

Design of a Dual-Beam End-Fire Antenna using the proposed Metamaterial Structure for 60 GHz MIMO Applications**Narges Malekpour^{1,2}, PhD Student, Mohammad Amin Honarvar^{1,2}, Associated Professor**¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Digital Processing and Machine Vision Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

n.malekpour@sel.iaun.ac.ir, amin.honarvar@pel.iaun.ac.ir

Abstract

In this paper, a dual-beam end-fire Bow-tie antenna for millimeter-wave applications over 57–64 GHz is designed. By introducing a new structure in the decoration of metamaterial slabs in the horizontal plane of the Bowtie antenna, a dual-beam generated at 60° and 120°. The proposed antenna is composed of a 2×3 array of metamaterial unit cells, which leads to a considerable gain enhancement and generates a dual-beam pattern. To create a dual-beam in the E-plane, the array of metamaterial slabs integrated vertically in front of the Bowtie antenna and tilted by 15° with regard to the antenna axis to tailor the radiation beam. These unit cells are capable of creating two resonances that can play an important role to improve the gain in a wide frequency band. The resulting dual-beam radiation in the E-plane has maxima at +60 and 120 degrees with a maximum peak gain of 9.5 dBi at 60 GHz. The final design simulated with a parametric study, and the best configuration provided despite the maintenance of other radiation characteristics of the antenna.

Keywords: dual-beam antenna, end-fire antenna, ENZ metamaterial unit-cell, high-gain antenna, millimeter-wave**Received:** 30 May 2021**Revised:** 27 June 2021**Accepted:** 19 October 2021**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Amin Honarvar

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.49.9.8>

مقاله پژوهشی

طراحی یک آنتن دو بیمی سر-آتش با استفاده از ساختار متامتریالی پیشنهادی جهت استفاده در کاربردهای MIMO در باند فرکانسی ۶۰ گیگاهرتز

نرگس ملک‌پور^{۱،۲}، دانشجوی دکتری، محمد امین هنرور^{۱،۲}، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
n.malekpour@sel.iaun.ac.ir, amin.honarvar@pel.iaun.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک آنتن پاپیونی سر-آتش دو بیمی در باند فرکانسی موج میلیمتری (۶۴-۵۷ گیگاهرتز) طراحی شده است. به طوری که با معرفی یک ساختار جدید در چینش تیغه‌های متامتریالی پیشنهادی در صفحه افقی آنتن پاپیونی، دو بیم در ۶۰ و ۱۲۰ درجه تولید می‌شود. آنتن پیشنهاد شده از یک آرایه 3×2 از سلول‌های متامتریالی، که منجر به افزایش بهره و همچنین تولید دو بیم می‌شود، تشکیل شده است. برای تولید دو بیم در صفحه E-plane تیغه‌های متامتریالی نسبت به محور آنتن با زاویه‌ی ۱۵ درجه کج شده و در مقابل آنتن پاپیونی جاسازی شده‌اند. این تک‌سلولی‌ها، قابلیت ایجاد دو تشدید را داشته که می‌توانند در راستای بهبود بهره در یک باند فرکانسی وسیع، نقش شایانی را ایفا نمایند. پرتوهای اصلی آنتن در صفحه E-plane در ۶۰ و ۱۲۰ درجه دارای بهره‌ی ۹/۵ دی‌سیبل در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز است. طرح نهایی آنتن پیشنهادی، شبیه-سازی و با تحلیل‌های پارامتری، مناسب‌ترین ساختار علیرغم حفظ سایر مشخصه‌های تشعشعی و ساختاری آنتن ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: آنتن با بهره‌ی بالا، آنتن دو بیمی، آنتن سر-آتش، تک سلولی متامتریالی ENZ، موج میلیمتری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۳/۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۴/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد امین هنرور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه ارتباطات در باند بدون مجوز ۶۰ گیگاهرتز (۵۷-۶۶ گیگاهرتز) توجه زیادی را برای سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم داخلی به خود جلب کرده است. طراحی و استاندارد سازی سیستم‌های بی‌سیم با سرعت داده چند گیگابایت/ثانیه برای برنامه‌های کاربردی همانند ارسال ویدئو با کیفیت بالا با استفاده از استاندارد IEEE 802.11ad WiGig این باند فرکانسی را فراهم می‌کند [۱،۲]. با این حال، علی‌رغم اهمیت و کاربردهای فراوانی که این باند فرکانسی پیدا کرده است، عملکرد در باند ۶۰ گیگاهرتز مشکلاتی مانند: الف) تلفات بسیار زیاد سیگنال‌ها به دلیل جذب‌های اتمسفری می‌توان اشاره کرد. یکی از چالش‌های عمده در اجرای سیستم‌های بی‌سیم ۶۰ گیگاهرتز، مشکل مواجه شدن با تلفات بسیار زیاد است که می‌تواند با استفاده از آنتن‌هایی که دارای بهره بالا هستند جبران شود. قابلیت افزایش بهره آنتن به‌طور چشم‌گیر، مهم‌ترین دلیل علاقه پژوهشگران به این باند فرکانسی است [۳]. از جمله مشخصه‌های دیگری که این باند فرکانسی را چالش برانگیز کرده است، علاوه بر تلفات زیاد به دلیل جذب اتمسفر می‌توان به، اثر تداخل از کانال‌های مجاور و اثر چند مسیری که منجر به محو شدن سیگنال می‌شود، نیز اشاره کرد.

تلفات را می‌توان با استفاده از آنتن‌هایی با بهره بالا جبران کرد. اما از آنجایی که بهره یک آنتن با پهنای گلبند اصلی رابطه معکوس دارد، برای تحقق آنتن با بهره بالا، باید پهنای گلبند اصلی آن‌ها باریک باشد [۴]. که همین امر، باعث کاهش تداخل و اثرات منفی چند مسیری نیز می‌شود. همچنین با استفاده از سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی^۱ (MIMO) می‌توان چند آنتن را در فرستنده و یا گیرنده نصب کرد به‌طوری که سیگنال دریافتی و یا ارسال‌ی دارای کاراکترهای محو سازی متفاوتی باشند و از آنجایی که غیر محتمل است که همه سیگنال‌های دریافتی تجزیه یا محو شوند در یک زمان مشابه، می‌توان گفت که این سیستم قابلیت اطمینان ارتباط دارد و می‌توان انتخاب مناسبی از سیگنال دریافتی وجود داشته باشد. از طرف دیگر، با استفاده از سیستم‌های MIMO می‌توان ظرفیت کانال را بدون نیاز به طیف فرکانسی اضافی افزایش داد. اما در بسیاری از موارد، به‌منظور غلبه بر تأثیر تداخل و جایی که پوشش چند ناحیه غیر مجاور مورد نیاز است، لازم است که از آنتن‌های چند بیمی استفاده شود.

