

آنتن آرایه ای موج میلی متری فرامواد برای کاربردهای بی سیم نسل پنجم

اصغر بختیاری^{*1}

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران.

چکیده

سیستم های ارتباطی بی سیم نسل پنجم از باندهای فرکانسی موج میلی متری بهره می برند تا به طیف های بسیار گسترده ای دست یابند که امکان انتقال داده با نرخ های فوق العاده بالا را فراهم می کند. برای پاسخ گویی به نیازهای پیچیده و پیشرفته این سیستم ها، طراحی آرایه های آنتن با عملکرد بهینه و بهره وری بالا، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. در این مقاله، طراحی و تحلیل عملکرد آرایه های آنتن موج میلی متری با بهره مندی از ویژگی های مطلوب فرامواد به صورت تک عنصری، 1×2 و 1×4 پیشنهاد شده است. عناصر آنتن پیشنهادی بر روی زیرلایه Rogers 5880 (با مشخصات الکتریکی $\epsilon_r=2.2$ و $h=0.35$ mm) برای کار در فرکانس مرکزی ۳۸ گیگاهرتز طراحی شده اند. در شبیه سازی آنتن پیشنهادی تک عنصری، 1×2 و 1×4 ، تلفات برگشتی، پهنای باند، بهره، نسبت موج ایستاده ولتاژ و بازده کل به ترتیب برابر است با: -82.95 دسی بل، 67.1 دسی بل، 69.12 دسی بل، 1.971 گیگاهرتز، 2.278 گیگاهرتز، 4.704 گیگاهرتز؛ 7.36 دسی بل، 9.11 دسی بل، 11.4 دسی بل؛ 1.001432 ، 1.0009 ، 1.0007 ؛ و 95.55% ، 94.01% ، 95.87% ، استفاده از فرامواد، توزیع جریان روی پچ تشعشی را بهینه نموده و میدان های لبه ای را در حاشیه پچ تقویت می کند که این تغییرات منجر به افزایش بازده تشعشی آنتن و کاهش چشمگیر تلفات موج سطحی در صفحه زمین آنتن می شود. آنتن آرایه ای پیشنهادی با رفع نقاط ضعف موجود در طراحی های پیشین، ضمن بهبود پارامترهای کلیدی، توانسته اند نیازهای سیستم های ارتباطی نسل پنجم را در باندهای فرکانسی موج میلی متری با کارایی بالا برآورده سازند. واژه های کلیدی: موج میلی متری، آنتن پچ مایکرواستریپ، فرامواد، تشدیدگر حلقه شکاف دار.

تاریخ دریافت:

۴ آذر ماه ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۲۵ آذر ماه ۱۴۰۳

Metamaterial millimeter-wave array antenna for 5G wireless applications

Asghar Bakhtiari^{*1}

1. Assistant Prof. Faculty of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran.

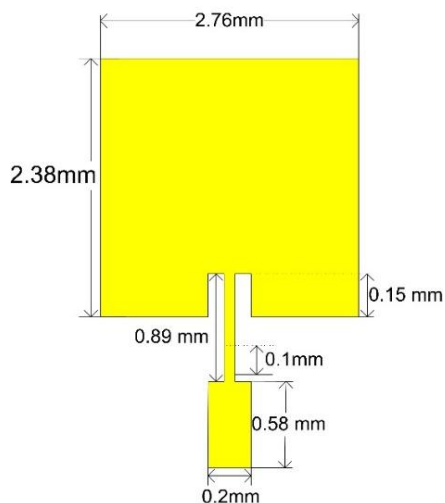
Abstract

Fifth-generation (5G) wireless communication systems utilize millimeter-wave frequency bands to achieve ultra-wide bandwidth for high-data-rate transmission. To meet the system's requirements, optimal design of high-performance antenna arrays is essential. Therefore, this paper proposes the design and performance analysis of metamaterial-inspired millimeter-wave antenna arrays in single, 2×1 , and 4×1 configurations. The antenna elements, operating at a center frequency of 38 GHz, are designed using Rogers 5880 as the substrate material with a dielectric constant of 2.2 and a thickness of 0.35 mm. In the simulated design of the single, 2×1 , and 4×1 arrays, the return loss, bandwidth, gain, voltage standing wave ratio (VSWR), and total efficiency are -82.95 dB, -67.1 dB, -69.12 dB; 1.971 GHz, 2.278 GHz, 4.704 GHz; 7.36 dB, 9.11 dB, 11.4 dB; 1.001432, 1.0009, 1.0007; and 95.55%, 94.01%, 95.87%, respectively. Compared to previous works, considering the impact of metamaterials on the radiator and ground plane of microstrip patch antennas, improved performance is achieved. The selected type of metamaterial alters the radiation current distribution of the patch, enhancing the edge fields at the patch edges, which improves antenna radiation and reduces surface wave losses in the ground plane of the radiators. The proposed antenna arrays address the shortcomings of older designs and meet the needs of 5G communication systems.

Key words: Meta-material, Split Ring Resonator (SRR), millimeterwave, Directivity.

این، کار در [۸] نیز استفاده از فراموادها را به عنوان حالت فوق در آنتن‌های طراحی شده گزارش کرده است. همچنین، یک فرامواد فشرده [۹] و آرایه‌های مسطح با باند فوق گسترده [۱۰] از شکاف فرامواد به عنوان تشدیدگر اصلی و موجبر هم‌صفحه در قسمت تغذیه طراحی شده‌اند. به طور مشابه، یک موج میلیمتری فرامواد که در یک تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار فرکانسی بارگذاری شده که در ۲۸ گیگاهرتز کار می‌کند در [۱۱] برای افزایش پهنای فراموادها با استفاده از ساختار تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار فرکانسی روی لایه زیرلایه ارائه شده است.

مطالعات پیشین عمدتاً بر طراحی آنتن‌های مبتنی بر فرامواد متمرکز بوده‌اند و بهبودهایی در برخی از پارامترهای کلیدی حاصل شده است. با این حال، برای طراحی آنتن‌های تشعشعی فشرده که بتوانند نیازهای شبکه‌های موبایل نسل پنجم و فراتر از آن را برآورده کنند، همچنان چالش‌های متعددی وجود دارد. از یک سو، آنتن‌های ارائه شده در پژوهش‌های موجود معمولاً فاقد فرکانس تشدید مشترک هستند و پلاریزاسیون متقاطع این آنتن‌ها منجر به مشکلاتی نظیر کوری آرایه و کاهش پهنای باند می‌شود. از سوی دیگر، تعامل میان فرامواد و آنتن که تأثیر قابل توجهی بر توزیع جریان و به تبع آن عملکرد آنتن دارد، به طور کامل بررسی نشده است. برای رفع این محدودیت‌ها، در این پژوهش طراحی آرایه‌ای مبتنی بر فرامواد که در فرکانس ۳۸ گیگاهرتز تشدید می‌کند، پیشنهاد شده است. هدف اصلی، دستیابی به یک آنتن با عملکرد کلی بالا و ابعاد فشرده است که از خواص مصنوعی فرامواد بهره‌مند باشد. در این راستا، یک فرآیند طراحی گام‌به‌گام برای تحلیل تأثیر فرامواد بر سناریوهای انتشار تعریف شده است. همچنین، خواص فرامواد برای رفع چالش‌های مربوط به پیچیدگی طراحی و عملکرد در فرکانس‌های بالاتر به دقت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ساختار مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲، طراحی آنتن پیشنهادی تشریح می‌شود. بخش ۳ به تحلیل شبیه‌سازی‌ها و بحث درباره نتایج اختصاص دارد. در نهایت، بخش ۴ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کلی را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- آنتن پیچ میکرواستریپ مستطیلی متعارف

