طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن MIMO2x2 با پهنای باندامپدانسی فوق‌العاده با بهترین تطابق امپدانسی

محمدحسین منتظری فر[1]، جاسم جمالی[2*]، زهرا عادل‌پور[3]

چکیده

هدف پژوهش حاضر طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن MIMO2x2 با پهنای باندامپدانسی فوق‌العاده با بهترین تطابق امپدانسی است. در این پژوهش یک آنتن MIMO ۲×۲ با پهنای باند بسیار گسترده (Super-UWB MIMO antenna) در ابعاد ۸۴×۴۲ میلی‌متر مربع با پهنای باند 17/2 – 85/24 GHz ، پیشنهاد شده است. با توجه به باندهای فرکانسی ایجاد شده آنتن طراحی شده قابلیت استفاده در وسایل قابل حمل برای انواع ارتباطات بی‌سیم از قبیل IEEE 802.11 a/b/g/n و LTE و WiFi و Bluetooth و باند X، Ku و .... را دارا می‌باشد. این آنتن از دو آنتن مونوپل دایره‌ای شکل می‌باشد که شکاف‌ها و برش‌هایی بر روی آن ایجاد شده است و هر کدام از این آنتن‌ها به روش تغذیه هم محور 50 (CPW) اهمی تغذیه می‌شوند. برای افزایش ایزولاسیون (تزویج متقابل) مناسب این دو المان ضمن اینکه تغذیه آنتن به صورت عمود نسبت به یکدیگر جانمایی شده‌اند، از یک نوار مستطیلی شکل به عنوان المان پارازتیکی استفاده شده است. طرح پیشنهادی بعد از شبیه‌سازی به صورت نمونه‌ی اولیه ساخته شده و پارامترهای آن اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که آنتن MIMO پیشنهادی دارای پهنای باند امپدانسی ۲/۱۷ تا ۲۴/۸۵ گیگاهرتز با ایزولاسیون dB 6/21 و ماکزیمم بهره‌ی dB 9/6 و ضریب همبستگی کمتر از ۰/۰۰۵ می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، آنتن MIMO2x2 ، روش تغذیه CWP

دریافت مقاله:

پذیرش مقاله:

۱-مقدمه

امروزه نقش آنتن‌ها در عملکرد سیستم‌های مخابراتی بسیار مهم می‌باشد و نقش بسیار اساسی در بخش ابتدایی و انتهایی سیستم‌های مخابراتی و ارتباطی دارند. در صورت استفاده از آنتن‌هایی با شرایط ناهم‌خوان و نامناسب با سیستم ارتباطی، روند کار سیستم ارتباطی با مشکل مواجه می‌گردد. در این بین، آنتن‌های مایکرواستریپی به دلیل ساختار ساده، هزینه ساخت پایین، قابلیت یکپارچه‌سازی آسان با مدارهای مجتمع و ابعاد کوچک، به عنوان انتخابی ایده‌آل در طیف گسترده‌ای از سیستم‌های ارتباطی از جمله ماهواره‌ای، موبایل و دستگاه‌های قابل حمل شناخته می‌شوند (۱) (۲).

البته با توجه به پژوهش‌ها و پیشرفت‌هایی که در سالیان گذشته بر روی ارتباطات و فناوری UWB صورت گرفته است، چالش‌های جدیدی همچنان در این حوزه وجود دارد که باعث شده است تحقیقات و مطالعات در خصوص تکنولوژی UWB همچنان ادامه داشته باشد (۳).

[1] * پست الکترونیک نویسنده مسئول: **Jasem.jamali@iau.ac.ir**

۱. دستیارآموزشی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون

۳. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

نکته‌ی مهم و مورد بحث در استفاده از سیستم‌های UWB "طراحی بهینه آنتن‌ها "می‌باشد؛ چرا که عملکرد کل سیستم UWB را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات صورت گرفته در این رساله نیز با هدف طراحی آنتنی با قابلیت استفاده در سیستم‌های UWB می‌باشد. استانداردهای FCCپهنای باند امپدانسی ۷/۵ گیگاهرتزی (۳/۱ تا ۱۰/۶ گیگاهرتز) را برای سیستم‌های UWB تعریف می‌کند. با توجه به این پهنای باند وسیع، طراحی آنتنی که بتواند در طول این باند فرکانسی ۷/۵ گیگاهرتزی ویژگی‌های خود را حفظ نماید، یکی از مشکلات اساسی در طراحی آنتن‌های UWBمی‌باشد. علاوه بر این، باید دارای ابعاد کوچک و مناسبی باشد تا به راحتی در سیستم‌های ارتباطی قابل حمل مورد استفاده قرار گیرد و به راحتی با مدارات این سیستم‌ها قابلیت ادغام را نیز داشته باشد. پترن تشعشعی آنتن طراحی شده نیز با توجه به محل قرارگیری سیستم‌های گیرنده و فرستنده بسیار مهم می‌باشد؛ چرا که آنتن طراحی شده باید دارای پترن تشعشعی همه جهته باشد تا نسبت به محل قرارگیری و ارتباط سامانه‌های مخابراتی و ارتباطی با یکدیگر آزادی عمل داشته باشیم.

در سیستم‌های UWB سیگنال‌های ارسالی و دریافتی به صورت یک سری پالس باریک شکل با دوره‌هایی کمتر از ۱ نانوثانیه هستند. با توجه به ماهیت این سیگنال‌ها، اعوجاج باعث خراب شدن ماهیت سیگنال می‌گردد؛ از این رو طراحی آنتنی که بتواند سیگنال‌های UWB را با کمترین اعوجاج ممکن دریافت نماید، یکی از موارد مهم در طراحی آنتن‌های UWB می‌باشد. یکی دیگر از مهم‌ترین چالش‌ها و موارد موجود در مسیر طراحی سیستم‌های UWB وجود تداخل فرکانسی با سایر استانداردهای سیستم‌های بی‌سیم باند باریک از قبیلIEEE802.16 ، IEEE802.11a/b/g/n، باند فرکانسیC ، باند فرکانسی X و... می‌باشد. این طراحی باید به گونه‌ای باشد که تداخل با باندهای باریک فرکانسی موجود به حداقل برسد.

با توجه به اینکه در اکثر سیستم‌ها و دستگاه‌های قابل حمل از سیستم‌های UWB برای برقراری ارتباط استفاده می‌شود، از این رو آنتن‌های طراحی شده برای این سیستم‌ها باید دارای ابعاد کوچک و مناسب باشند. پس یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی آنتن برای سیستم‌های UWB، اندازه و ابعاد آنتن می‌باشد؛ چرا که علاوه بر ابعاد سیستم‌های استفاده کننده از این آنتن، بر روی پهنای باند امپدانسی و بهره‌ی آنتن نیز تأثیرگذار می‌باشد. طراحی آنتنی که بتواند پهنای باند وسیع UWB را پوشش دهد، دارای بهره‌ای قابل قبول باشد و در عین حال پترن تشعشعی همه‌جهتی را حفظ کند، چالشی بزرگ است. در این بین، آنتن تک قطبی مایکرواستریپ با توجه به اینکه دارای ساختاری ساده، ابعاد کم و هزینه ساخت پایین می‌باشد، گزینه‌ای خوب برای استفاده در سیستم‌های UWB است.