از جمله راه‌های معمول برای تولید چند بیمی می‌توان به استفاده از آنتن‌های آرایه فازی یا آنتن‌های بیم سوئیچینگ اشاره کرد [۵-۷]. با این حال، استفاده از این تکنیک‌ها معمولاً معایبی را نیز به همراه دارد. از جمله معایبی که می‌توان نام برد عبارتند از: ۱) گران قیمت بودن اجزاء تغییر دهنده فاز، ۲) تلفات شدید ناشی از استفاده از تغییر دهنده‌های فاز، که باعث کاهش عملکرد آنتن می‌شود. همچنین دستاورد استفاده از این روش‌ها، طراحی یک آنتن با ابعاد بسیار بزرگ است. از طرفی، در آنتن‌های MIMO نصب المان‌های آنتن روی یک فضای کوچک باعث تزویج متقابل بین المان‌های آنتن می‌شود. یک راه حل برای غلبه بر این نواقص استفاده از آنتن‌های دو/چند بیمی است [۸،۹]. این نوع آنتن‌ها با استفاده از یک تشعشع‌کننده، دارای دو/چند بیم مجزا هستند و همین امر باعث شده که به عنوان آنتن‌های چند بیمی جهت‌دار شناخته شوند و بهترین نامزد برای ارتباطات بی‌سیم یا سیستم‌های راداری هستند که در آن پوشش چندین قسمت مورد نیاز است.

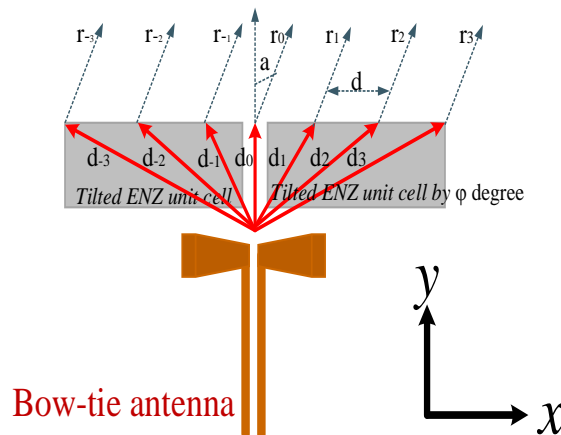
روش دیگری که می‌توان برای به‌دست آوردن الگوی تابش دو بیمی معرفی کرد، استفاده از آنتن‌های موج نشستی ست [۱۰،۱۱]. اشکال اصلی این آنتن‌ها محدود بودن دامنه اسکن است که منجر به محدود شدن برنامه‌های کاربردی آن است. برای غلبه بر این محدودیت، نویسندگان در مرجع [۱۲] با تحریک مد TM₀₂ در یک آنتن پچ شکافی U-شکل یک تابش دو بیمی ایجاد کرده‌اند که با این وجود ساختار ارائه شده دو بیم نامتقارن را تولید می‌کند. از معایب دیگر استفاده از آنتن‌های آرایه فازی [۱۳] می‌توان به شبکه‌های تغذیه پیچیده و مبدل‌های فاز گران قیمت آن اشاره کرد. همچنین آنتن‌های قابل هدایت الکترونیکی که با استفاده از دیودهای پین [۱۴]، دیودهای ورکتور [۱۵] و سوئیچ‌های میکرو الکترومکانیکی^۳ (MEMS) [۱۶] طراحی می‌شوند نیز دارای عملکرد پایین و ابعاد فیزیکی بزرگی هستند.

در این مقاله یک روش برای تحقق یک آنتن دو بیمی، به‌منظور عملکرد در باند فرکانسی موج میلی‌متری (۵۷ تا ۶۴ گیگاهرتز)، با استفاده از یک چینش جدید از تیغه‌های متامتریالی^۴، ارائه شده است. در اینجا، از یک آنتن دایپل سر-آتش به همراه تیغه‌هایی متامتریالی که شامل تک سلولی‌های اپسیلون نزدیک به صفر^۵ (ENZ) هستند و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به

محور x در جلوی آنتن به‌عنوان یک لنز متامتریالی، برای ارائه یک آنتن دو بیمی جا داده شده، استفاده کرده‌ایم. ساختار تک سلولی پیشنهادی بگونه‌ای است که با ایجاد دو تشدید در دو فرکانس مختلف، یک محیط متامتریالی با پهنای باند وسیع، ایجاد می‌کند. بارگذاری رزوناتورهای H-شکل در کنار خط تغذیه و در نزدیکی تشعشع‌کننده‌ها نیز باعث کاهش میزان سطح لوب کناری^۶ (SLL) آنتن می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار طراحی شده نشان می‌دهد، بیشینه بهره آنتن در فرکانس مرکزی ۶۰ گیگا هرتز، برابر ۹/۵ دسیبل است. همچنین، دو بیم مجزا در ۶۰ و ۱۲۰ درجه در صفحه‌ی E-plane ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که عملکرد آنتن پیشنهادی، توسط دو نرم‌افزار تمام‌موج HFSSv18 و CST-MWS 2016 مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ساز و کار تولید آنتن دو بیمی به کمک تک سلولی‌های فراماده‌ی پیشنهادی

برای طراحی یک آنتن دوبیمی با استفاده از یک المان تک تغذیه، تک سلولی‌های غیر همسان‌گرد^۷ فراماده، که نقش یک لنز متامتریالی را ایفا می‌کنند، در مقابل آنتن با زاویه‌ی ϕ نسبت به محور X قرار می‌گیرند، که در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که در مرجع [۴] بیان شده است، آنتن دوقطبی، نقش یک منبع شبه TE را دارد که امواج الکترومغناطیسی را تشعشع می‌نماید. این پدیده را می‌توان اینگونه توضیح داد که لایه‌های کج متامتریالی منجر به داشتن یک تانسور نفوذپذیری مصنوعی جدید می‌شوند و از این‌رو عدد موج تغییر خواهد کرد و همین امر منجر به شیفت فاز و همچنین انحراف پرتو می‌شود.