سیستم‌های ارتباطی نسل پنجم (5G) با بهره‌گیری از طیف‌های فرکانسی متنوع از جمله زیر ۶ گیگاهرتز، ۲۴ گیگاهرتز، ۲۸ گیگاهرتز و ۳۸ گیگاهرتز، چشم‌انداز جدیدی را در فناوری ارتباطات بی‌سیم ایجاد کرده‌اند. این طیف‌ها به دلیل ارائه پهنای باند گسترده، نرخ انتقال داده بالا و تأخیر بسیار پایین، به عنوان ستون اصلی برای کاربردهای متنوع و پیشرفته مخابراتی انتخاب شده‌اند [۱]. در حوزه‌های صنعتی، استفاده از شبکه‌های 5G سبب بهبود سیستم‌های اتوماسیون کارخانه‌ها، افزایش بهره‌وری در کشاورزی هوشمند، و توسعه سامانه‌های رباتیک پیشرفته شده است. همچنین، در حوزه‌های پزشکی، کاربردهایی نظیر جراحی از راه دور و نظارت بلندرنج بر بیماران را امکان‌پذیر کرده است [۲-۴]. علاوه بر این، اینترنت اشیا (IoT) و شهرهای هوشمند از دیگر زمینه‌هایی هستند که با بهره‌گیری از قابلیت‌های شبکه 5G شاهد پیشرفت چشمگیری بوده‌اند. اتصال میلیاردها دستگاه IoT با نرخ انتقال داده قابل اعتماد و مصرف انرژی پایین، تنها بخشی از مزایای این فناوری است [۵]. در صنعت خودروسازی نیز، ارتباطات فوق سریع خودرو به خودرو (V2V) و خودرو به زیرساخت (V2I) برای ایجاد سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند تحقق یافته است [۶-۷]. به منظور دستیابی به این اهداف بلندپروازانه، طراحی آنتن‌های تشعشعی فشرده که قادر به کار در باندهای فرکانسی گسترده باشند، ضروری است. اخیراً تحقیقات گسترده‌ای برای توسعه آنتن‌های مبتنی بر فرامواد به منظور بهبود پارامترهایی نظیر پهنای باند، بهره‌وری تشعشع و کاهش تلفات دی‌الکتریک انجام شده است [۹-۱۰]. در ادامه، این مقاله به بررسی طراحی و عملکرد آنتن‌های مبتنی بر فرامواد برای کاربردهای شبکه 5G می‌پردازد. سیستم‌های ارتباطی نسل پنجم با استفاده از طیف‌هایی مانند زیر ۶ گیگاهرتز، ۲۴ گیگاهرتز، ۲۸ گیگاهرتز و ۳۸ گیگاهرتز، کاربردهای مخابراتی را متحول می‌کنند. این فرکانس‌ها به دلیل دسترسی به پهنای باند گسترده، توان عملیاتی بالاتر و تأخیر کم انتخاب شده‌اند که امکان کاربردهای بی‌سیم جدید متعددی را فراهم می‌کنند [۱]. برای تحقق چنین وعده‌هایی، باید آنتن‌های تشعشعی فشرده‌ای که قادر به کار در باندهای فرکانسی گسترده هستند، طراحی شوند. اخیراً، یک آنتن فرامواد با فناوری مینیاتوری‌سازی از طریق زیرلایه دی‌الکتریک با گذردهی منفی برای برآورده کردن این نیازها پیشنهاد شده است [۶]. در آنتن‌های میکرواستریپ از دیواره‌های اتصال کوتاه، بین‌های اتصال کوتاه، برخی تغییر شکل‌ها و هندسه فرکانس استفاده می‌شود. با این حال، عملکرد کلی چنین رویکردی محدود است زیرا پهنای باند باریک است، مقدار تلفات برگشتی بسیار بالاست و بازده تشعشعی نیز به دلیل تلفات موج سطحی و ناخواسته و تلفات دی‌الکتریک حداقل است [۲]. بنابراین، یک رویکرد طراحی جایگزین مبتنی بر استفاده از فراموادها برای رفع این مشکلات پیشنهاد شده است. در [۳-۵]، فراموادها به عنوان تشعشع‌کننده استفاده می‌شوند، در حالی که در [۶-۷] از آنها در زمین آنتن‌ها استفاده می‌شود. علاوه بر

۲- طراحی آنتن آرایه‌ای موج میلیمتری الهام گرفته از

فرامواد

در این بخش به ارائه روش طراحی آنتن آرایه‌ای فرامواد پیشنهادی برای کاربرد در سیستم‌های ارتباطی نسل پنجم در فرکانس ۳۸ گیگاهرتز ارائه می‌گردد. ابتدا، مراحل طراحی در آنتن پچ میکرواستریپ متعارف معرفی شده و سپس روند طراحی آنتن آرایه‌ای فرامواد پیشنهادی همراه با بررسی جزئیات درباره عملکرد آن ارائه خواهد گردید.

۱-۲- مراحل طراحی

در ابتدا، با استفاده از مراحل طراحی ارائه شده در [۲۰] ساختار فیزیکی متعارف تک عنصری به عنوان مدل اولیه ایجاد گردیده است. نمای جلویی ساختار آنتن پچ میکرواستریپ مستطیلی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش پیشین ذکر گردید، عملکرد چنین ساختاری با برخی تلفات محدود می‌شود. به عنوان مثال، به منظور دستیابی به پهنای باند وسیع، می‌توان ضخامت زیرلایه را افزایش داد. اما توجه به این نکته امری ضروری است که با افزایش ضخامت زیرلایه، تلفات موج سطحی و ناخواسته بیشتر شده و این امر منجر به ایجاد محدودیت در عملکرد آنتن می‌شود.

بنابراین، برای کاهش این نوع تلفات و بهبود عملکرد آنتن، ساختاری جدید با ادغام ساختار دارای شکاف‌هایی در بخش تشعشی آنتن و صفحه زمین ارائه می‌کنیم. با توجه به این که در این رویکرد از خواص میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای انتخاب فراموادها استفاده می‌شود، تغییر این میدان‌ها می‌تواند سبب تغییر مشخصات عملکردی آنتن شده به گونه‌ای که اندازه فیزیکی یا تلفات افزایش یابد. با الهام از این ایده جدید، یک شکاف از فراموادهای پایه توسعه یافته در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، یک فاصله هوایی بین حلقه‌های بیرونی و درونی وجود دارد که منجر به ایجاد فرکانس‌های تشدید متفاوت می‌شود. برای تعیین فرکانس‌های تشدید و ابعاد فیزیکی ساختار پیشنهادی، ما از روش زیر استفاده می‌کنیم.

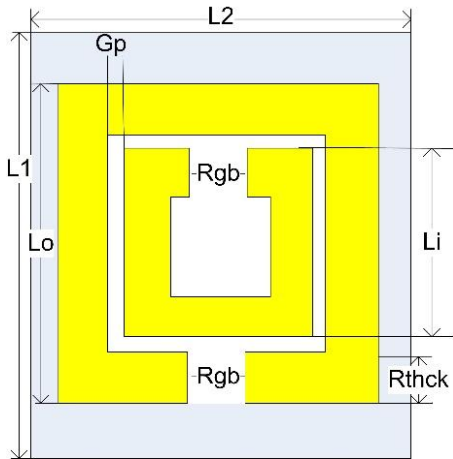
فرض کنید L نشان‌دهنده طول است و L_0 و L_i به ترتیب طول‌های بیرونی و درونی هستند. سپس طول‌های L_1 و L_2 را می‌توان به ترتیب با استفاده از معادله (۱) و (۲) و [۲۱] [۲۲] محاسبه کرد.