با توجه به پیدایش سرویس‌های چندرسانه‌ای و بالا رفتن کیفیت داده‌ها، در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم نیاز به افزایش سرعت و ظرفیت کانال بیش از پیش می‌باشد که برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد، اما امروزه بهترین روش پیشنهادی برای بالا بردن سرعت انتقال داده‌ها استفاده از چند آنتن کنار هم در سیستم‌های ارتباطی می‌باشد. این روش می‌تواند سرعت انتقال داده‌ها را بدون استفاده از باند فرکانسی اضافی و یا افزایش توان سیستم در محیط‌های دارای پراکندگی، افزایش دهد. استفاده از تکنولوژی MIMOدر سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم بسیار مورد توجه می‌باشد، چرا که با استفاده از این فناوری بدون استفاده از توان اضافی که در سیستم‌های ارتباطی قابل حمل محدود می‌باشد و همچنین بدون نیاز به پهنای باند اضافی، ظرفیت و نرخ کانال افزایش می‌یابد.

در سیستم‌های مخابراتی پایه کار بر اساس انتقال سیگنال و امواج الکترومغناطیس می‌باشد. روش ارتباطی در غالب سیستم‌های ارتباطی و مخابراتی قدیمی بر پایه سیستم‌هایی با یک ورودی و یک خروجی (SISO) بود که در این روش، اساس انتشار امواج به شکل دید خط مستقیم (LOS) می‌باشد. ولی امروزه با پیشرفت ساختارهای شهری و به وجود آمدن ساختمان‌هایی بلند مرتبه امکان دید مستقیم بین آنتن‌های سیستم‌های فرستنده و گیرنده وجود

ندارد، از سوی دیگر سیگنال‌های ارسالی توسط فرستنده قبل از رسیدن به آنتن گیرنده، با توجه به وجود آمدن موانع زیاد در مسیر انتشار امواج و ساختمان‌های بلندمرتبه، تضیف می‌شوند و باعث می‌شود سیگنال‌های دریافتی در گیرنده دچار محو شودگی و چند مسیره می‌شوند. امواج ارسالی بوسیله‌ی آنتن فرستنده‌ها در مسیر انتشار در اثر هر برخورد به هر یک از موانع موجود در مسیر باعث تضعیف سیگنال اصلی و همچنین اعوجاج، به وجود امدن شیفت فاز امواج اصلی و تأخیر زمانی می‌شود. وجود موانع در مسیر امواج اصلی باعث پراکنده شدن امواج اصلی و در نتیجه باعث به وجود آمدن مسیرهای گوناگونی از امواج می‌شود که از سمت آنتن گیرنده دریافت می‌گردد، به هر یک از این مسیرهای به وجود آمده مسیرهای انتشار[1] امواج گفته می‌شود. به این پدیده که امواج ارسالی از فرستنده از مسیرهای گوناگون و مختلفی به آنتن گیرنده می‌رسد، انتشار امواج چند مسیره[2] گفته می‌شود. پدیده‌ی انتشار امواج چند مسیره بر روی عملکرد سیستم‌های مخابراتی و ارتباطی تأثیر بسیار منفی دارد و باعث اختلال دریافت امواج می‌شود، چرا که دریافت سیگنال اصلی بوسیله‌ی آنتن سیستم گیرنده از چندین مسیر مختلف، باعث بوجود آمدن تداخل و اختلال در دریافت سیگنال اصلی می‌گردد.

محققان و پژوهشگران به منظور رفع مشکل انتشار امواج به صورت چند مسیره و رفع مشکل تداخل در دریافت امواج، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی پیشنهاد کرده‌اند که از جمله این موارد می‌توان به استفاده از آنتن‌هایی با پترن تشعشعی جهت‌دار و یکطرفه به جای آنتن‌هایی با پترن تشعشعی همه جهته اشاره کرد. با این حال، برای سیستم‌هایی که آنتن گیرنده در مکان‌های مختلف قرار دارد، پترن تشعشعی همه‌جهته همچنان ضروری است (۴).

در سیستم‌هایی که از چند آنتن در فرستنده و گیرنده استفاده شده است برعکس سیستم‌هایی که در آن‌ها از یک آنتن استفاده می‌شود، در صورتیکه از الگوریتم‌ها و روش‌های پردازشی مناسبی استفاده گردد، از پدیده‌ی چند مسیره‌گی می‌توان در جهت بهبود عملکرد سیستم استفاده کرد، به عبارت دیگر در سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO) به شرطی که از روش و الگوریتم درستی استفاده گردد می‌توان گفت پدیده‌ی چند مسیرگی باعث بهبود عملکرد کلی سیستم می‌گردد.

مانند سایر سیستم‌های مخابراتی دیگر یکی از بخش‌های مهم در سیستم‌های MIMO نیز بخش طراحی آنتن آن می‌باشد، از این رو انتخاب بهترین آنتن برای استفاده از این سیستم‌ها بسیار مهم می‌باشد. آنتن‌های چاپی و مایکرواستریپ با توجه به ویژگی‌ها و امتیازاتی از قبیل پترن تشعشعی همه‌جهتی که دارند به منظور استفاده در سیستم‌های MIMO می‌تواند انتخاب مناسبی باشد، چراکه با استفاده از پترن تشعشعی همه‌جهتی آنتن‌های چاپی می‌توان ظرفیت کانال و نرخ داده شبکه را افزایش داد (واقون و اندرسون[3]، ۱۹۸۷). با ادغام دو تکنولوژی UWB و MIMO می‌توان سیستم‌هایی طراحی کرد که ظرفیت کانال و نرخ داده‌ی شبکه‌ی آن نسبت به فناری MIMO معمولی که در سیستم‌های با پهنای باند باریک، بیشتر می‌باشد، از طرف دیگر نیز مشکلات موجود در سیستم‌های ارتباطی UWB از قبیل محو شوندگی را می‌توان با ادغام دو فناوری UWB و MIMO بهبود داد.

در طراحی آنتن‌های MIMO چالش‌هایی وجود دارد که باعث تأثیر بر عملکرد سیستم‌های MIMO می‌گردد، یکی از چالش‌های مهم تزویج متقابل و ضریب همبستگی بین المان‌های تکی استفاده شده در طراحی آنتن MIMO می‌باشد. با توجه به تأثیر آنتن برعملکرد سیستم‌های MIMO در بالا بردن ظرفیت کانال و نرخ داده شبکه و چالش‌های موجود در مسیر طراحی این آنتن‌ها، باعث توجه پژوهشگران در خصوص تحقیق و طراحی آنتن‌های MIMO برای کاربردهای UWB گردید. بر اساس مطالب فوق، می‌توان گفت که هدف اصلی در این مطالعه طراحی،

[1] . propagation paths
[2] . multipath propagation
[3] . Vaughan & Andersen

شبیه‌سازی و ساخت آنتن MIMO2x2 با پهنای باندامپدانسی فوق‌العاده با بهترین تطابق امپدانسی می‌باشد.