شکل (۱): آنتن پایبونی بارگذاری شده با تک سلولی‌های متامتریالی ENZ کج شده در صفحه‌ی افقی

Figure (1): The Bow-tie antenna loaded with ENZ unit-cells metamaterial tilted in the azimuth plane

برای توجیه مناسب‌تر مفهوم این پدیده و همچنین مشاهده تأثیر هر پرتو، میدان کل را بر اساس تحلیل‌هایی که در مرجع [۴] انجام شده است، را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\text{Total field} = T \sum_{i=-3}^3 e^{-j(kr_i + \phi_i)} \quad (1)$$

تابع انتقال T برای ساختار نمایش داده شده در شکل (۱)، با محاسبه‌ی ضرایب انتقال (t_1, t_2) و ضرایب بازگشت (r_1, r_2) امواج برخوردی با ساختار، مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$T = \frac{t_1 t_2 e^{-j(k_y t)}}{1 - r_2^2 e^{-2j(k_y t)}} \quad (2)$$

که در آن پارامتر K_y مربوط به عدد موج، یک موج الکترومغناطیسی در ناحیه متامتریالی و k عدد موج در فضای آزاد است:

$$K_y = w \sqrt{\mu_y \times \epsilon_y} \quad (3)$$

علاوه بر این، پارامتر ϕ_i مربوط به فاز هر پرتو ساطع شده از آنتن بر روی روزنه‌ی آنتن به شرح زیر است:

$$\phi_i = k_y \times d_i, i = -3, \dots, 3 \quad (4)$$

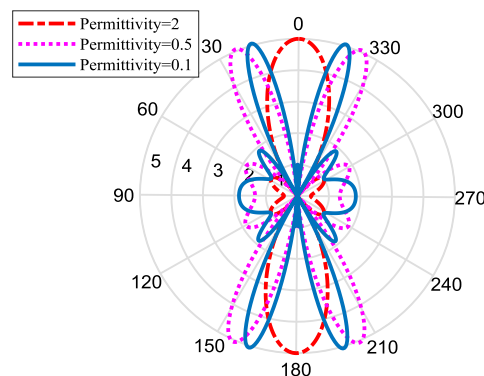
در رابطه بالا، فرض بر این است که هفت منبع نقطه‌ای در روزنه‌ی آنتن، که فاصله بین هر عنصر متوالی d است، وجود دارد. علاوه بر این، تغییرات فاز در میدان دور مطابق رابطه زیر است:

$$r_o - r_i = i \times d \times \sin(\alpha) \quad (5)$$

با جایگزینی تغییرات فاز در میدان کل، AF مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AF = T \sum_{i=-3}^{i=3} e^{-j(ikd \sin(\alpha) + \phi_i)} \quad (6)$$

بنابراین، می‌توان میدان کل را با ضرب کردن AF در میدان الکتریکی آنتن پاپیونی تخمین زد، که در شکل (۲) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک الگوی دو بیمی تشکیل شده است. لازم به ذکر است که با افزایش طول تیغه‌های متامتریالی در امتداد جهت x ، یک اختلاف فاز بزرگ حاصل می‌شود که منجر به انحراف بیشتر پرتو می‌شود.



شکل (۲): الگوی تابش محاسبه شده آنتن پاپیونی با محیط ENZ در امتداد جهت‌های x و $-x$.

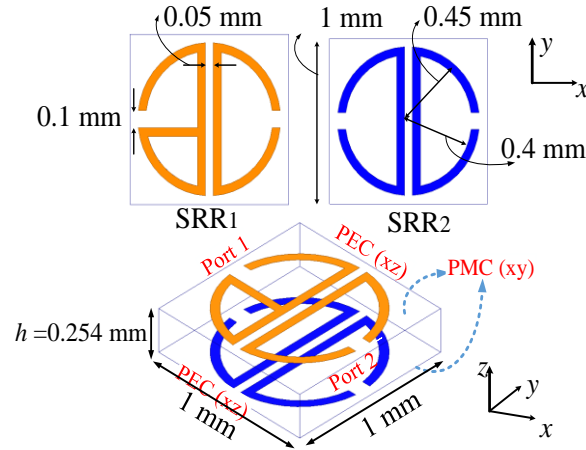
Figure (2): The calculated radiation pattern of the Bow-tie antenna integrated with ENZ medium along the $+x$ and $-x$ directions.

۳- معرفی تک سلولی دو طرفه‌ی فراماده‌ی پیشنهادی

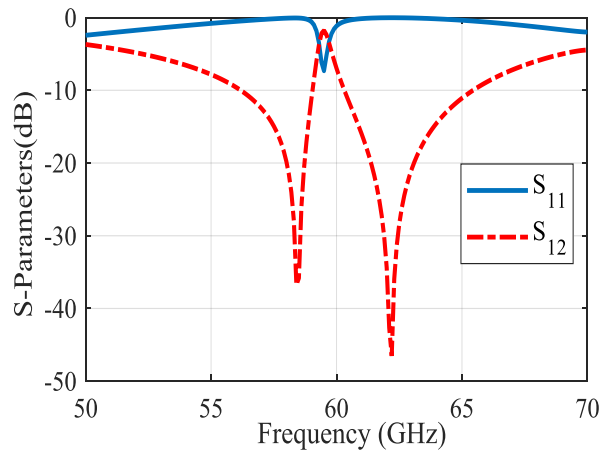
در این بخش، به‌طور کامل به معرفی تک سلولی فراماده پیشنهادی به‌منظور تحقق محیطی با ضریب نفوذپذیری الکتریکی منفی اشاره می‌شود. تک سلولی پیشنهادی، با استفاده از پیکربندی نمایش داده شده در شکل (۳)، توسط دو بخش تشدید حلقه تقسیم^۸ (SRR) بالای (SRR₁) و SRR پایینی (SRR₂) طراحی شده است. با تحریک تک سلولی فراماده، توسط امواج EM، یک تشدید الکتریکی ایجاد می‌گردد. لازم به ذکر است که میدان الکتریکی، الزاماً باید در راستای محور حلقه (در جهت y) باشد تا تشدید الکتریکی رخ دهد [۴]. ساختار اساساً به‌عنوان یک مدار تشدیدگر LC عمل می‌کند، به‌طوری‌که اندوکتانس معادل آن توسط خطوط انتقال حلقه‌ای شکل و ظرفیت خازنی توسط شکاف بین حلقه‌ها موازی تعیین می‌شود. فرکانس تشدید الکتریکی، تحت تأثیر عواملی همچون شعاع حلقه و شکاف بین حلقه‌های موازی قرار دارد. تک سلولی پیشنهاد شده در شکل (۳)، شامل دو تشدیدگر است که در دو طرف یک زیرلایه‌ی Rogers RT5880، با ضخامت 0.254 میلی‌متر، ثابت عایقی $2/2$ و تانژانت تلفاتی برابر 0.009 طراحی شده است. برای استخراج پارامترهای تک سلولی پیشنهادی همانند ضریب نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی و همچنین ضریب شکست، دو پورت در راستای صفحه‌ی yz قرار گرفته و به وسیله میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب در امتداد صفحات xy و xz تحریک می‌شوند. شرایط مرزی رسانایی مغناطیسی کامل^۹ (PMC) و هادی الکتریکی کامل^{۱۰} (PEC) و پورت‌ها مطابق با آنچه که توضیح داده شد، در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. در شکل (۴) مشخصه‌های نظیر تلفات بازگشتی (S₁₁) و تلفات عبوری (S₁₂) مربوط به ساختار فراماده پیشنهادی، توسط نرم‌افزار تمام موج HFSS v.18 حاصل گردیده‌اند، نمایش داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که ساختار پیشنهادی دارای دو صفر انتقال در فرکانس‌های 57 و 62 گیگاهرتز است که این به دلیل تفاوت عناصر موجود در هر تشدیدگر است.