$$L_1 = 4(L_0 - R_{thck}) - R_{gp} \quad (۱)$$

$$L_2 = 4(L_i - R_{thck}) - R_{gp} \quad (۲)$$

جدول ۱: ابعاد آنتن میکرواستریپ پچ مستطیلی متعارف پیشنهادی

اجزاء آنتن	نماد	ابعاد محاسبه شده (میلیمتر)	ابعاد بهینه شده (میلیمتر)
عرض زمین	W	۵.۷۲	۵.۷۲
طول زمین	L	۵.۲۲	۵.۲۲
عرض پچ	Wpw	۳.۱۲	۲.۷۶
طول پچ	Lpl	۲.۴۳۷	۲.۳۸
ضخامت مس	Cu	۰.۰۳۵	۰.۰۳۵
ضخامت زیرلایه	h	۰.۳۵	۰.۳۵
ثابت دی الکتریک	er	۲.۲	۲.۲
فاصله تقذبه	fgp	۰.۲۶۵۶	۰.۱۵



شکل ۲- شکاف ساختاری SRR در فرامواد

جدول ۲- ابعاد محاسبه شده شکاف ساختار فرامواد تشدید کننده

حلقه‌های شکاف‌دار

مؤلفه	ابعاد محاسبه شده (mm)	ابعاد بهینه شده (mm)
طول بیرونی (L_0)	۰.۹۶	۰.۵
طول داخلی (L_i)	۰.۵۲	۰.۳
شکاف (R_{gp})	۰.۱۳	۰.۰۵
ضخامت مستطیل (R_{thck})	۰.۱۵	۰.۰۵
فاصله بین مستطیل‌ها (G_p)	۰.۰۹	۰.۱

در اینجا R_{gp} و R_{thck} به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت مستطیل و فاصله هستند. علاوه بر این، فرکانس‌های درونی-بیرونی f_{inner} و f_{outer} را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$f_{outer} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}L_1} \quad (۳)$$

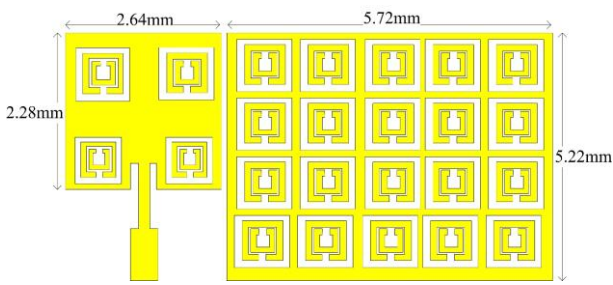
$$f_{inner} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}L_2} \quad (۴)$$

که c نشان‌دهنده سرعت نور است (3×10^8 متر بر ثانیه). ϵ_{eff} به این شکل محاسبه می‌شود:

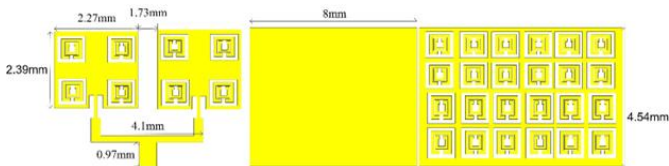
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{h}{L_0}}} \quad (۵)$$

که در آن ϵ_r گذردهی نسبی و h ضخامت زیرلایه است. هنگامی که دو تشدیدگر با دو فرکانس تشدید متفاوت f_{inner} و f_{outer} ادغام

فرامواد طراحی شده همراه با ابعاد در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴- آرایه های آنتن موج میلیمتری الهام گرفته از فرامواد تک عنصری



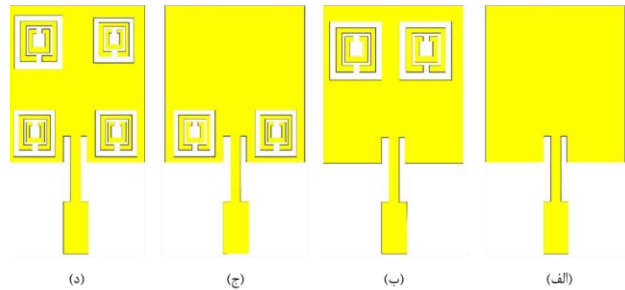
شکل ۵- آنتن آرایه های موج میلیمتری ۲×۲، (ب) بدون آرایه های شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار (ج) با آرایه های شکاف حلقه تشدید کننده ۴×۶

۲-۲- نحوه عملکرد ساختار تشدید کننده فرکانسی

در این بخش، به بررسی دلایل بهره مندی از ساختارهای فرامواد جهت بهبود عملکرد ساختار آنتن پچ مایکرواستریپ در فرکانس های بالا مانند ۳۸ گیگاهرتز خواهیم پرداخت. تشدید کننده حلقه ای شکاف دار به عنوان یک مدار تشدید کننده، با ایجاد مسیری با امپدانس پایین برای جریان های سطحی روی آنتن پچ، به طور موثری جریان های لبه های پچ را کوتاه می کند. این ساختار با پچ تشعشی جفت شده و موجب ایجاد حالت های تشدید جدیدی می شود که پهنای باند عملیاتی آنتن را به طرز چشمگیری گسترش می دهد و انرژی که در حالت عادی در زیر لایه هدر می رود را بازتاب می کند. این تشدید کننده با سرکوب انتشار موج سطحی روی آنتن پچ، ایزولاسیون بین عناصر آنتن را بهبود می بخشد و عملکرد کلی سیستم را ارتقا می دهد. علاوه بر این، شکاف تشدید کننده حلقه ای، پلاریزاسیون متقاطع را کاهش داده و با افزایش خلوص پلاریزاسیون، سطح سیگنال های ناخواسته را به حداقل می رساند. این ویژگی نه تنها عملکرد آنتن را بهبود می بخشد بلکه طراحی آنتن را نیز فشرده تر و کم حجم تر می کند و امکان ادغام آسان آن در دستگاه های کوچک تر را فراهم می سازد. عملکرد آنتن پچ مستطیلی معمولی به شدت تحت تاثیر میدان های لبه ای قرار دارد. شکل ۷ تأثیرات تشدید کننده حلقه ای شکاف دار الهام گرفته از فرامواد را بر توزیع میدان های لبه ای در پچ مستطیلی نشان می دهد. وجود

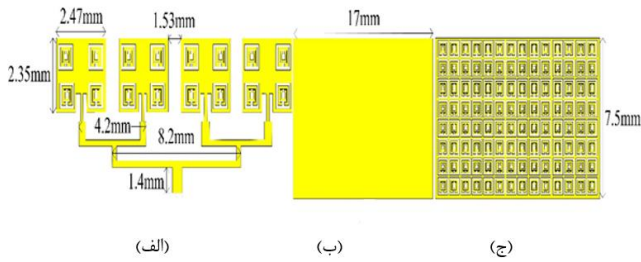
می گردند، کوپلینگ هر دو تشدید را به اندازه f_0 تغییر می دهد. تغییر فرکانس به مقادیر کوپلینگ بین دو حلقه بستگی دارد و فرکانس تشدید هر حلقه در نیم موج رخ می دهد که می تواند به صورت زیر تعیین شود:

$$Leq = \frac{L1+L2}{2} \quad (۶)$$

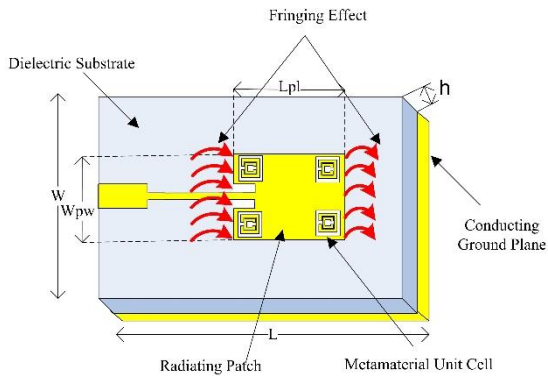


شکل ۳- مراحل طراحی آرایه های آنتن موج میلیمتری الهام گرفته از فرامواد

بدین ترتیب، شکاف طراحی شده با معادله فوق در هر دو بخش تشعشی و زمین ساختار آنتن پیاده سازی شد. این امر منجر به دستیابی به تلفات پایین با کاهش تلفات برگشتی، عدم تطبیق امپدانس و سایر تلفات مانند تلفات موج سطحی و موج ناخواسته می شود. شکل های الف-د ۳ مراحل طراحی آنتن آرایه ای فرامواد تک عنصری را نشان می دهند. در این ساختار، جای گذاری شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار فرامواد از نظر فنی برای کاهش محدودیت های یک پچ مستطیلی معمولی انتخاب شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار در قسمت های بالایی و پایینی پچ به گونه ای استفاده شده است که بر عملکرد آنتن موثر باشد. به طور خاص، شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار فرامواد معرفی شده در شکل ۳ (ب) برای تغییر و سپس افزایش مقدار میدان های لبه ای از پچ استفاده می شود. سپس، ساختار نشان داده شده در شکل ۳ (ج) برای به حداقل رساندن توان برگشتی به پورت تغذیه و تنظیم توزیع جریان جریان و مسیر در لبه تغذیه پچ مستطیلی توسعه یافته است. در نهایت، آنتن فرامواد با مشخصات عملکردی بهبود یافته با ادغام ساختارهای مراحل قبلی (شکل ۳ (د)) طراحی می گردد. بر اساس ایده مذکور، طراحی پیشنهادی از آنتن فرامواد در شکل ۴ نشان داده شده است. این شکل نمای جلویی پچ مایکرواستریپ مستطیلی معمولی مستطیلی با استفاده از آرایه های شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار فرامواد ۲×۲ و ۵×۴ روی ساختار زمین را نشان می دهد. شکاف های تشدید کننده حلقه ای فرامواد در فاصله ۱ میلی متری از یکدیگر قرار گرفته است تا کوپلینگ متقابل بین عناصر آنتن کاهش یابد. به عنوان خلاصه ای از مراحل طراحی، ساختار فیزیکی آرایه های



شکل ۶- الف) آرایه های آنتن موج میلیمتری ($\times 1$ ، ب) بدون آرایه های شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار و ج) با آرایه های شکاف حلقه تشدید کننده 16×7



شکل ۷- اثر ساختار فرامواد SRR الهام گرفته بروی ناحیه اثر لبه آنتن پچ میکرواستریپ

۳- نتایج شبیه سازی و بحثها

تحلیل عملکرد آرایه های آنتن موج میلی متری الهام گرفته از فرامواد پیشنهادی بر اساس نتایج شبیه سازی نرم افزار CST-MW ارائه شده است. عملکرد این آنتن ها از جنبه هایی نظیر پهنای باند، تلفات برگشتی، بهره و بازده تشعشی ارزیابی شده است. بحث با بررسی پارامترهای S، خواص گذردهی و تراوایی فرامواد طراحی شده (مطابق شکل ۲) آغاز می شود. شکل ۳ الف) ضریب بازتاب (S11) و انتقال (S21) ساختار شکاف تشدید کننده حلقه ای شکاف دار را نشان می دهد. این مقادیر از پارامترهای پراکندگی استخراج شده اند و رفتار الکترومغناطیسی فرامواد را توضیح می دهند. از نتایج شبیه سازی (شکل ۳ ب) مشخص است که مقادیر گذردهی و تراوایی در نواحی فرکانسی متفاوت، به ترتیب منفی و مثبت هستند. در فرکانس های تشدید پیشنهادی، هر دو پارامتر گذردهی و تراوایی ساختار به مقادیر منفی می رسند. این رفتار منحصر به فرد که در شرایط عادی حاصل نمی شود، به شناخت ضریب شکست شکاف فرامواد تشدید کننده حلقه ای شکاف دار کمک می کند. این ویژگی برای طراحی آنتن های کوچک تر با عملکرد بهتر ضروری است. خصوصیات گذردهی و تراوایی ساختار طراحی شده، ذخیره انرژی الکتریکی و مغناطیسی را نشان می دهند. همان طور که در شکل ۳ ب) دیده می شود، تراوایی منفی از 36.2 گیگاهرتز تا 40.17 گیگاهرتز و

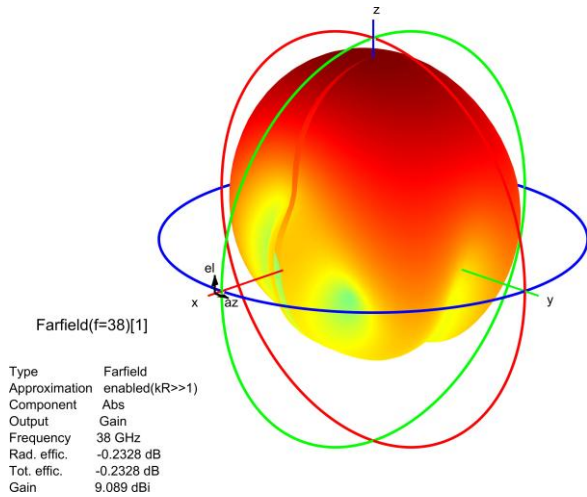
شکاف های حلقه ای در تشدید کننده، جریان های دایره ای در سر حلقه ها را کاهش داده و رفتار خازنی در لبه های حلقه ایجاد می کند. با افزایش ظرفیت خازنی ذخیره شده در لبه شکاف حلقه ای، امپدانس آنتن به طور موثری با منبع تطبیق پیدا می کند. آرایه های منظمی از تشدید کننده حلقه ای شکاف دار که در زمین و ساختار تشعشی قرار گرفته اند، بار الکتریکی بیشتری را ذخیره کرده و موج های ناخواسته را کاهش می دهند. این ساختار به طور موثر ظرفیت توان و پهنای باند آنتن را بهبود داده و عملکرد کلی سیستم های بی سیم را ارتقا می دهد. هنگامی که جریان توسط میدان الکتریکی موجود در شکاف فلزی تشدید کننده حلقه ای شکاف دار القا می شود، طول جانبی حلقه به عنوان یک سلف عمل کرده و خاصیت القایی ایجاد می کند. این خاصیت القایی نه تنها تلفات تشعشی آنتن را کاهش می دهد، بلکه میدان های مغناطیسی را تولید می کند که به طور مستقیم بر امپدانس و پهنای باند آنتن تأثیر می گذارد. این مکانیزم منحصر به فرد، ظرفیت تشعشی آنتن را افزایش داده و بهره وری آن را بهبود می بخشد. به منظور دستیابی به تطبیق امپدانس مناسب آنتن های پیشنهادی در شبکه تغذیه، پارامترهایی مانند شکاف اسپلیت، طول های جانبی و عرض تشدید کننده حلقه ای شکاف دار به دقت تحلیل شده اند. در طراحی این آنتن ها، تشعشع عمدتاً به دلیل میدان های لبه ای ایجاد می شود که بین لبه پچ مستطیلی و صفحه زمین (در امتداد عرض پچ) شکل می گیرد. این تشعشع، که برای ارتباطات بی سیم مورد استفاده قرار می گیرد، به طور مستقیم به اندازه پچ و ارتفاع زیر لایه وابسته است. از نظر فنی، با افزایش ارتفاع زیر لایه، میدان لبه ای قوی تر می شود، که باعث می شود پچ مستطیلی از نظر الکتریکی بزرگ تر از اندازه فیزیکی خود به نظر برسد. افزایش این اثر لبه ای نقش کلیدی در بهبود عملکرد آنتن دارد. فراموادها در این راستا نقش مهمی ایفا می کنند و موجب تقویت اثرات لبه ای می شوند. همان طور که در شکل ۲.۴ نشان داده شده است، استفاده از ساختار فرامواد تشدید کننده حلقه ای شکاف دار الهام گرفته در پچ، امپدانس ورودی آنتن را کاهش داده و توزیع جریان روی پچ را بهینه می کند. این تغییرات به طور قابل توجهی جریان رسیده به مرکز و لبه پچ را افزایش می دهد و در نتیجه تشعشع انرژی را تقویت کرده و طول موثر پچ را افزایش می دهد. علاوه بر این، استفاده از تشدید کننده حلقه ای شکاف دار در زمین آنتن به عنوان یک سطح بازتابنده موجب تمرکز انرژی تشعشی در جهت مطلوب می شود. این ساختار همچنین تلفات موج سطحی را سرکوب کرده و بازتاب انرژی را کاهش می دهد، که در نهایت موجب بهبود پارامترهای مهمی همچون تلفات برگشتی می شود. روش پیشنهادی با تأکید بر ناحیه لبه ای پچ، بهبودهای قابل توجهی در معیارهای عملکردی آنتن از جمله پهنای باند، بهره، جهت مندی و بازده تشعشی ایجاد می کند و طراحی آنتن های پیشرفته برای کاربردهای ارتباطی نسل جدید را تسهیل می سازد.