ابزارها و مدل طراحی شده

آنتن MIMO با پهنای باند گسترده با استفاده از المان‌های پارازتیکی

در این طرح ارائه شده که در سال ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفته است، یک آنتن MIMO با چهار المان به منظور بهره‌گیری در سیستم‌های UWB پیشنهاد شده است، در این طرح پهنای باند آنتن دارای یک فرکانس قطع در فرکانس GHz ۵/۵ برای WLAN می‌باشد (۵). در بررسی آنتن تک المانه‌ی این طرح با استفاده از ساختار اصلاحی که بر روی صفحه‌ی زمین ایجاد شده است، پهنای باند امپدانسی وسیعی بدست می‌آید. در این طرح برای ایجاد یک باند قطع در فرکانس ۵/۵ گیگاهرتزی از شکافی U شکل بر روی پچ تشعشعی استفاده شده است. در طرح ارائه شده برای آنتن MIMO المان‌ها به صورت عمود نسبت به یکدیگر جانمایی شده‌اند و از یک ساختار به شکل فن با استفاده از ۴ نوار خطی به عنوان ساختار پارازتیکی استفاده شده است. اندازه کلی آنتن MIMO برابر mm^2 ۶۷×۶۷ می‌باشد که از بستر FR-4 با ضخامت mm ۱/۶ برای زیرلایه‌ی این طرحاحی استفاده شده است.

استفاده از ساختار فراکتالی برای طراحی آنتن MIMO چند بانده

در این مطالعه از ساختارهای فراکتالی Minkowski برای طراحی آنتن تشعشعی استفاده شده است. آنتن MIMO طراحی شده در این پژوهش دارای دو المان می‌باشد که ضمن دارا بودن ایزولاسیون مناسب در بین المان‌ها دارای بهره‌ی و پهنای باند گسترده‌ای نیز می‌باشد. این مطالعه که در سال ۲۰۲۱ ارائه شده است دارای خط تغذیه مایکرواستریپی می‌باشد و المان‌های آنتن MIMO به صورت متعامد نسبت به یکدیگر جانمایی شده‌اند (۶).

استفاده از المان‌های پارازتیکی برای بهبود عملکردی آنتن MIMO

در این تحقیق یک آنتن MIMO با پهنای باند امپدانسی گسترده ارائه شده است که به منظور کاهش تزویج متقابل و ایجاد ایزولاسیون مناسب از المان پارازتیکی در طراحی ساختار استفاده شده است (۷) این مطالعه که در سال ۲۰۲۲ صورت گرفته از المان پارازتیکی علاوه بر کاهش تزویج متقابل بین المان‌های آنتن، به منظور بهبود عملکردی آنتن و افزایش بهره‌ی آنتن استفاده شده است. آنتن MIMO پیشنهادی دارای ۴ المان آنتن پچ می‌باشند که با استفاده از روش CPW تغذیه شده است. در طراحی صورت گرفته در قسمت پشت آنتن از دو ساختار به صورت نواری شکل استفاده شده است و با استفاده از ساختارهای Via به پچ‌های تشعشعی متصل شده‌اند، از این ساختارهای نواری به عنوان فیلتر استفاده شده است.

طراحی آنتن MIMO با پهنای باندگسترده با پارامترهای باند فرکانسی باند باریک

این پژوهش یک آنتن MIMO با دو المان می‌باشد که شامل دو آنتن مونوپل به صورت مربعی شکل می‌باشد که از یک ساختار T شکل در ساختار صفحه‌ی زمین استفاده شده است (۸). در این طرح به منظور ایجاد ایزولاسیون بهتر بین المان‌ها از ایجاد شکاف بر روی صفحه‌ی زمین استفاده می‌گردد. در طرح ارائه شده به منظور ایجاد باندهای شکاف در پهنای باند از دو خط نواری متصل به صفحه‌ی زمین استفاده شده است. پهنای باند کلی در این طرح از فرکانس ۳/۱ گیگاهرتز شروع شده و بیشتر از ۱۱ گیگاهرتز می‌باشد. در این طرح برای مقابله با ایجاد تداخل در باند فرکانسی WLAN یک شکاف باند فرکانسی در باند ۵/۸۵ – ۵/۱۵ گیگاهرتز به وجود آمده است. در شکل زیر، نمای کلی و پهنای باند آنتن ارائه شده در این طرح نشان داده شده است، ابعاد آنتن ارائه شده برابر ۳۶×۲۲ میلی‌متر مربع می‌باشد که دارای ساختار فشرده‌ای با ابعاد مناسب و کوچک می‌باشد. در آنتن ارائه شده به منظور تطبیق امپدانسی مناسب بین پورت ورودیه آنتن و المان‌های تشعشعی آنتن، شبکه‌ی تغذیه به صورت پله‌ای و مورب ایجاد شده است.

در این پژوهش ایزولاسیون مناسبی بین المان‌های آنتن وجود دارد بطوریکه پارامتر ECC آنتن ارائه شده دارای مقدار مناسبی بوده و کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و تزویج متقابل بین المان‌ها کمتر از dB ۱۵ می‌باشد.

آنتن MIMO با پهنای باند بسیار گسترده و ایزولاسیون خیلی بالا

این آنتن MIMO که از ۲ المان تشعشعی تشکیل شده است که دارای پهنای باند بسیار گسترده با ایزولاسیون بسیار مناسب است (۹). همانطور که در شکل زیر مشخص می‌باشد، بخش تشعشعی آنتن شامل یک پچ دایره‌ای شکل می‌باشد که با استفاده از یک خط تغذیه‌ی مایکرواسریپ به شکل مخروطی و یک ساختار زمین اصلاح شده و دارای شیار تغذیه می‌گردد. برای بالا بردن ایزولاسیون بین المان‌ها در این آنتن از یک ساختار T شکل در وسط بین المان‌ها و دو خط نواری کوچک در مرکز صفحه‌ی زمین استفاده شده است. ابعاد کلی آنتن برابر ۳۰×۲۶ میلی‌متر مربع می‌باشد که دارای ابعاد کوچک و مناسبی برای استفاده در سیستم های ارتباطی قابل حمل می‌باشد. زیرلایه‌ی استفاده شده در این طرح از نوع Rogers/Duroid 5880 با ضخامت ۱/۵۷ میلی‌متر می‌باشد.

آنتن MIMO فراپهن باند با خط تغذیه ۵۰ اهمی و زمین اصلاح شده

در این مقاله تحقیقاتی شامل یک آنتن MIMO ۲ المانه در دو مدل مختلف با پهنای باند گسترده می‌باشد که با استفاده از یک پچ به شکل نیم‌دایره با استفاده از خط تغذیه مایکرواستریپ ۵۰ اهمی که به صورت پله‌ای می‌باشد در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است (۱۰). طرح ارائه شده دارای پهنای باند گسترده (۱۰/۶ GHz – ۳/۱) و همچنین باند بریده در WLAN (۵/۸۵ GHz – ۵/۱۵) می‌باشد. با توجه به روند طراحی آنتن ایزولاسیون مناسبی بین المان‌های آنتن ایجاد شده است. پهنای باند گسترده در این طرح با استفاده از خط تغذیه‌ای پله‌ای شکل و همچنین ایجاد شیار بر روی صفحه‌ی زمین و ایجاد شکاف مستطیلی شکل در زیر خطوط تغذیه هر یک از پچ‌ها ایجاد شده است.

آنتن MIMO حلقه‌ای بیضوی شکل برای استفاده در ارتباطات تلفنی 5G

در این مطالعه یک طرح جدید از یک آنتن حلقه‌ای بیضوی شکل برای استفاده در آنتن‌های MIMO پیشنهاد شده است که در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز برای استفاده در سیستم-های ارتباطی 5G پیشنهاد شده است (۱۱). همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در این مقاله دو طرح برای آنتن MIMO پیشنهاد شده است. در اولین طراحی دو المان تشعشعی نسبت به هم به صورت متعامد جانمایی شده است و در طرح دوم ارائه شده ۴ المان که نسبت به هم بهصورت متعامد و در روبروی هم جانمایی شده‌اند. زیرلایه‌ی استفاده شده در این طراحی از نوع Rogers 4003C با ضخامت ۰/۲۰۳ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد آنتن چهار المانه برابر ۳۰×۳۰ و برای حالت دو المانه برابر ۱۵×۳۰ میلی‌متر مربع می‌باشد.