پارامترهای سازنده تک سلولی پیشنهادی از طریق رابطه Kramer-Kronning، در مرجع [۵] به‌دست می‌آید که در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو فرکانس کار، محیطی با ضریب نفوذپذیری الکتریکی منفی ایجاد

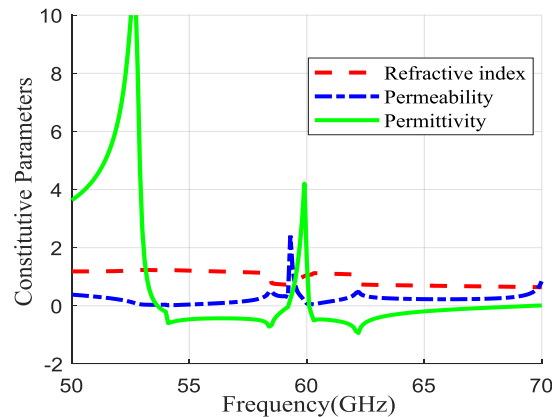
می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که این ساختار، در یک پهنای باند فرکانسی وسیعی، رفتار فراماده داشته باشد. این ویژگی، از مهم‌ترین مزایای این مقاله برای بهبود بهره و ایجاد دو بیم در باند فرکانسی ۵۷ تا ۶۶ گیگاهرتز است. بنابراین، می‌توان با در نظر گرفتن آرایه‌ای از این سلول واحد از آن به‌عنوان یک لنز فراماده در طراحی آنتن مورد نظر استفاده کرد.



شکل (۳): هندسه‌ی تک سلولی‌های ENZ پیشنهادی طراحی شده بر روی یک زیرلایه‌ی عایقی
Figure (3): Geometry of the proposed ENZ metamaterial unit-cell fabricated on the dielectric substrate



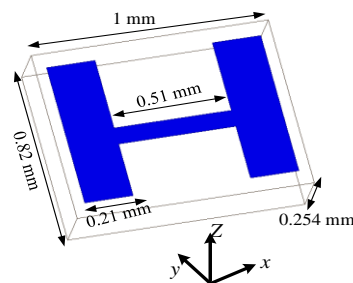
شکل (۴): پارامترهای S_{11} و S_{12} تک سلولی‌های ENZ پیشنهادی
Figure (4): S-parameter (S_{12} and S_{11}) response of the proposed ENZ unit-cells



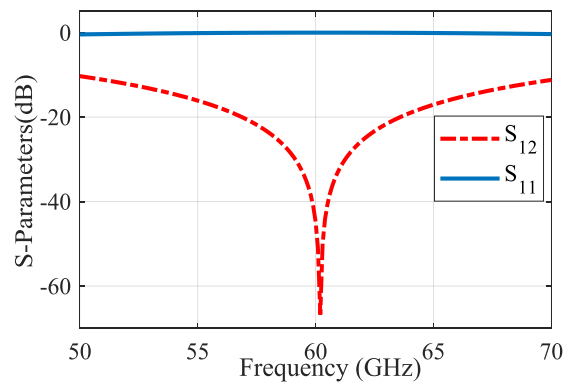
شکل (۵): بخش حقیقی ضریب شکست و ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب گذردهی مغناطیسی تک سلولی پیشنهادی
Figure (5): The extracted refractive index, permeability, and permittivity of the proposed unit cell

از سوی دیگر، به منظور ارتقاء بهره آنتن و کاهش سطح لوب کناری آنتن پیشنهادی، آرایه‌ای از رزوناتورهای H-شکل که در شکل (۶) نشان داده شده است، به کار گرفته می‌شود. این رزوناتور بر اساس ساختار SRR شرح داده شده در مرجع [۴] پیشنهاد شده و در هر دو طرف زیر لایه در مجاورت عناصر تشعشع کننده آنتن پاپیونی جاسازی شده است. برای استخراج تلفات بازگشتی و تلفات عبوری از سلول پیشنهاد شده، پورت‌ها را در امتداد محور y قرار داده شده تا میدان الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب در امتداد مسیرهای x و z تحریک گردد. ضریب انتقال و بازتاب در شکل (۷) نشان می‌دهد که این ساختار دارای ویژگی باند توقف در محدوده فرکانسی ۶۶-۵۶ گیگاهرتز است.

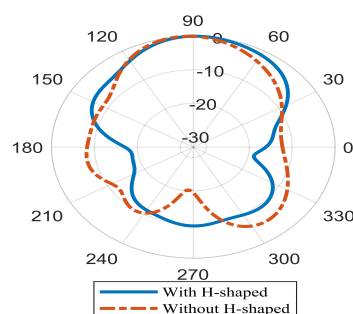
به منظور نشان دادن تأثیر رزوناتورهای H-شکل، الگوی تابش آنتن اصلی با و بدون رزوناتورهای H-شکل در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز در شکل (۸) ترسیم شده است. می‌توان مشاهده کرد که با قرار دادن رزوناتورهای H-شکل در مجاورت خط تغذیه آنتن پاپیونی، منجر به بهبود تابش گلبرگ‌های پشتی^{۱۱} و لوب کناری در صفحه‌ی E-plane می‌شود. تراز گلبرگ کناری که از جمله پارامترهای مهم آنتن و بیان‌گر نسبت بیشترین مقدار دامنه گلبرگ‌های کناری به گلبرگ اصلی است و متناسب با افزایش جهت‌دهندگی و افزایش بهره، بهبود می‌یابد.



شکل (۶): هندسه‌ی تک سلولی H-شکل
Figure (6): Geometry of the H-shaped unit-cell



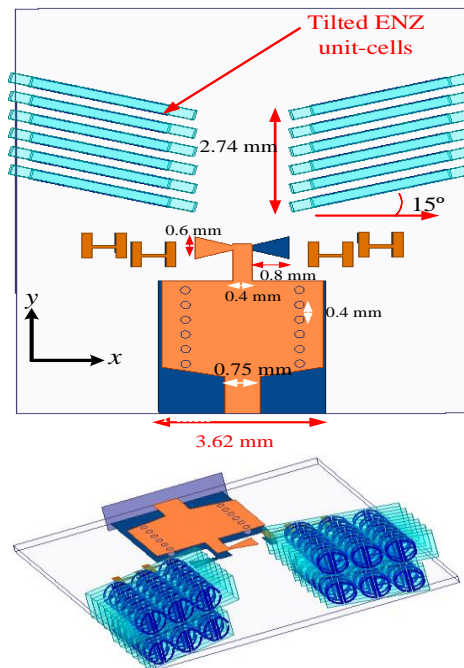
شکل (۷): اندازه‌ی پارامترهای S_{11} و S_{12} سلولی‌های H-شکل
Figure (7): The S-parameters (S_{12} and S_{11}) of H-shaped unit-cell