گذردهی منفی تا ۴۵.۱۲ گیگاهرتز ادامه دارد. این ساختار با پهنای باند ۳.۹۷ گیگاهرتز، ویژگی‌های مواد منفی دوگانه را برآورده می‌سازد. نمودار تلفات برگشتی در برابر فرکانس برای یک آنتن میکرواستریپ مستطیلی تکی و فرامواد در شکل ۳ (الف) ارائه شده است. از این نمودارها مشخص است که آنتن میکرواستریپ معمولی دارای تلفات برگشتی نزدیک به -۵۷ دسی‌بل است، در حالی که آنتن مبتنی بر فرامواد پیشنهادی توانسته به تلفات برگشتی کمتر از -۸۲ دسی‌بل در پهنای باند حدود ۲۰.۸۱ گیگاهرتز دست یابد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شکاف‌های فرامواد تشدیدکننده حلقه‌ای شکاف‌دار به عنوان بخشی از آنتن و زمین می‌تواند به طور قابل‌توجهی تلفات برگشتی را کاهش دهد و روش پیشنهادی ما آن را به کمتر از -۲۵ دسی‌بل می‌رساند. علاوه بر این، مقایسه نتایج مربوط به آرایه‌های فرامواد نشان می‌دهد که آنتن‌های الهام‌گرفته از ساختار فرامواد تشدیدکننده حلقه‌ای شکاف‌دار، در مقایسه با آرایه ۲×۲ دارای تلفات برگشتی بزرگ‌تری هستند. این موضوع به دلیل استفاده از شکاف‌های فرامواد در قسمت‌های بالایی و پایینی ساختار است. شکاف بالایی میدان‌های لبه‌ای پچ را تقویت کرده و تلفات توان ورودی را کاهش می‌دهد، در حالی که شکاف پایینی با تغییر جهت انتشار، تشعشع بهتری ایجاد می‌کند. نتیجه نهایی این است که آنتن پیشنهادی با بهبود عملکرد تشعشعی و پهنای باند، بهینه‌سازی مناسبی برای کاربردهای موج میلی‌متری و ارتباطات بی‌سیم فراهم می‌کند.

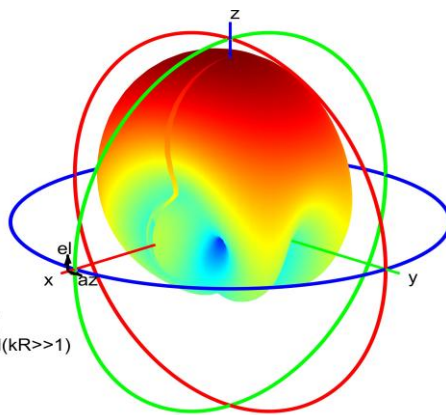
نتایج ما کاهش ضریب بازتاب تا -۸۲.۹۵ دسی‌بل و بهبود تطبیق امپدانس آنتن را تأیید می‌کند. در شکل ۳ (ب)، تلفات برگشتی آرایه‌های فرامواد ۱×۲ و ۱×۴ ارائه شده است. مشخص است که این آرایه‌ها به ترتیب به تلفات برگشتی -۶۰.۳ دسی‌بل و -۶۷.۱ دسی‌بل دست یافته‌اند؛ این نتایج بدون و با اضافه کردن آرایه‌های فرامواد ۴×۶ در صفحه زمین مشاهده شده است. همچنین، یکپارچه‌سازی آرایه‌های فرامواد باعث افزایش پهنای باند آرایه ۱×۲ از ۲۰.۵۷ گیگاهرتز به ۲۰.۲۷۸ گیگاهرتز شده که بهبودی معادل ۲۲۱ مگاهرتز را نشان می‌دهد. برای آرایه ۱×۴، تلفات برگشتی بدون و با استفاده از شیارهای تشدیدکننده حلقه‌ای شکاف‌دار در صفحه زمین، به ترتیب -۶۵.۳۵ دسی‌بل و -۶۹.۱۲ دسی‌بل اندازه‌گیری شده است. پهنای باند آنتن نیز قبل از استفاده از فرامواد تقریباً ۳.۸۹ گیگاهرتز بوده، که پس از بهره‌گیری از این فناوری به ۴.۷۰۴ گیگاهرتز افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم جریان در مرکز پچ و کاهش امپدانس با کمک فرامواد قرار داده شده در لبه‌های پچ‌های مستطیلی، جریان‌های چرخشی که عامل تلفات برگشتی بزرگ هستند را به طور موثری تضعیف می‌کند. الگوی تشعشعی D2 یک آنتن پچ میکرواستریپ تک‌عنصری معمولی، فرامواد الهام‌گرفته میلی‌متری تک‌عنصر،

آرایه‌های ۱×۲ و ۱×۴ در شکل‌های ۱۰ (الف)-(ب) ارائه شده است. شکل ۱۰ (الف) مقایسه الگوی تشعشعی D2 بین پچ مستطیلی معمولی و فرامواد را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است، مقدار سطح کناری آنتن پچ تک‌عنصری متداول و اصلاح شده به ترتیب -۲۵.۶ دسی‌بل و -۱۵.۲ دسی‌بل است. با معرفی شیار تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار فقط بر روی پچ تشعشعی آرایه‌های ۱×۲ و ۱×۴، سطح کناری به دست آمده حدود -۱۵.۶ دسی‌بل و -۱۱.۳ دسی‌بل است. همچنین، با یکپارچه‌سازی شیار تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار همزمان بر روی تشعشعگر و صفحه زمینه آرایه، سطح کناری به دست آمده برای آرایه‌های ۱×۲ و ۱×۴ به ترتیب -۱۳.۶ دسی‌بل و -۱۱.۳ دسی‌بل است. از نتایج می‌توان به راحتی درک کرد که با افزایش تعداد آرایه‌های شیار تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار بر روی صفحه زمینه، مقدار سطح کناری افزایش می‌یابد که این امر منجر به از دست رفتن توان ورودی و ایجاد تداخل در سمت گیرنده می‌شود. زیرا آرایه‌های شیار حلقه مشدد، امواج الکترومغناطیسی تشعشعی را به جهت نامطلوب بازتاب می‌کنند. با این حال، قرار دادن شیارهای تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار در زمینه، پهنای باند تمامی آنتن‌های طراحی شده را افزایش می‌دهد.