فرکانس عملیاتی برای این طراحی برابر ۶۰ گیگاهرتز می‌باشد که برای استفاده در ارتباطات باند فوق عریض 5G پیشنهاد شده است. در حالت چهار المانه برای ایجاد ایزولاسیون بیشتر بین المان‌های آنتن علاوه بر جانمایی متعامد المان‌های تشعشعی از ساختارهای پارازتیکی نیز در طراحی آنتن استفاده شده است. مقدار توان بازگشتی در طرح‌های ارائه شده برابر dB ۲۶- و ۲۸- می‌باشد. بهره به دست آمده در این طرح بین dB ۱۰/۹ تا ۹/۶ می‌باشد. پترن تشعشعی آنتن نیز همه جهته می‌باشد. با توجه به نمودارهای ECC و DG ارائه شده برای این طراحی نیز توانسته مقادیر مناسب و مورد نیاز برای سیستم‌های MIMO را بدست آورد.

طراحی آنتن MIMO برای استفاده در کاربردهای سیستم‌های با پهنای باند گسترده

در آنتن MIMO ارائه شده در این پژوهش با توجه به پهنای باند بدست آمده برای استفاده در کاربردهای

سیستم‌هایی با پهنای باند گسترده پیشنهاد شده است. نندر این طرح از شکاف‌های باز L شکل در بخش تشعشعی آنتن و همچنین یک شکاف باریک نواری شکل در صفحه‌ی زمین استفاده شده است. زیرلایه‌ی مورد استفاده در این طرح از نوع ارزان قیمت FR-4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد. در طرح ارائه شده برای ایجاد ایزولاسیون بیشتر بین المان‌های آنتن، آنها را به صورت متعامد نسبت به یکدیگر قرار داده شده است. علاوه بر متعامد قرار دادن المان‌ها از یک شکاف نواری شکل در صفحه‌ی زمین به صورت مورب نیز برای افزایش ایزولاسیون بین المان‌ها استفاده شده است (۱۲).

طراحی آنتن MIMO فشرده برای کاربردهای سیستم‌های UWB قابل حمل

در این مقاله یک آنتن MIMO به صورت فشرده با ابعاد کم ۲۶×۴۰ میلی‌متر مربع به منظور استفاده در سیستم‌های ارتباطی قابل حمل با پهنای باند گسترده طراحی شده است (۱۳). در این طراحی برای کاهش تزویج متقابل بین المان‌های آنتن از روش جانمایی متعامد المان‌ها استفاده شده است.

در این مقاله از دو آنتن تک قطبی مایکرواستریپ با پچ مربعی شکل استفاده شده است که با استفاده روش تغذیه‌ای میکرو نواری در طرف دیگر زیرلایه استفاده شده است. زیرلایه‌ی استفاده شده در این شبیه‌سازی از نوع Rogers RO4350 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر با ضریب گذردهی ۳/۵ می‌باشد. در طرح ارائه شده به منظور افزایش ایزولاسیون بین المان‌های آنتن از دو خط نواری شکل یکی به صورت شاخه‌های L و I شکل متصل به صفحه‌ی زمین استفاده شده است همچنین با استفاده از یک نوار فلزی کوچک دو صفحه‌ی زمین به یکدیگر متصل شده است.

آنتن MIMO فشرده برای فناوری‌های WiMAX، 5G، WLAN با پلاریزاسیون دوگانه و المان‌های مختلف

در این آنتن MIMO از دو المان تشعشعی با شکل‌های مختلف و روش‌های تغذیه‌ای مختلف استفاده شده است. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، استفاده از دو المان تشعشعی مختلف موجب ایجاد پلاریزاسیون دوگانه در این طرح شده است (۱۴). المان اول این آنتن شامل یک پچ تشعشعی T شکل می‌باشد که با استفاده از خط تغذیه‌ای مایکرواستریپ تغذیه می‌گردد و المان دوم نیز شامل یک پچ مربعی شکل می‌باشد که که به وسیله القاء مغناطیسی تغذیه شده است. از این پیکربندی آنتن یعنی قرار دادن المان‌های تشعشعی در دو طرف مختلف زیرلایه برای ایجاد ایزولاسیون بهتر بین المان‌ها استفاده شده است.

طراحی آنتن MIMO 2×2

در این مرحله‌ی طراحی MIMO ۲×۲، همانطور که در شکل ۱۰ هندسه پیکربندی آنتن نشان داده شده است چهار آنتن تک المانه طراحی شده در بالا به صورت متعامد و بدون هیچ‌گونه ساختار اضافی و جداساز از یکدیگر قرار می‌گیرند، در طرح پیشنهادی هر یک از عناصر آنتن به صورت متعامد نسبت به عنصر آنتن مجاور قرا گرفته است. بطوریکه آنتن در پورت دوم نسبت به آنتن در پورت‌های اول و سوم دارای در حالت متعامد قرار گرفته و نسبت به آنتن در پورت چهارم در خلاف جهت قرار گرفته است. این قرارگیری متعامد عناصر آنتن باعث به وجود آمدن تنوع قطبی و در نتیجه افزایش ایزولاسیون بین عناصر آنتن می‌گردد. با توجه به اینکه عناصر آنتن دارای شکل یکسانی هستند، ضریب انعکاس یکسانی نسبت به یکدیگر از خود نشان می‌دهند.

برای حفظ ابعاد کم طرح پیشنهادی المان‌های آنتن MIMO تا حد امکان در فاصله‌ی کمی از یکدیگر جانمایی شده‌اند بطوریکه ابعاد کلی آنتن برابر mm^2 ۸۴×۸۴ می‌باشد. عملکرد آنتن در این مرحله بدون هیچ ساختار اضافی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی آنتن پیشنهادی در نرم‌افزارهای HFSS و CST در شکل ۱۱ نشان داده شده است، و پهنای باند امپدانسی dB ۱۰- کلی آنتن از ۲/۱۳ گیگاهرتز تا ۲۴/۴۸ گیگاهرتز (GHz ۲۲/۳۵

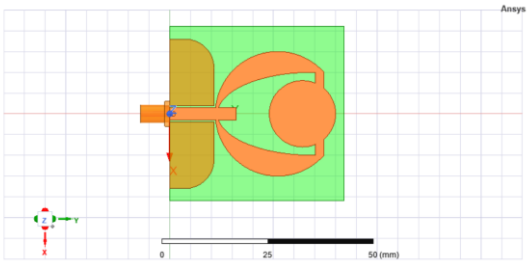
) می‌باشد که نتایج شبیه‌سازی شده با دو نرم‌افزار تطابق خوبی با یکدیگر دارند. نتایج شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که توان بازگشتی پورت‌های آنتن Super-UWB-MIMO بدون استفاده از ساختار جداکننده دارای باندهای مختلف فرکانسی (2.13 – 2.79GHz), (3.75 – 5.89GHz), (6.49 – 8.27GHz), (8.52 – 24.48GHz) برای $|S11| \leq 10dB$ می‌باشد.