شکل (۸): الگوی تشعشعی آنتن اصلی با و بدون رزوناتورهای H-شکل در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز
Figure (8): The radiation patterns of Bowtie antenna with and without H-shaped resonator at 60 GHz

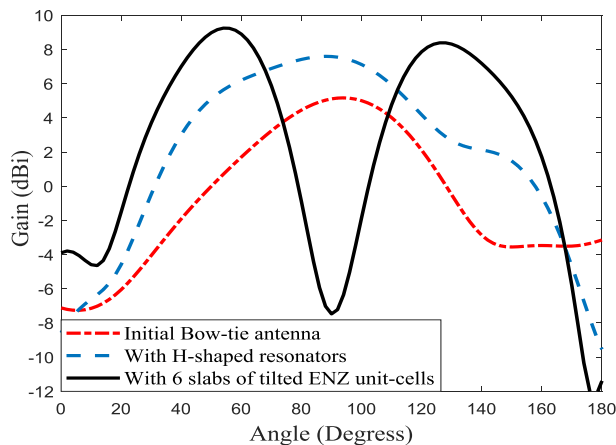
۴- معرفی یک آنتن سر-آتش به همراه بارگذاری تیغه‌های فراماده پیشنهادی

در این بخش، آنتن پاپیونی سر-آتش ارائه شده، یک نسخه اصلاح شده از آنتن طراحی شده در مرجع [۱۷] است. آنتن پاپیونی طراحی شده، در شکل (۹) بر روی یک زیرلایه Rogers RT5880، با ضخامت 0.254 میلی‌متر، ثابت عایقی $2/2$ و تانژانت تلفاتی برابر 0.009 قرار گرفته است. عامل تولید دو بیم در این آنتن، چیدمان مناسب آرایه‌ای از تیغه‌های فراماده است، که به-طور عمودی در صفحه xy و با زاویه φ نسبت به محور x در مقابل بازوهای آنتن بارگذاری شده‌اند. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، تعداد ۱۲ تیغه از تک سلول‌های متامتریالی ENZ به‌طور متقارن، در بالا و پایین زیرلایه، بارگذاری شده است. طول کل تیغه‌های متامتریالی بارگذاری شده در راستای محور آنتن و در جهت محور y ، $2/74$ میلی‌متر است و فاصله بین تشعشع‌کننده‌های آنتن پاپیونی و تیغه‌های متامتریالی برابر 0.68 میلی‌متر است که منجر به بهره‌برداری بهینه از اثر متقابل بین آنتن و تیغه‌ها می‌گردد. همچنین به‌منظور کاهش سطح لوب کناری آنتن، چهار جفت تشدیدگر H-شکل در کنار خط تغذیه و در نزدیکی تشعشع‌کننده‌ها جاسازی شده‌اند. همان‌طور که در بخش دوم توضیح داده شده است، برای به‌دست آوردن یک آنتن دوبیمی، لازم است که سلول‌های واحد ENZ کج شده در مقابل یک منبع TE قرار گیرند. برای این منظور، ۱۲ تیغه متامتریالی را در مقابل تشعشع‌کننده‌های آنتن پاپیونی قرار داده شده است. تیغه‌های متامتریالی با زاویه 15° درجه از محور x کج می‌شود، این درحالی‌ست که هر تیغه حاوی 2×3 سلول واحد ENZ است. لازم به ذکر است که تیغه‌های متامتریالی کج شده برای ایجاد دو بیم مجزا در 60° و 120° درجه در فرکانس 60 گیگاهرتز تنظیم می‌شوند.



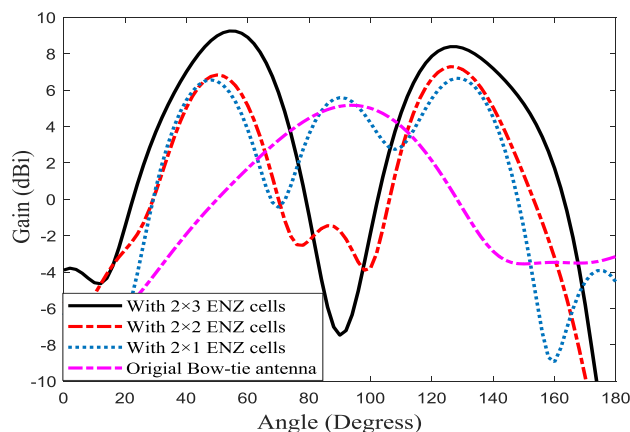
شکل (۹): شکل هندسی آنتن پیشنهادی. (قسمت بالا نمای جانبی و قسمت پایین نمای سه بعدی است)
Figure (9): The configuration of the proposed antenna. (The top is a side view, and the bottom is a 3D view)

الگوی تابش حاصل از آنتن پاپیونی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. دیده می‌شود که وقتی چهار جفت رزوناتور H-شکل در قسمت پشتی تشعشع‌کننده‌ها بارگذاری می‌شود، طول پرتو ۳ دسیبل آنتن افزایش می‌یابد. طول پرتو ۳ دسیبل آنتن پاپیونی با چهار جفت رزوناتور H-شکل، از 40 تا 124 درجه افزایش یافته در صورتی که طول پرتو ۳ دسیبل آنتن اصلی از 68 تا 115 درجه است. علاوه بر این می‌توان متوجه شد که تعبیه تیغه‌های متامتریالی کج شده با زاویه 15° درجه نسبت به محور x ، نه تنها دو بیم مجزا در 60° و 120° درجه در صفحه E-plane ایجاد می‌کند، بلکه باعث افزایش $2/2$ دسیبل بهره در 60° گیگاهرتز نیز می‌شود.