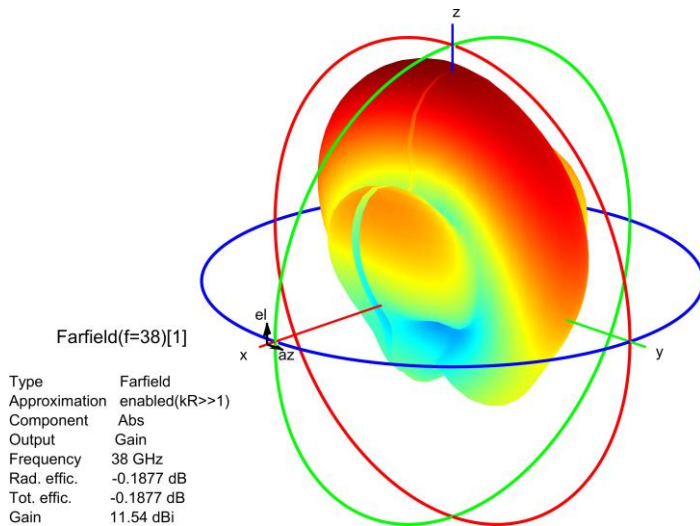
برای بررسی بیشتر عملکرد طراحی جدید، شکل‌های ۸ (الف) تا (د) نمای سه بعدی الگوی تشعشع را نشان می‌دهند (نمایش سه بعدی در مقاله وجود ندارد). همانطور که از شکل‌های ۷ (الف)-(ب) مشخص است، بهره، بازده تشعشعی و بازده کل مربوط به آنتن میکرواستریپ معمولی و آنتن تک‌عنصری فرامواد پیشنهادی به ترتیب ۷.۲۶ دسی‌بل، -۰.۱۳۱۴، ۰.۹۷۰۲٪ و ۷.۳۶ دسی‌بل، -۰.۱۹۷۸، ۰.۹۵۵۵٪ است. با استفاده از همان الگو، نتایج در شکل‌های ۳.۵ (ج)-(د) نشان می‌دهد که بهره، بازده تشعشعی و بازده کل یک آنتن ۱×۲ فرامواد که فرامواد روی پچ آن اضافه شده و آرایه‌های شکاف تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار با ابعاد ۶×۴ روی پچ و زمین آنتن قرار گرفته‌اند، به ترتیب ۹.۰۹ دسی‌بل، -۰.۲۳۲۸، ۰.۲۳۲۸٪ و ۰.۹۴۷۸٪ است. این نشان می‌دهد که با معرفی شکاف‌های تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار فقط روی پچ و سپس روی هر دو قسمت پچ و زمین آنتن‌ها، بهره، بازده تشعشعی و بازده کل تشعشعی آرایه‌های ۱×۴ فرامواد به ترتیب حدود ۱۱.۵ دسی‌بل، ۹۵.۷۷٪ و ۱۱.۴ دسی‌بل، ۹۵.۸۷٪ است. برای جمع‌بندی این بحث، عملکرد آنتن پیشنهادی با چندین طراحی آنتن موجود مقایسه شده است. برای بررسی بیشتر عملکرد طراحی جدید، شکل‌های ۷ (الف) تا (د) نمای سه بعدی الگوی تشعشع را نشان می‌دهند (نمایش سه بعدی در مقاله وجود ندارد). همانطور که از شکل‌های ۷ (الف)-(ب) مشخص است، بهره، بازده تشعشعی و بازده کل مربوط به آنتن میکرواستریپ معمولی و آنتن تک



(ج) آرایه شکاف آنتن ۲ در ۱ بدون زمین با ساختار SRR

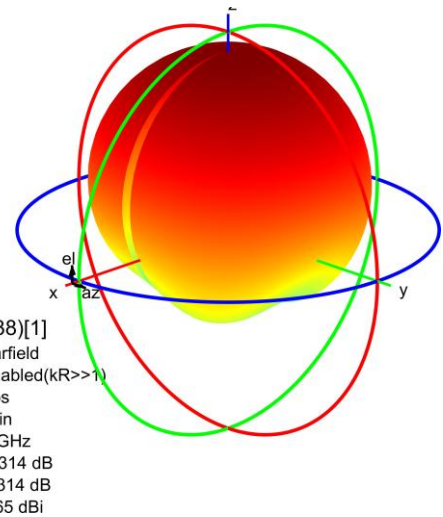


(د) آرایه شکاف آنتن ۲ در ۱ بدون زمین با ساختار SRR

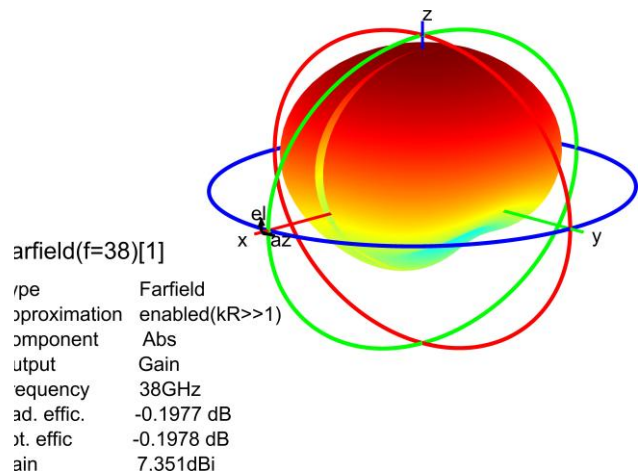


(ذ) آرایه شکاف آنتن ۴ در ۱ بدون زمین با ساختار SRR

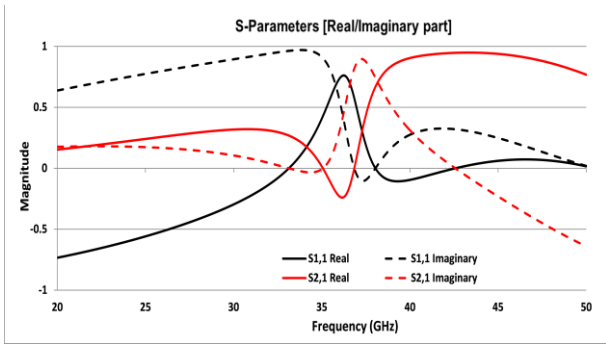
عصری فرامواد پیشنهادی به ترتیب ۷.۲۶ دسی بل، -۰.۱۳۱۴، ۹۷.۰۲٪ و ۷.۳۶ دسی بل، -۰.۱۹۷۸، ۹۵.۵۵٪ است. با استفاده از همان الگو، نتایج در شکل‌های ۳.۵(ج)-(د) نشان می‌دهد که بهره، بازده تشعشعی و بازده کل یک آنتن ۲ × ۱ فرامواد که فرامواد روی پیچ آن اضافه شده و آرایه‌های شکاف تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار با ابعاد ۴ × ۶ روی پیچ و زمین آنتن قرار گرفته‌اند، به ترتیب ۹.۰۹ دسی بل، -۰.۲۳۲۸، -۰.۲۳۲۸ (۹۴.۷۸٪) و ۹.۱۱، -۰.۲۶۵۲، -۰.۲۶۵۲ (۹۴.۰۱٪) است. این نشان می‌دهد که با معرفی شکاف‌های تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار فقط روی پیچ و سپس روی هر دو قسمت پیچ و زمین آنتن‌ها، بهره، بازده تشعشعی و بازده کل تشعشعی آرایه‌های ۴ × ۱ فرامواد به ترتیب حدود ۱۱.۵ دسی بل، ۹۵.۷۷٪ و ۱۱.۴ دسی بل، ۹۵.۸۷٪ است. برای جمع‌بندی این بحث، عملکرد آنتن پیشنهادی با چندین طراحی آنتن موجود مقایسه شده است.



