negative Index Nonagonal CSRR Metamaterial-Based Compact Flexible Planar Monopole Antenna for Ultrawideband Applications Using Viscose-Wool Felt," *Polymers*, vol. 13, no. 16, p. 2819, 2021, doi:10.3390/polym13162819.
- [4] B. Zong, G. Wang, C. Zhou and Y. Wang, "Compact Low-Profile Dual-Band Patch Antenna Using Novel TL-MTM Structures," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 567-570, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2372093.
- [5] M. S. Majedi and A. R. Attari, "Dual-band resonance antennas using epsilon negative transmission line," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 4, pp. 259-267, 2013, doi:10.1049/iet-map.2012.0542.
- [6] H. Lee, D.-J. Woo and S. Nam, "Compact and Bandwidth-Enhanced Asymmetric Coplanar Waveguide (ACPW) Antenna Using CRLH-TL and Modified Ground Plane," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 810-813, 2016, doi: 10.1109/LAWP.2015.2476340.
- [7] D. A. Ketzaki and T. V. Yioultis, "Metamaterial-Based Design of Planar Compact MIMO Monopoles," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 5, pp. 2758-2766, 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2243813.
- [8] K.-L. Wong, Compact and broadband microstrip antennas. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [9] Overview on Interdigital Capacitor Design – KeysightS. www.agilent.com/ fi nd/eesof.
- [10] <http://www.rfwireless.world.com/calculators/interdigital-capacitor>.
- [11] R. S. Beeresha, A. M. Khan and H. V. M. Reddy, "Design And Optimization Of Interdigital Capacitor," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 05, no. 33, pp. 73-78, 2016, doi:10.15623/ijret.2016.0533016.
- [12] "RF Wireless World," Interdigital capacitor calculator | converters and calculators. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/calculators/interdigital-capacitor-calculator.html>.
- [13] A. Gupta and R. K. Chaudhary, "The Metamaterial Antenna: A Novel Miniaturized Dual-Band Coplanar Waveguide-Fed Antenna with Backed Ground Plane," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 4, pp. 41-48, 2018, doi: 10.1109/MAP.2018.2839894.