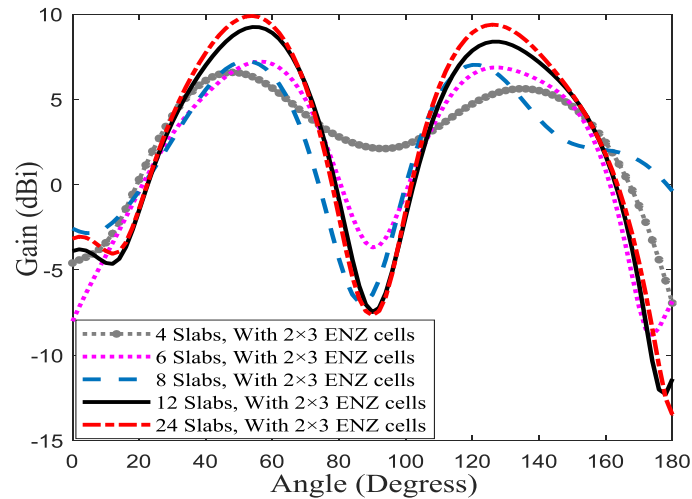
شکل (۱۰): الگوهای تشعشعی آنتن، در مقایسه با نمونه اولیه، ساختار H-شکل و تک سلول‌های ENZ در ۶۰ گیگاهرتز
Figure (10): The comparison between radiation patterns of the initial antenna with H-shaped resonator and the ENZ cells at 60 GHz

در ادامه برای مشاهده تأثیر تعداد تیغه‌ها و تعداد تک سلول‌های در هر تیغه‌ها، بر الگوی تشعشعی آنتن و تولید یک آنتن دوبیمی یک مطالعه پارامتری انجام می‌شود. بارگذاری تیغه‌های ENZ در مقابل آنتن پاپیونی سر-آتش و افزایش طول آن در جهت $\pm x$ ، منجر به تشکیل دو بیم متقارن در ۶۰ و ۱۲۰ درجه می‌شود و باعث کاهش تابش در جهت سر-آتش (۹۰ درجه) می‌گردد. با افزایش تعداد تک سلول‌ها در هر تیغه از ۱ تا ۳، طول صفحات ENZ در امتداد جهت $\pm x$ افزایش می‌یابد و مطابق با آنچه در بخش دوم توضیح داده شد، افزایش طول این صفحات منجر به یک جابجایی فاز سریع می‌شود و یک زاویه انحراف بیشتر را ایجاد می‌کند. نتایج این مطالعه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. واضح است که با افزایش تعداد سلول‌های ENZ در امتداد محور x ، از 1×2 تا 3×2 قدرت در امتداد جهت سر-آتش آنتن (۹۰ درجه) کاهش می‌یابد. بنابراین، آرایه 3×2 از تک سلول‌های ENZ کج شده به‌عنوان ترتیب بهینه انتخاب شده است.



شکل (۱۱): الگوی‌های تابش آنتن با بارگذاری آرایه‌های مختلف از سلول‌های واحد ENZ در جهت‌های $x+$ و $x-$ در ۶۰ گیگاهرتز
Figure (11): The radiation patterns of the antenna integrated by different ENZ unit cells along the $+x$ and $-x$ directions at 60 GHz

اکنون، هدف، انتخاب تیغه‌ها به تعداد مناسب است که اولاً ابعاد مدار بیش از حد بزرگ نشود و ثانیاً، بهره تا حد ممکن افزایش یابد. در همین راستا، از تعداد ۶، ۱۲ و ۲۴ تیغه استفاده شده است و در شکل (۱۲)، گزارش این چند انتخاب برای بیان میزان بهره را نمایش داده شده است. نکته حایز اهمیت این است که با افزایش تعداد تیغه‌ها از ۱۲ تا ۲۴، بهره آنتن تنها به میزان 0.5 دسیبل افزایش می‌یابد. این در حالی است که ابعاد ساختار، تقریباً دو برابر می‌گردد. بنابراین، با در نظر گرفتن ملاحظات ابعادی ساختار، تعداد ۱۲ تیغه را به‌عنوان طراحی بهینه انتخاب شده است. لازم به ذکر است، میزان بهره در این حالت، در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز برابر $9/5$ دسیبل است.

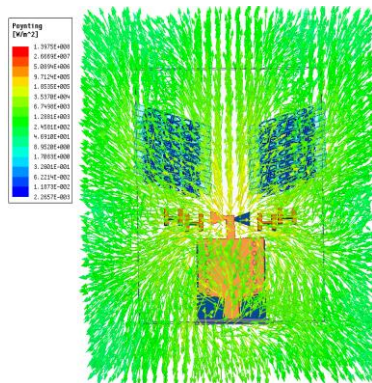


شکل (۱۲): الگوی‌های تابش آنتن با بارگذاری آرایه‌های مختلف از تیغه‌های سلول‌های واحد ENZ در ۶۰ گیگاهرتز

Figure (12): The radiation patterns of the antenna integrated by different ENZ slabs at 60 GHz

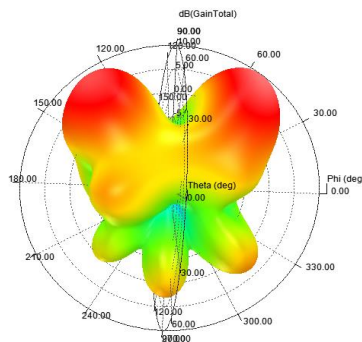
توزیع بردار پوینتینگ در ۶۰ گیگاهرتز در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که چگونه میدان آنتن تحت تاثیر محدوده‌ی فراماده قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل نیز مشهود است، انرژی تابشی از آنتن پاپیونی تحت تاثیر تیغه‌های متامتریالی کج شده به دو جهت متمایز هدایت می‌شود.

شکل (۱۴) الگوی تشعشی سه بعدی آنتن را در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز نمایش می‌دهد. این شکل دید مناسب‌تری از میزان تشعشع آنتن، در اطراف خود را بیان می‌نماید.



شکل (۱۳): توزیع بردار پوینتینگ در ۶۰ گیگاهرتز

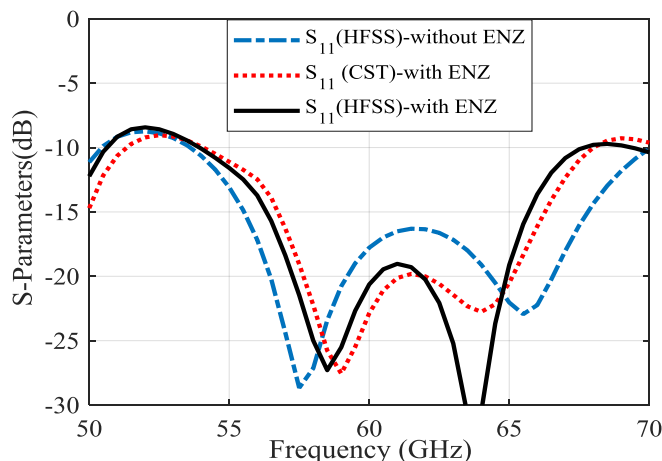
Figure (13): The Poynting vector distribution at 60 GHz



شکل (۱۴): الگوی تشعشی سه بعدی آنتن در ۶۰ گیگاهرتز، به همراه تک سلول‌های متامتریالی