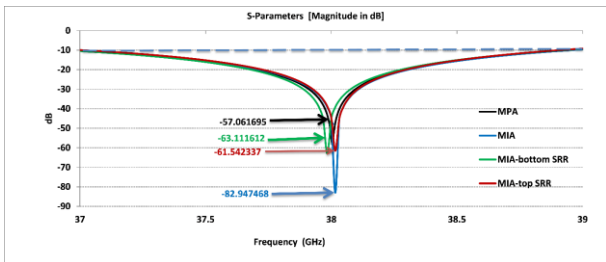
(الف) تنها MPA



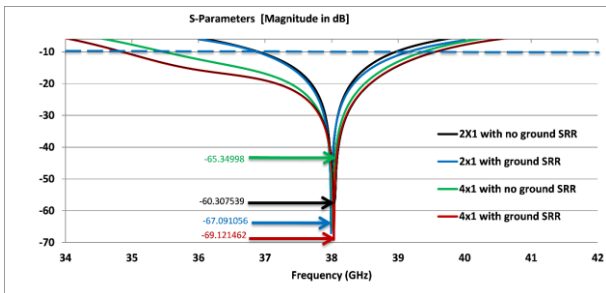
(ب) تنها MIA



شکل ۹- خواص مواد ساختار شکافدار فراماده SRR (ب) ضرایب پرمایبیلیتی و پرمیتیویتی

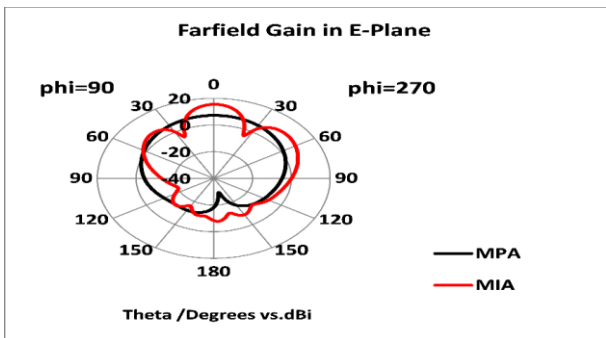


(الف) MPA و MIA به تنهایی

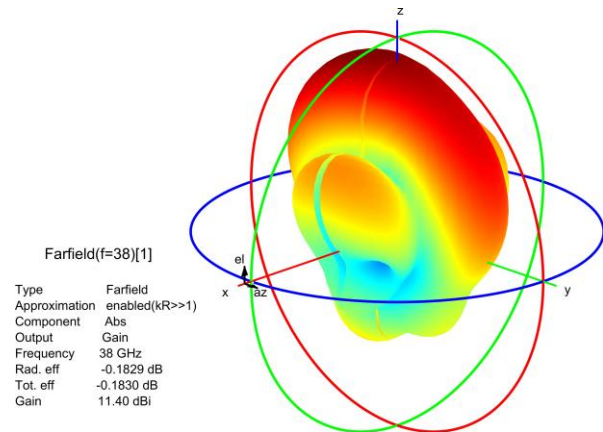


(ب) آرایه های 2x1 و 4x1 MIA

شکل ۱۰- نمودار Return Loss بر حسب فرکانس برای آنتن ها



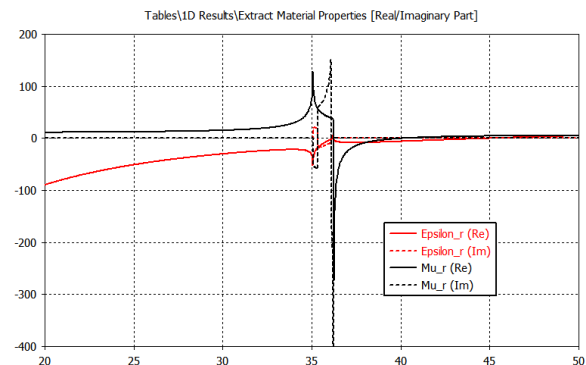
(الف) الگوی تشعشع دوعبده MPA و MIA



(ر) آرایه شکاف آنتن ۴ در ۱ با زمین با ساختار SRR

شکل ۸- الگوی تابش سه بعدی آرایه های MIA تک عنصری، ۲ در ۱ و ۴ در ۱

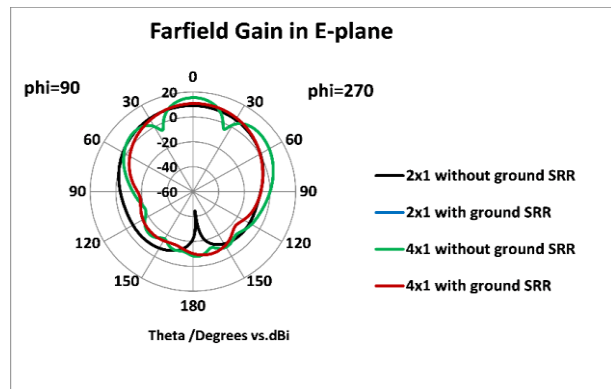
جدول ۳ مقایسه را از نظر پارامترهای مختلف فهرست می کند. آرایه های تک فرامواد پیشنهادی دارای تلفات برگشتی بسیار کم و بازده بهبود یافته در مقایسه با نتایج گزارش شده در [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶] است، و پهنای باند گسترده تری در مقایسه با کار گزارش شده در [۱۵]، [۱۶] به دست آمده است. از نظر مقدار تلفات برگشتی، نسبت موج ایستاده ولتاژ و بازده کل، آرایه های ۱ × ۲ و ۱ × ۴ فرامواد عملکرد بهتری در مقایسه با [۱۴]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۳] و [۲۴] دارند. ویژگی های ضریب شکست منفی فرامواد دلیل اصلی دستیابی به عملکرد بهینه در این ساختارها محسوب می شود. این ویژگی به طور قابل توجهی توان برگشتی به منبع را کاهش می دهد، اثر لبه ای را تقویت می کند و بازده تشعشعی را افزایش می دهد. علاوه بر این، شکاف های تشدیدکننده حلقه ای شکافدار که در زمین آنتن قرار داده شده اند، با سرکوب موج های سطحی ناخواسته، پهنای باند را گسترش داده و عملکرد کلی آنتن را بهبود می بخشد.