به صورت کلی در این پژوهش، روند کلی شبیه سازی آنتن و همچنین نتایج اندازه‌گیری شده از تست آنتن به طور کامل توضیح داده شد بطوریکه روند تکاملی آنتن مرحله به مرحله به همراه نتایج شبیه‌سازی در هر مرحله ارائه شده است. در نهایت به منظور ایزولاسیون بهتر و کاهش تزویج متقابل در بین المان‌های آنتن از یک نوار مستطیلی شکل به صورت المان پارازیتیکی در حد فاصل بین المان‌های آنتن استفاده شده است. بعد از ارائه طرح نهایی و بررسی و تحلیل اولیه‌ی نتایج شبیه‌سازی کامل آنتن، سایر پارامترها و نتایج مربوط به ساختارهای آنتن‌های چند ورودی / چند خروجی نیز بر روی ساختار نهایی ارائه شده، بررسی گردید که با توجه به نتایج شبیه‌سازی بدست آمد، نتایج کسب شده برای ساختار نهائی، ضمن تأیید ساختار عملکرد صحیح آنتن چند ورودی/چند خروجی، نشان‌دهنده‌ی گزینه مناسب بودن این طرح برای استفاده در انواع سیستم‌های مخابراتی، ارتباطی و بیسیمی قابل حمل می‌باشد.

یافته های پژوهش

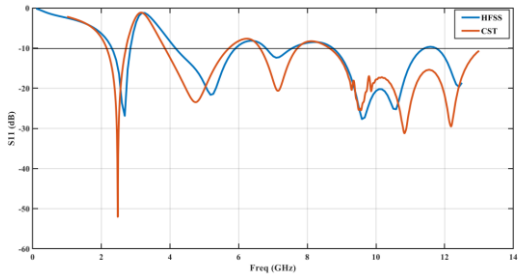
در این مقاله آنتن MIMO ۲×۱ با پهنای باند بسیار گسترده (Super-UWB MIMO antenna) با پهنای باند بسیار گسترده ،پیشنهاد شده است. آنتن‌های طراحی شده دارای چند باند کاری می‌باشند که با توجه به باندهای فرکانسی ایجاد شده، آنتن‌های پیشنهادی قابلیت استفاده در وسایل قابل حمل برای انواع ارتباطات بی‌سیم از قبیل IEEE 802.11 a/b/g/n و LTE و WiFi و Bluetooth و LTE و باند X و Ku .... را دارا می‌باشد. این آنتن از دو آنتن مونوپل دایره‌ای شکل که شکاف‌ها و برش‌هایی بر روی آن ایجاد شده ، تشکیل شده است. هر کدام از این آنتن‌ها به روش تغذیه هم محور (CPW) ۵۰ اهمی تغذیه می‌شوند. برای افزایش ایزولاسیون (تزویج متقابل) مناسب بین المان‌ها ضمن اینکه تغذیه آنتن به صورت عمود نسبت به یکدیگر جانمایی شده‌اند، از یک نوار مستطیلی شکل به عنوان المان پارازتیکی استفاده شده است. طرح پیشنهادی دارای مشخصات مناسبی از قبیل تزویج متقابل کم، ECC پایین، توان بالا ، برای استفاده در سیستم‌های MIMO قابل حمل گزینه مناسبی می‌باشد. در ادامه به بررسی و توضیح در خصوص روند کلی طراحی و دست‌یابی به آنتن نهایی می‌پردازیم.

در مرحله اول با توجه به موضوع پژوهش ابتدا یک آنتن مایکرواستریپ پهن باند به صورت چند بانده طراحی می‌گردد. آنتن طراحی شده در ابعاد ۴۲*۴۲ میلی مترمربع بر روی زیرلایه FR ۴با ضخامت ۱/۶ میلی متر می باشد.



تصویر ۱. آنتن مایکرواستریپ پهن باند به صورت چند بانده

که در زیر نتایج شبیه سازی ساختار طراحی شده ارائه شده است لازم به ذکر در جهت اطمینان از نتایج شبیه سازی شده از دو نرم افزار HFSSو CSTاستفاده شده است.



تصویر ۲. شبیه سازی ساختار طراحی شده

با توجه به نمودار توان بازگشـتی آنتن باندهای کاری آنتن شامل موارد زیر می باشد:

۱- ۲ /۳ – ۲ /۸GHz

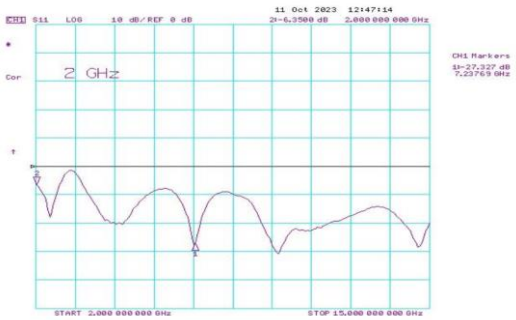
۲- ۴/۱- ۵ /۹ GHz

۳-۶/۸- ۷/۵ GHz

۴-۸/۷- ۱۲/۵ GHz

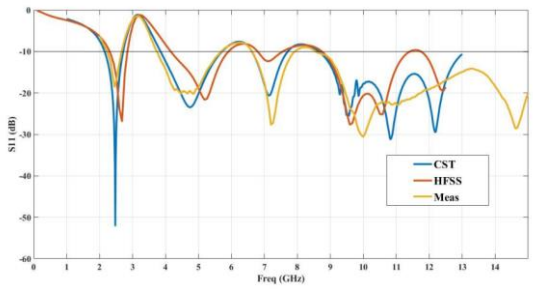
بعد از شـبیه سـازی آنتن و اطمینان از عملکرد آنتن برای سـاخت و تسـت آزمایشـگاهی آنتن در مرکز تحقیقاتی مخابرات ایران اقدام می‌کنیم:

تصویر ۳. تست آزمایشگاهی



تصویر ۴. تست آزمایشگاهی

که نمودار های مربوط به تست آنتن و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در نمودار زیر نشان داده شده است:



تصویر ۵. نمودار مربوط به تست آنتن

همانطور که که نمودارهای مشخص می‌باشد نتایج اندازه گیری شده تأیید کننده نتایج شبیه سازی آنتن می‌باشد. با توجه به نمودار توان بازگشتی آنتن باندهای کاری آنتن شامل موارد زیر می‌باشد.

۱- ۲ /۳ – ۲ /۸GHz

۲- ۴/۱- ۵ /۹ GHz

۳-۶/۸- ۷/۵ GHz

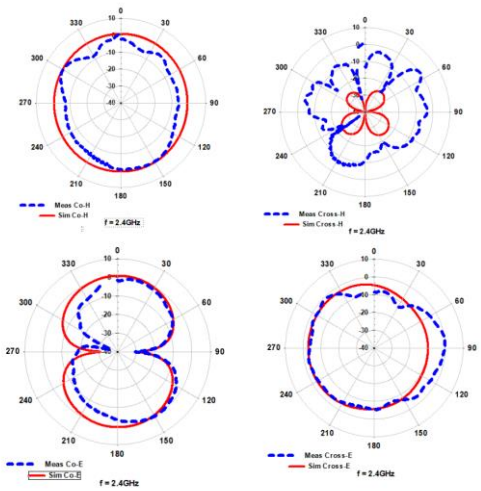
۴-۸/۷- ۱۲/۵ GHz

که با توجه به نمودار توان برگشتی آنتن، آنتن طراحی شده برای کاربردهایی نظیر بلوتوث، شبکه ارتباطی، WLAN 2.4، WIMAX 2.5 GHz, 5.8 GHz و شبکه ISM و IEEE a/b/i و باند X و همچنین باندهای LTE7, LTE40, LTE41 می توان استفاده کرد.