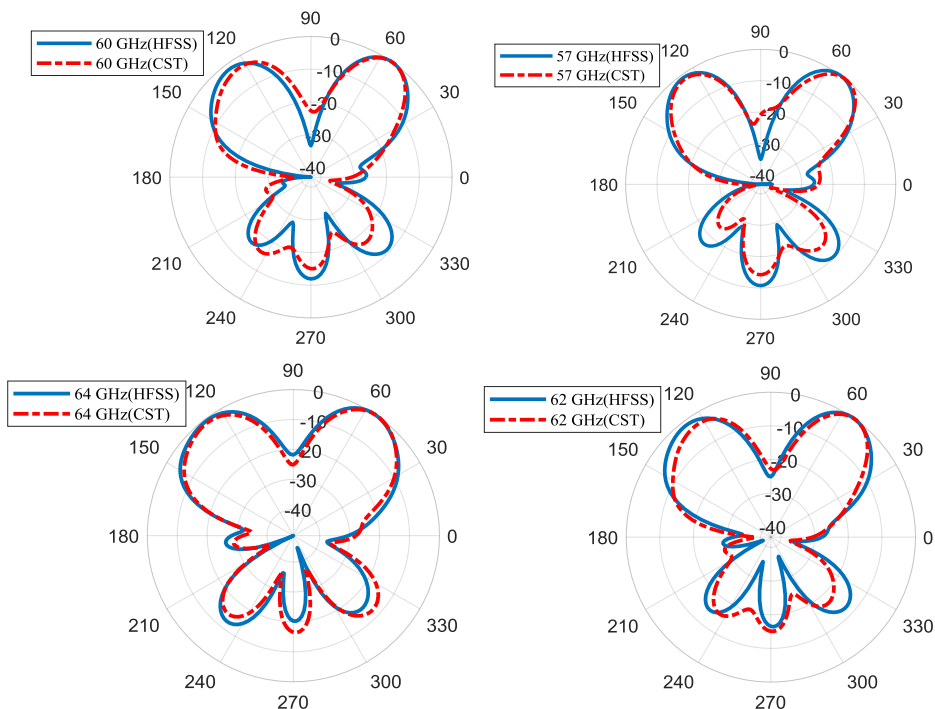
Figure (14): The 3D radiation pattern of the antenna when loaded metamaterial unit cells at 60 GHz

نتایج شبیه‌سازی پارامتر تلفات بازگشتی آنتن پیشنهادی توسط دو نرم‌افزار HFSSv18 و CST-MWS 2016، در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تناسب خوبی بین نتایج حاصل از دو نرم‌افزار، برقرار است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که مقدار S_{11} کمتر از -10 دسیبل برای بازه فرکانسی (۵۴ تا ۶۸ گیگاهرتز)، به دست آمده است. این آنتن، قابلیت پوشش باند فرکانسی سیستم‌های مخابراتی WiGig، یعنی بازه (۵۷ تا ۶۴ گیگاهرتز) را به خوبی داراست.



شکل (۱۵): شبیه‌سازی اندازه‌ی پارامتر ضریب تلفات بازگشتی آنتن با و بدون تک سلولی‌های ENZ
Figure (15): The simulated reflection coefficients of the antenna with and without loaded ENZ unit cells

الگوی تشعشعی دو بعدی حاصل از شبیه‌سازی تمام موج آنتن سر-آتش پیشنهادی به همراه تیغه‌های متامتریالی، در شکل (۱۶)، برای فرکانس‌های ۵۷، ۶۰، ۶۲ و ۶۴ گیگاهرتز در صفحه E-plane، نمایش داده شده است. در اینجا نیز، تناسب مناسبی بین نتایج حاصل از دو نرم‌افزار مشاهده می‌گردد. جهت پرتو اصلی آنتن پیشنهادی در دو زاویه ۶۰ و ۱۲۰ درجه بدون تغییر باقی مانده است. علاوه بر این، مقدار تابش در صفحه xy برای فرکانس ۵ گیگاهرتز برابر -20 دسیبل است.



شکل (۱۶): الگوی تشعشعی دو بعدی آنتن پیشنهادی در فرکانس‌های ۵۷ GHz، ۶۰ GHz، ۶۲ GHz و ۶۴ GHz
Figure (16): The radiation patterns of the proposed antenna at 57 GHz, 60 GHz, 62 GHz, 64 GHz

بهره آنتن پیشنهادی در فرکانس ۵۸، ۶۰ و ۶۳ گیگاهرتز به ترتیب ۸/۹، ۹/۵ و ۹/۱ دسیبل است. در جدول (۱) مشخصه‌های شایان ذکر آنتن پیشنهادی، با عملکرد دیگر ساختارهای پیشین ارائه شده در مقالات، مقایسه شده است. ویژگی‌های قابل توجه ساختار پیشنهادی شامل دستیابی به یک بهره بالا و همچنین، ابعاد کوچک و از همه مهم‌تر، داشتن دو بیم مجزا و سادگی طراحی تک سلولی و تیغه‌های متامتریالی آن است. آنتن پیشنهاد شده برای سیستم‌های ارتباطی داخلی موج میلیمتری کاربرد دارد.

Table (1): The comparison among the proposed antenna and some designs of dual-beam antennas
جدول (۱): مقایسه آنتن پیشنهادی با دیگر آنتن‌های دو بیمی طراحی شده در مقالات

بیم آنتن	میانگین بهره (dB)	ابعاد آنتن (mm ³)	روش طراحی	بازه فرکانسی (GHz)	مرجع
۱۸°، -۳۰°	۸/۵	۴۳×۲۰×۱	تک سلولی‌های مسطح	۸-۹	[۱۸]
±۴۰°	۸	۲۰×۲۵×۵/۲۰۴	آرایه‌ای از تک سلولی‌های متامتریال	۲۶-۳۱	[۱۹]
±۳۰°	۹	۹۰×۲۰×۱۷	آرایه‌ای از تک سلولی‌های متامتریال	۵۵-۶۵	[۲۰]
±۴۷°	۸/۸	۱۵/۸×۱۵×۱/۵۸	ساختارهای حفره‌ای	۲۷/۸-۳۰/۹	[۲۱]
۱۲۰°، +۶۰°	۹/۵	۹×۱۰×۲/۲۵۴	آرایه‌ای از تک سلولی‌های متامتریال	۵۷-۶۴	این مقاله

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور دستیابی به یک آنتن دو بیمی، یک آرایه و چیدمان جدیدی از ساختار فراماده‌ی پیشنهادی در صفحه افقی آنتن، استفاده شده است. با کج قرار دادن تیغه‌های متامتریالی در امتداد محور x، می‌توان تنها با یک آنتن سر-آتش پایبونی، دو بیم مجزا در ۶۰ و ۱۲۰ درجه در صفحه E-plane دست یافت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تمام موج توسط دو نرم-افزار HFSSv18 و CST-MWS 2016، نشان می‌دهد که آنتن پیشنهاد شده قابلیت پوشش باند فرکانسی (۵۷ تا ۶۵ گیگاهرتز) به منظور عملکرد مناسب در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم WiGig را داراست. علاوه بر این، نشان داده شده است که با قرار دادن چهار جفت رزونانس H-شکل در مجاورت خط تغذیه و تشعشع کننده‌ها، سطح لوب کناری کاهش می‌یابد و بهره آنتن نیز تا ۹/۵ دسیبل افزایش می‌یابد. با توجه به ویژگی‌های گفته شده و سادگی تکنیک به کار رفته، این آنتن یک نامزد خوب برای برنامه‌های کاربردی MIMO و ارتباطات داخلی در ۶۰ گیگاهرتز است.