(الف) پارامترهای S بخش های حقیقی و موهومی

۵-مراجع

- [1] Gemeda, Mulugeta T., and Kinde A. Fante. "Inset-Feed Rectangular Microstrip Patch Antenna Array Performance Enhancement for 5G Mobile Applications." In International Conference on Advances of Science and Technology, pp. 284-303. Springer, Cham, 2020.
- [2] Ayane L. Goshu, Mulugeta T. Gemeda and Kinde A. Fante — (2022). "Planar Microstrip Patch Antenna Arrays with Semi-elliptical Slotted Patch and Ground Structure for 5G Broadband Communication Systems." Cogent Engineering, 9:1, 2069069, DOI: 10.1080/23311916.2022.2069069.
- [3] Abubar, Abd Rahman, Mutiara Widasari Sitopu, Panangian Mahadi Sihombing, Jhoni Hidayat, and Afandi Sahputra. "Microstrip Antenna Design with Left Handed Metamaterial (LHM) for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B)." In 2020 4th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM), pp. 103-106. IEEE, 2020.
- [4] D. Pattar, P. Dongaokar, and N. S L, "Metamaterial for design of compact microstrip patch antenna," 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC), 2020.
- [5] Reena, Parihar. "A Compact Metamaterial inspired Dual-band SRR loaded Antenna for Wireless Applications." Research Journal of Quantum Computations and Physical Systems, Vol 1 (2018): 1.
- [6] P. D. Tung, P. H. Lam, and N. T. Quynh Hoa, "A miniaturization of microstrip antenna using negative permittivity metamaterial based on CSRR-loaded GROUND FOR WLAN applications," Vietnam Journal of Science and Technology, vol. 54, no. 6, p. 689, 2016.
- [7] M. LABIDI and F. CHOUBANI, "A design of metamaterials MIMO antenna for Millimeter Wave Application," 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2019.
- [8] R. Goyal and Y. K. Jain, "Metamaterial-based microstrip patch antenna using unit cell array for gain enhancement," International Journal of Computer Sciences and Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 285-288, 2019.
- [9] Baena, J. D., A. C. Escobar, A. Sayanskiy, and S. B. Glybovski. "Lefthanded metamaterials matched to free space through mechanical tuning." In 2019 Thirteenth international congress on artificial materials for novel wave phenomena (Metamaterials), pp. X-044. IEEE, 2019.
- [10] Jairath, Kapil, Navdeep Singh, Vishal Jagota, and Mohammad Shabaz. "Compact ultrawide band metamaterial-inspired split ring resonator structure loaded band notched antenna." Mathematical Problems in Engineering, 2021.
- [11] Esmail, B. A. F., H. A. Majid, F. A. Saporudin, M. Jusoh, A. Y. Ashyap, Najib Al-Fadhali, and M. K. A. Rahim. "Negative-refraction metamaterial with low loss property at millimeter wave spectrum." Bulletin of Electrical Engineering and Informatics 9, no. 3 (2020): 1038-1045.
- [12] A. Islam, E. Emon, and A. Ahmed, "A metamaterial loaded microstrip patch antenna for Lower 5G U-NII Spectrum," Mathematical Modelling of Engineering Problems, vol. 7, no. 4, pp. 556-562, 2020.
- [13] A. A. Bakr Binshitwan, S. Mohamed Keskeso, A. A. Alquzayzi, and A. Elbarsha, "38GHz rectangular microstrip antenna with DGS for 5G applications," 2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN), 2021.
- [14] H. Marzouk, A. Shaalan, and M. Ahmed, "A two-element microstrip antenna 28/38 GHz for 5G mobile applications," Delta University Scientific Journal, vol. 3, no. 1, pp. 1-8, 2020.
- [15] B. Chauhan, S. Vijay, and S. C. Gupta, "Millimeter-wave mobile communications microstrip antenna for 5G - a future antenna," International Journal of Computer Applications, vol. 99, no. 19, pp. 15-18, 2014.
- [16] E. I. Hassan, R. I. Hamad, and M. I. Omar, "A 38 GHz modified circular microstrip patch antenna for 5G Mobile Systems," 2021 38th National Radio Science Conference (NRSC), 2021.



(ب) الگوی تشعشع آرایه‌های آنتن مایکرواستریپ 1×2 و 1×4 با بدون و زمین $4MIA \times 1$ SRR با ابعاد 6×4 شکل ۱۱- الگوهای تشعشع دوبعدی MPA و MIA در سناریوهای مختلف

جدول ۳- مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی با سایر کارهای مشابه

نوع آنتن	مرجع	فرکانس (GHz)	باند پهنای (dB)	V S W R	بهره (dBi)	راندمان (%)
تک عنصره	۱۳	۳۸	۲.۱۴۶	-۴۰.۵۴	۱.۰۲	۶.۵۵
	۱۴	۳۸	-	-۲۰.۱۵	۱.۲۷	۸
	۱۵	۳۸	۱.۲۷	-۴۲.۷۸	۱.۰۸	۹.۲۵
	۱۶	۳۸	۱.۴۷	-۴۹.۴۵	-۰.۹۹۵	۷.۸۹
	آنتن پیشنهادی	۳۸	۱.۹۷۱	-۸۲.۵۵	۱.۰۰۱۴	۷.۳۶
آرایه 2×1	۱۴	۳۸	۳.۶۵۱	-۱۸.۳۵	۱.۲۷	۹.۳۴
	۱۷	۳۸	۱.۰۶	-۲۲.۶	-	۹.۷۵
	۲۳	۳۸	-	-۲۸.۸۴	۱.۰۷۵	۹.۶۹
	۲۴	۳۸	۱.۶۵	-۲۲.۵	۱.۱۶	۹.۵
	آنتن پیشنهادی	۳۸	۲.۲۷۸	-۶۷.۱	۱.۰۰۰۹	۹.۱۱
آرایه 4×1	۱۸	۳۸	۳.۳۳	-۲۰.۱۵	۱.۲۷	۵.۵
		۳۸	۱.۲۸	-۳۴.۳۵	-	۹.۹۸
	آنتن پیشنهادی	۳۸	۴.۷۰۴	-۶۹.۱۲	۱.۰۰۰۷	۱۱.۴

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، آنتن آرایه‌ای پهن‌بند تک عنصری، 1×2 و 1×4 با بهره‌مندی از ویژگی‌های فرامواد طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پهنای باند، تلفات برگشتی، بهره و بازده کل آنتن تک عنصری فرامواد به ترتیب 1.97 گیگاهرتز، 82.95 دسی‌بل، 7.36 دسی‌بل و 95.55% است. پهنای باند، تلفات برگشتی، بهره و بازده کل آرایه‌های 1×2 و 1×4 فرامواد به ترتیب 2.279 گیگاهرتز، 67.1 دسی‌بل، 9.11 دسی‌بل و 94.01% و 4.704 گیگاهرتز، 69.12 دسی‌بل، 11.4 دسی‌بل و 95.87% است. به همین ترتیب، پهنای باند و بازده تشعشعی به دست آمده برای آرایه‌های 1×4 فرامواد به ترتیب 4.704 گیگاهرتز و 95.87% است. از نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که پهنای باند آنتن بهبود یافته و مقدار تلفات برگشتی به حداقل رسیده است، زیرا بخش‌های تشعشعی و زمین آنتن پیشنهادی از ویژگی‌های مطلوب فرامواد بهره برده است. علاوه بر این، با افزایش تعداد شکاف‌های تشدید کننده حلقه‌ای شکاف‌دار در زمین آنتن‌ها، تلفات موج سطحی کاهش یافته اما سطح گلبه‌های کناری افزایش می‌یابد. بنابراین، آرایه‌های آنتن پیشنهادی می‌توانند برای سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم نسل ۵ مورد استفاده قرار گیرند.

- [21] Sandi, Efri, Rizqiana Putri, and Aodah Diamah. "A Proposed Model of Metamaterial Complementary Split-Ring Resonator to Reduce Microstrip Array Antenna Dimension." *KnE Social Sciences* (2019): 565-572.
- [22] Ren, Kun, PengwenZhu, Taotao Sun, Junchao Wang, Dawei Wang, Jun Liu, and Wensheng Zhao. "A Complementary Split-Ring Resonator (CSRR)-Based 2D Displacement Sensor." *Symmetry* 14, no. 6 (2022): 1116.
- [23] Sandi, E., A. Diamah, M. W. Iqbal, and D. N. Fajriah. "Design of substrate integrated waveguide to improve antenna performances for 5G mobile communication application." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1402, no. 4, p. 044032. IOP Publishing, 2019.
- [24] Sandi, E., A. Diamah, M. W. Iqbal, and D. N. Fajriah. "Design of substrate integrated waveguide to improve antenna performances for 5G mobile communication application." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1402, no. 4, p. 044032. IOP Publishing, 2019.
- [17] Mohamad Aizwan Bin, Sulaim Bin Ab Qais, "Design of a Rectangular patch Microstrip Patch Antenna for 5G Applications." University of Technology of Marash Alam Malaysia.
- [18] Rafique, Umair, Shobit Agarwal, Hisham Khalil Nasir Nauman, and Khalil Ullah. "Inset-fed planar antenna array for dual-band 5G MIMO applications." *Progress In Electromagnetics Research C* 112, pp. 83-98, 2021.
- [19] Samarth Agarwal and Prahi. "High Gain Linear 1x4 X-slotted Microstrip Patch Antenna Array for 5G Mobile Technology." Model Institute of Engineering and Technology, Jammu, India, 2020.
- [20] Gameda, M. T., Fante, K. A., Goshu, H. L., and Goshu, A. L. (2021). "Design and Analysis of a 28 GHz Microstrip Patch Antenna for 5G Communication Systems." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(02), 881-886.