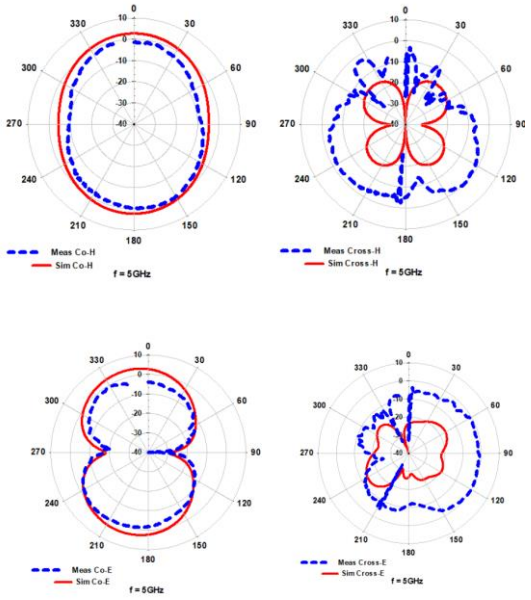
- LTE4 ،LTE3 (1710-1880 MHz) ،LTE2 (1850-1990 MHz) ،LTE1 (1920-2170 MHz)
  LTE7 (2500-2690 ،LTE6 (830-885 MHz) ،LTE5 (824-894 MHz) ،(1710-2115 MHz)
  LTE10 (1710-2170 ،LTE9 (1749.9-1879.9 MHz) ،LTE8 (880-960 MHz) ،MHz)
  ،LTE14 (758-798 MHz) ،LTE13 (746-787 MHz) ،LTE12 (698-746 MHz) ،MHz)
  LTE20 ،LTE19 (830-890 MHz) ،LTE18 (815-875 MHz) ،LTE17 (704-746 MHz)
  LTE25 ،LTE23 (2000-2200 MHz) ،LTE22 (3410-3590 MHz) ،(791-862 MHz)
  LTE28 (703- ،LTE27 (807-869 MHz) ،LTE26 (814-894 MHz) ،(1850-1995 MHz)
  LTE34 (2010-2025 ،LTE33 (1900-1920 MHz) ،LTE29 (717-728 MHz) ،803 MHz)
  LTE37 (1910-1930 ،LTE36 (1930-1990 MHz) ،LTE35 (1850-1910 MHz) ،MHz)
  LTE40 (2300-2400 ،LTE39 (1880-1920 MHz) ،LTE38 (2570-2620 MHz) ،MHz)
  LTE43 (3600-3800 ،LTE42 (3400-3600 MHz) ،LTE41 (2496-2690 MHz) ،MHz)
  LTE44 (703-803 MHz) و MHz)
- GSM900 (880-960 MHz) و GSM850 (824-894 MHz)
- DCS (1710-1880 MHz)
- PCS (1850-1990 MHz)
- UMTS (1920-2170 MHz)
- WLAN5.8 GHz (5725-5875 MHz) و WLAN2.4GHz (2400-2484 MHz)
- WiMAX 3.5 GHz (3400-3650 MHz) و WiMAX2.5 GHz (2500-2690 MHz)

تصویر ۶. نمودار توان بازگشتی

پترن تشعشعی اندازه گیری شده و شبیهسازی شده آنتن تک المانه در دو صفحه Hو Eدر دو فرکانس ۲/۵ و ۵ گیگاهرتز مطابق شکل می‌باشد که با توجه تصاویر نتایج اندازه گیری شده تأیید کننده مقادیر شبیه سازی شده می‌باشد.

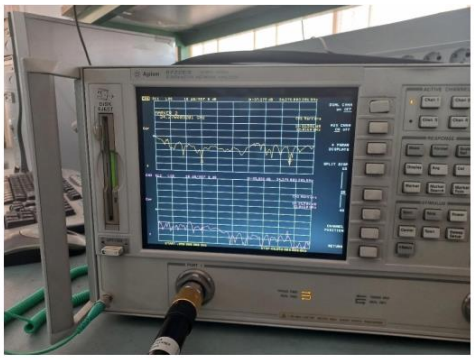


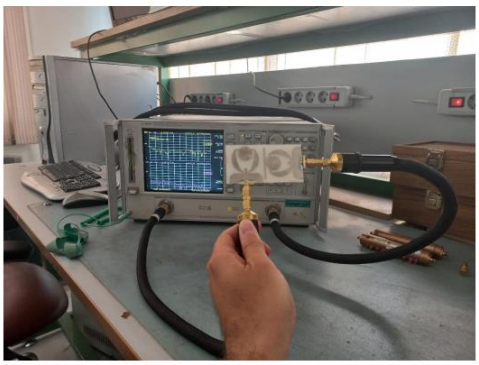
تصویر ۷. فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز

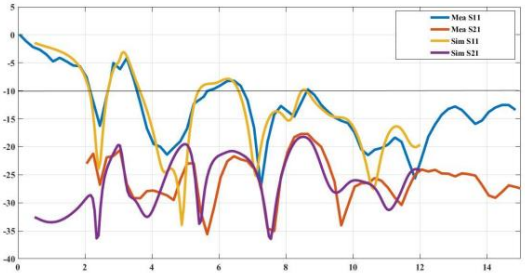


تصویر ۸. فرکانس ۵ گیگاهرتز

بعد از اطمینان از عملکرد آنتن تک المانه اقدام به طراحی حالت چند ورودی-چند خروجی آنتن می‌کنیم که در زیر نتایج اندازه گیری شده برای این حالت نشان داده شده است.

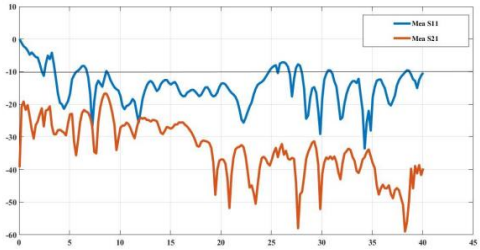






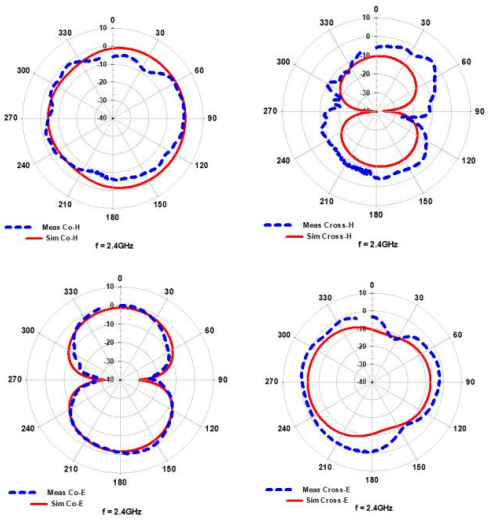
تصویر ۹. طراحی حالت چند ورودی-چند خروجی آنتن

همانطور که در تصویر بالا مشخص می‌باشد، نتایج طراحی و شبیه‌سازی مطابق یکدیگر می‌باشد در زیر نمودار اندازه‌گیری آنتن تا ۴۰گیگ نیز نشان داده شده است که نشان دهنده کارکرد آنتن تا ۲۵گیگاهرتز می‌باشد:

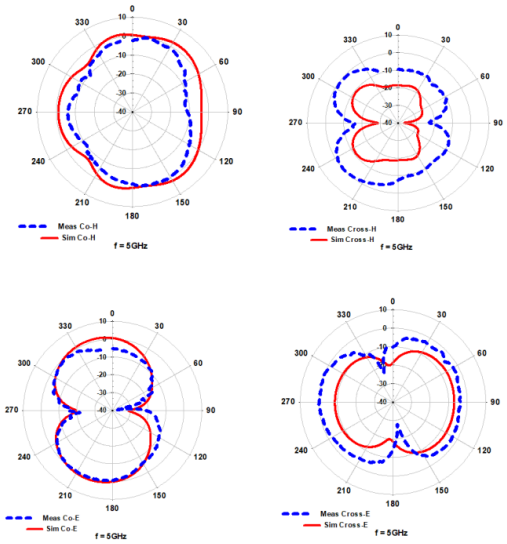


تصویر ۱۰. آنتن

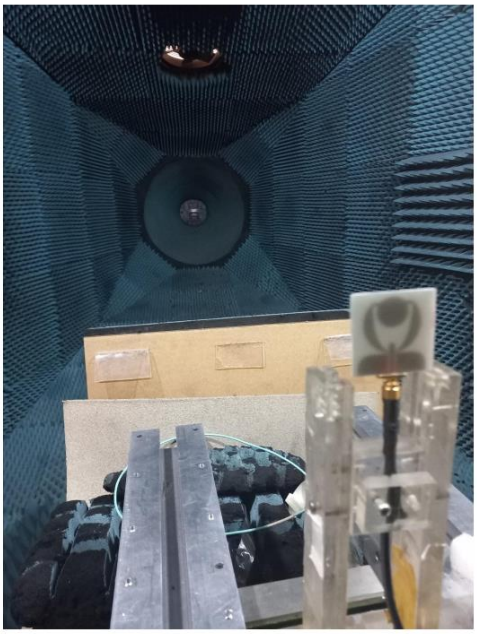
نمودار پترن تشعشعی آنتن در حالت MIMOنیز در شکل زیر نشان داده شده است:



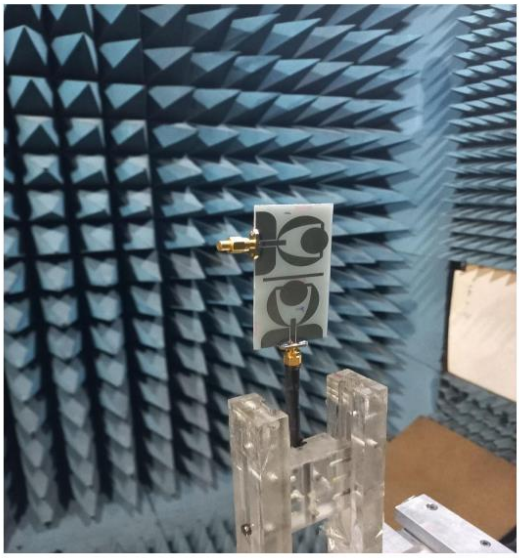
تصویر ۱۱. فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز



تصویر ۱۲. فرکانس ۵ گیگاهرتز



تصویر ۱۳. نمونه آنتن



تصویر ۱۴. نمونه آنتن

بحث و نتیجه گیری

در این پایان‌نامه دو ساختار ۲ المانه و ۴ المانه جدید از آنتن MIMO را به منظور استفاده در سیستم‌های ارتباطی و مخابراتی با پهنای باند بسیار گسترده ارائه شده است که توانسته است پارامترها و نیازهای مورد نیاز برای سیستم‌های MIMO را به خوبی تأمین نماید.

با این حال می‌توان مطالعات جدیدی بر روی ارائه‌ی طرح‌های نوین صورت داد و روش‌های جدید دیگری برای افزایش ایزولاسیون و پهنای باند و بهره‌ی آنتن‌های MIMO ارائه داد. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای طراحی ساختارهای بهینه‌تر با ابعاد کوچکتر و بهره‌های بالا استفاده کرد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- استفاده از زیرلایه‌هایی با ثابت دی الکتریک و تلفات پائین برای بستر آنتن‌ها

۲- استفاده از ساختارهای زمین ناقص و همچنین ایجاد شکاف‌هایی از اشکال مختلف بر روی سطوح زمین و پچ آنتن به منظور افزایش تعداد باندهای فرکانسی مختلف.

۳- مطالعه بر روی روش‌هایی که باعث افزایش تعداد المان‌ها و پورت‌های آنتن MIMO می‌گردد.

۴- استفاده از ساختارهایی که ضمن حفظ عملکرد آنتن MIMO توانایی انتشار متنوع از پلاریزاسیون را داشته باشد.

۵- بررسی استفاده از قطعات الکترونیکی فرکانس بالا مانند انواع دیودها ، دیودهای ورکتور و خازن‌ها برای ایجاد ساختارهای جدید.
۶- استفاده از طرح‌های نوین از ساختارهای فراماده به منظور افزایش ایزولاسیون در بین المان‌های آنتن MIMO.
۷- استفاده از ساختارهای فرکتالی شکل در طراحی بخش تشعشعی آنتن به منظور کاهش ابعاد آنتن‌های MIMO .

در این پژوهش، یک آنتن مایکرواستریپ MIMO2x2 با ساختاری ساده، ابعاد کوچک، و پهنای باند امپدانسی بسیار گسترده، طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شد. آنتن طراحی‌شده با دارا بودن بازه فرکانسی از ۲,۱۷ تا ۲۴,۸۵ گیگاهرتز موفق به پوشش طیف وسیعی از کاربردهای ارتباطی بی‌سیم، شامل استانداردهای WiFi، LTE، IEEE 802.11 a/b/g/n، Bluetooth و همچنین باندهای فرکانسی X و Ku شده است. استفاده از دو المان دایره‌ای‌شکل با تغذیه هم‌محور ۵۰ اهمی و بهره‌گیری از یک المان پارازتیکی مستطیلی، منجر به افزایش چشمگیر ایزولاسیون بین دو آنتن و کاهش تداخل متقابل گردیده است، به‌گونه‌ای که مقدار ایزولاسیون به حدود 21.6 dB و ضریب همبستگی به کمتر از ۰,۰۰۵ رسیده است که از منظر طراحی آنتن MIMO، ارقام بسیار مطلوبی محسوب می‌شوند.

دستاورد اصلی این تحقیق را می‌توان دستیابی به تطابق امپدانسی بالا و پهنای باند بسیار وسیع در کنار ابعاد فیزیکی مناسب دانست. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند آنتن پیشنهادی نه‌تنها از نظر تئوری، بلکه در نمونه ساخته‌شده نیز عملکرد پایداری از خود نشان دهد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نتایج تجربی تطابق مناسبی داشته‌اند که اعتبار روش طراحی پیشنهادی را تقویت می‌کند.