References

مراجع

- [1] S. Kirthiga, M. Jayakumar, "Performance of dual beam MIMO for millimeter wave indoor communication systems", Springer Wireless Personal Communications, no. 1, pp. 289-307, 2014 (doi:10.1007/s11277-013-1506-0).
- [2] K. Li, M.I. Ingram, E.O. Rausch., "Multi beam antennas for indoor wireless communications", IEEE Trans. on Communications, vol. 50, no. 2, pp. 192-194, Feb. 2002 (doi: 10.1109/26.983314).
- [3] J. Du, E. Onaran, D. Chizhik, S. Venkatesan, R.A. Valenzuela., "Gbps user rates using mm wave relayed backhaul with high gain antennas", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1363-1372, June 2017 (doi: 10.1109/JSAC.2017.2686578).
- [4] A. Dadgarpour, M.S. Sorkherizi, T.A. Denidni, A.A. Kishk., "Passive beam switching and dual-beam radiation slot antenna loaded with ENZ medium and excited through ridge gap waveguide at millimeter-waves", IEEE Trans. on Antennas Propagation, vol. 65, no. 1, pp. 92-102, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TAP.2-016.2631140).
- [5] A. Dadgarpour, B. Zarghooni, B.S. Virdee, T.A. Denidni, "Beam deflection using gradient refractive index media for 60 GHz end-fire antenna", IEEE Trans. on Antennas Propagation, vol. 63, pp.3768-3774, Aug. 2015 (doi: 10.1109/TAP.2015.2438396).

- [6] S.G. Kim, K. Chang, "Independently controllable dual-feed dual-beam phased array using piezoelectric transducers", *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 1, pp. 81–83, 2002 (doi: 10.1109/LAWP.2002.802551).
- [7] W. Cao, W. Hong, Z.N. Chen, B. Zhang, A. Liu., "Gain enhancement of beam scanning substrate integrated waveguide slot array antennas using a phase-correcting grating cover", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 62, pp. 4584–4591, 2014 (doi: 10.1109/TAP.2014.2333058).
- [8] K. Hosoya, N. Prasad, K. Ramachandran, N. Orihashi, S. Kishimoto, S. Rampath, K. Maruhashi., "Multiple sector ID capture (MIDC): A novel beamforming technique for 60 GHz band multi-Gbps WLAN/PAN systems", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 81, no.1, pp. 81–96, 2015 (doi: 10.1109/TAP.2014.2-365209).
- [9] N. Malekpour, M.A. Honarvar, A. Dadgarpour, B.S. Virdee, T.A. Denidni, "Compact UWB mimo antenna with band-notched characteristic", *Microwave and Optimal Technology Letters*, vol. 59, pp. 1037-1041, 2017 (doi: 10.1002/mop.30462).
- [10] Z.L. Ma, L.J. Jiang, "One-dimensional triple periodic dual-beam microstrip leaky-wave antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 390-393, 2015 (doi:10.1109/LAWP.2014.2365394).
- [11] A. Khidre, K.F. Lee, A.Z. Elsherbeni, F. Yang., "Wide band dual-beam u-slot microstrip antenna", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 61, no. 3, pp. 1415–1418, 2013 (doi: 10.1109/TAP.2012.2228617).
- [12] S. Liu, F. S. Qi, W. Wu, D.G. Fang., "Single-feed dual-band single/dual-beam U-slot antenna for wireless communication application", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 63, pp. 3759 - 3764, 2015 (doi: 10.1109/TAP.2015.2438331).
- [13] Y.Y. Bai, S. Xiao, M.C. Tang, Z.F. Ding, B.Z. Wang, "Wide-angle scanning phased array with pattern reconfigurable elements", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 59, no. 11, pp. 4071-4076, Nov. 2011 (doi: 10.1109/TAP.2011.2164176).
- [14] P. Xie, G. Wang, H. Li, T. Wen, X. Kong., "Frequency reconfigurable quasi-yagi antenna with a novel balun loading four PIN diodes", *Frequenz*, vol. 72, no. 5-6, pp. 189–195, 2018 (doi: 10.1515/freq-2016-0372).
- [15] Z. Liang, W. Qun, T.A. Denidni, "Electronically radiation pattern steerable antennas using active frequency selective surfaces", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6000-6007, 2013 (doi: 10.1109/TAP.2013.2282921).
- [16] Chang won Jung, Ming-jer Lee, G. P. Li and F. De Flaviis., "Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 54, no. 2, pp. 455-463, 2006 (doi: 10.1109/TAP.2005.863407).
- [17] A.A. Eldek, A.Z. Elsherbeni, C.E. Smith., "Wide-band modified printed bow-tie antenna with single and dual polarization for C- and X-band applications", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 53, no. 9, pp. 3067-3072, 2005 (doi: 10.1109/TAP.2005.851870).
- [18] Y. Hao, Z. Kuang, D. Xumin, W. Qun, "A dual-beam leaky-wave antenna based on squarely modulated reactance surface", *Applied Sciences*, vol. 10, no. 962, 2020 (doi:10.3390/app10030962).
- [19] Z. Wani, M.P. Abegaonkar, S.K. Koul, "Dual-beam antenna using routing of electromagnetic waves by single-epsilon-high anisotropic medium at 28-GHz", *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, vol. 68, no. 1, pp.142-151, 2019 (doi: 10.1109/TAP.2019.2938793).
- [20] A. Dadgarpour, A.A. Kishk, T.A. Denidni, "Dual band high-gain antenna with beam switching capability", *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. Vol. 11, no.15, pp. 2155-2161, 2017 (doi: 10.1049/iet-map.20-17.0294).
- [21] J. Tan, W. Jiang, S. Gong, T. Cheng, J. Ren, K. Zhang, "Design of a dual-beam cavity-backed patch antenna for future fifth generation wireless networks", *Antennas Propagation IET Microwaves*, vol. 12, no. 10, pp. 1700–1703, 2018 (doi: 10.1049/iet-map.2018.0085).

زیر نویس ها

1. Multiple-input multiple-output (MIMO)
2. Single pole double throw (SPDT)
3. Micro electromechanical system (MEMS)
4. Metamaterial slabs
5. Epsilon-near-zero
6. Side lobe level (SLL)
7. Anisotropic
8. Split ring resonator
9. Perfect magnetic conductor (PMC)
10. Perfect electrical conductor (PEC)
11. Back-lobe