در مقایسه با دیگر آنتن‌های UWB یا MIMO که در پژوهش‌های پیشین ارائه شده‌اند، آنتن طراحی‌شده در این مطالعه از نظر بهره (با مقدار ماکزیمم 6.9 dB)، ایزولاسیون، پهنای باند، و همچنین میزان همبستگی بین آنتن‌ها در سطح بسیار رقابتی و برتری قرار دارد. این در حالی است که بسیاری از طرح‌های پیشین یا در دستیابی به باند وسیع دچار چالش بوده‌اند، یا در ابعاد کوچک‌تر دچار افت بهره و کیفیت تطابق امپدانسی شده‌اند.

از آن‌جایی که یکی از چالش‌های کلیدی در طراحی آنتن‌های MIMO، کاهش تداخل و بهبود عملکرد در شرایط چندمسیره و غیرخط دید (NLOS) است، طرح حاضر با ساختار مناسب و تغذیه متعامد خود، پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری در سیستم‌های ارتباطی نسل جدید دارد. از دیگر مزایای این آنتن، پترن تشعشعی همه‌جهته و تطابق مناسب با شرایط محیطی پیچیده است که آن را گزینه‌ای مناسب برای استفاده در تجهیزات پرتابل و سیستم‌های مخابراتی متراکم شهری می‌سازد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی عملکرد آنتن طراحی‌شده در شرایط محیطی واقعی‌تر، از جمله درون ساختمان‌ها یا در حضور موانع و اجسام فلزی، مورد بررسی قرار گیرد تا میزان کارایی آن در سناریوهای عملی دقیق‌تر ارزیابی شود. همچنین، توسعه ساختار آنتن با افزایش تعداد المان‌ها و حرکت به‌سوی پیکربندی‌های پیشرفته‌تری مانند MIMO 4×4 یا بالاتر می‌تواند منجر به بهبود قابلیت‌های ارتباطی شود. افزودن ویژگی‌هایی مانند بازآرایی‌پذیری[1] یا تطبیق‌پذیری فرکانسی نیز می‌تواند انعطاف‌پذیری سیستم را در مواجهه با نیازهای متغیر شبکه‌های آینده افزایش دهد. علاوه بر این، تحلیل پارامترهایی نظیر ضریب همبستگی پوششی[2] و بهره تنوع (Diversity Gain - DG) در بسترهای پیچیده‌تر می‌تواند بینشی دقیق‌تر نسبت به عملکرد واقعی آنتن فراهم آورد. به‌طور کلی، طراحی ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در راستای توسعه آنتن‌های MIMO فوق پهن‌باند برای کاربردهای گوناگون در نسل‌های آینده ارتباطات بی‌سیم مورد توجه قرار گیرد.

[1] . Reconfigurability

[2] . Envelope Correlation Coefficient - ECC

تقدیر و تشکر

از کلیه کسانی که در این پژوهش با ما همکاری داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

منابع

.۱ Chiani M, Giorgetti A. Coexistence between UWB and narrow-band wireless communication systems. Proceedings of the IEEE. 2009;97(2):231-54.

.۲ Ray KP. Design aspects of printed monopole antennas for ultra-wide band applications. International journal of antennas and propagation. 2008;2008.

.۳ Nekoogar F. Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications Fundamentals and Applications: Prentice Hall Press; 2011.

.٤ De Flaviis F, Jofre L, Romeu J, Grau A. Multiantenna systems for MIMO communications: Springer Nature; 2022.

.٥ Hassan MM, Rasool M, Asghar MU, Zahid Z, Khan AA, Rashid I, et al. A novel UWB MIMO antenna array with band notch characteristics using parasitic decoupler. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2020;34(9):1225.۳۸-

.٦ Cai Y, Cheng G, Ren X, Wu J, Ren H, Song K, et al. Highly Isolated Two-Elements Ultra-Wideband MIMO Fractal Antenna with Multi Band-Notched Characteristics. Progress in Electromagnetics Research C. 2021;116.

.۷ Abbas A, Hussain N, Sufian MA, Jung J, Park SM, Kim N. Isolation and gain improvement of a rectangular notch UWB-MIMO antenna. Sensors. 2022;22(4):1460.

.۸ Liu L, Cheung S, Yuk T. Compact MIMO antenna for portable UWB applications with band-notched characteristic. IEEE transactions on antennas and propagation. 2015;63(5):1917-24.

.۹ Naeem U, Iqbal A, Shafique MF, Bila S. Efficient design methodology for a complex DRA-SIW filter-antenna subsystem. International Journal of Antennas and Propagation. 2017;2017(1):6401810.

.۱۰ Yang H, Xi X, Zhao Y, Tan Y, Yuan Y, Wang L. Compact slot antenna with enhanced band-edge selectivity and switchable band-notched functions for UWB applications. IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2019;13(7):982-90.

.۱۱ Li H, Liu J, Wang Z, Yin Y-Z. Compact 1× 2 and 2 ۲ ×MIMO antennas with enhanced isolation for ultrawideband application. Progress In Electromagnetics Research C. 2017;71:41-9.

.۱۲ Ren J, Hu W, Yin Y, Fan R. Compact printed MIMO antenna for UWB applications. IEEE antennas and wireless propagation letters. 2014;13:1517-20.

.۱۳ Liu L, Cheung S, Yuk T. Compact MIMO antenna for portable devices in UWB applications. IEEE transactions on antennas and propagation. 2013;61(8):4257-64.

.۱٤ Tripathi S, Mohan A, Yadav S. A compact Koch fractal UWB MIMO antenna with WLAN band-rejection. IEEE Antennas and wireless propagation letters. 2015;14:1565-8.

Design, Simulation, and Fabrication of a 2×2 MIMO Antenna with Ultra-Wide Impedance Bandwidth and Optimal Impedance Matching

Mohammad hossein montazerifar [1], jasem jamali [2], zahra adel pour [3]

[a] *Department of Electrical Engineering, Ma.c.Islamic Azad University, Mashhad, Iran*
EMAil:MONTAZERIFAR@AUT.AC.IR
[b] *Department of Electrical Engineering, Ka.c. Islamic Azad University, Kazerun, Iran.*
EMAIL:JASEM.JAMALI@IAU.AC.IR
[c]*Department of Electrical Engineering, Sh.c. Islamic Azad University, Shiraz, Iran.*
EMAIL:ADELPOUR@AUT.AC.IR

*****Corresponding Author: **Jasem.jamali@iau.ac.ir**

ABSTRACT

The objective of this study is to design, simulate, and fabricate a 2×2 MIMO antenna with an ultra-wide impedance bandwidth and optimal impedance matching. In this research, a Super-UWB 2×2 MIMO antenna with dimensions of 84×42 mm² and an impedance bandwidth ranging from 2.17 GHz to 24.85 GHz is proposed. Given the wide frequency bands achieved, the designed antenna is suitable for use in portable devices for various wireless communication systems such as IEEE 802.11 a/b/g/n, LTE, WiFi, Bluetooth, as well as the X-band, Ku-band, and more. The antenna consists of two circular monopole elements, each incorporating slots and cuts to enhance performance. Both antenna elements are fed via a 50-ohm coplanar waveguide (CPW). To achieve high isolation (low mutual coupling) between the two elements, the feed lines are arranged orthogonally, and a rectangular parasitic strip is introduced between them. After simulation, a prototype of the proposed design was fabricated, and its parameters were measured. The measurement results show that the proposed MIMO antenna exhibits an impedance bandwidth of 2.17–24.85 GHz, an isolation of 21.6 dB, a maximum gain of 6.9 dB, and an envelope correlation coefficient (ECC) below 0.005.

Keywords:

Simulation, 2×2 MIMO Antenna, CPW Feeding Method