

علمی-پژوهشی

کاهش تزویج متقابل و قطبش متعامد در یک آنتن آرایه‌ای میکرواستریپی فشرده
با استفاده از یک جفت تشدیدگر پارازیتی

رضا ذاکر

استادیار، گروه مهندسی برق مخابرات، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

یک روش مؤثر و چند منظوره جهت کاهش هم‌زمان تزویج متقابل و قطبش متعامد در یک آنتن آرایه‌ای صفحه H دو عنصری با یک ساختار فشرده ارائه می‌گردد. در این روش، یک جفت عنصر میکرواستریپی پارازیتی در کنار لبه‌های تشعشعی در دو پچ تشعشعی قرار گرفته و با ایجاد یک مسیر تزویج میدانی جدید و مخالف با تزویج اصلی منجر به افزایش چشمگیر ایزولاسیون می‌شود. علاوه بر این، به دلیل شکل و موقعیت قرارگیری این نوارهای پارازیتی، میدان نزدیک حاصل از جریان‌های متعامد روی پچ‌ها به‌طور قابل توجه خنثی شده و منجر به حذف قطبش متعامد و بنابراین افزایش خلوص قطبش می‌شود. همچنین، این روش می‌تواند تا حد ۸ دسی‌بل از افزایش قطبش متعامد ناشی از خطای موقعیت پروب روی پچ‌ها جلوگیری کند. برای اعتبارسنجی روش ارائه شده، یک نمونه بهینه، ساخته و اندازه‌گیری شده و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد. اندازه‌گیری‌ها ایزولاسیونی بهتر از ۳۲ دسی‌بل، تطبیق امپدانس بالاتر از ۳۰ دسی‌بل و قطبش متعامدی در حدود ۳۸ دسی‌بل (با حداقل ۱۰ دسی‌بل کاهش) را نشان می‌دهد که تطابق مناسبی با شبیه‌سازی دارند. ویژگی‌های این طرح، عدم کاهش بهره و بازده تشعشعی و کاهش فرکانس تشدید در حد ۱۵۰ مگاهرتز می‌باشد که می‌تواند اندازه کلی آرایه را کاهش دهد. در نهایت، مقایسه با کارهای جدید به همراه بحث روی نتایج نیز ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: آنتن آرایه‌ای، تزویج متقابل، ایزولاسیون، قطبش متعامد

۱. مقدمه

را افزایش می‌دهد. البته در این پدیده، اضافه شدن مدارات خازنی - سلفی معادل می‌تواند پهنای باند فرکانسی آنتن‌ها را نیز افزایش دهد. تزویج متقابل به دلیل وجود صفحه زمین و زیرلایه (یا دی‌الکتریک) مشترک بین پچ‌های آرایه میکرواستریپی، و انتقال متقابل امواج سطحی، ناشی و فضایی راه نزدیک بین آنها، ایجاد می‌گردد. این پدیده‌ها منجر به تضعیف پارامترهای امپدانس و تشعشعی از جمله تطبیق امپدانس هر آنتن و امپدانس متقابل بین آنتن‌ها، راندمان، سطح گلبه تشعشعی کناری^۲، نسبت دامنه گلبه اصلی به پشتی^۳ و غیره می‌شوند. در یک نگرش حرفه‌ای‌تر، تزویج باعث پیچیدگی ماتریس همبستگی و تخمین کانال در سامانه MIMO و کاهش ظرفیت آن، ایجاد نقطه کور در عملکرد آرایه فازی، تضعیف همگرایی الگوریتم‌های مسیریابی و نسبت سیگنال به نویز می‌شود [۵-۳]. از این رو و با توجه به محدودیت‌های مذکور، آرایه راهکاری برای خنثی‌سازی تزویج متقابل به همراه حفظ تطبیق امپدانس هر آنتن و کاهش فضای اشغال شده، می‌تواند بسیار ضروری و چالش برانگیز باشد.

آرایه آنتنی یکی از ساختارهای کلیدی برای بهبود عملکرد بسیاری از سامانه‌های مخابراتی شناخته شده و مطالعات بر روی آن از نگرش‌های مختلف سامانه‌ای و میدانی در حال توسعه است [۱-۲]. سامانه‌های ثابت و متحرک نوین، برای بهبود عملکرد تشعشعی و سامانه‌ای، بخصوص در انواع سامانه‌های چند ورودی و چند خروجی^۱ در گوشی‌های همراه، ایستگاه‌های فرستنده گیرنده پایه^۲، رادار، سامانه‌های ارتباطی ماهواره‌ای اتومبیل و یا انواع حسگرهای حساس، نیازمند به کارگیری تعداد زیادی آنتن در یک فضای محدود شده‌اند. محدودیت فضا، به دلیل نیاز به سامانه‌های کوچک‌تر با وزن کمتر و البته خالی گذاشتن ناحیه برای دیگر ادوات الکترونیکی، جهت دستیابی به یک عملکرد چندکاره می‌باشد. از طرفی، این فرآیند منجر به نزدیک شدن بیش از حد آنتن‌ها به یکدیگر شده و تزویج متقابل را افزایش

* نویسنده پاسخگو: zaker@azaruniv.ac.ir

¹Multi-input Multi output (MIMO)²Base Transceiver Station (BTS)³Side Lobe Level (SLL)⁴Front to Back Ratio (FBR)

در واقع اختلاف دامنه قطبش اصلی^{۱۵} با قطبش متعامد (متقاطع)^{۱۶} را نشان می‌دهد و بالا بودن آن، برای بهبود کیفیت در هر ارسال توسط هر قطبش بسیار حائز اهمیت است [۱۳]. دلایل اصلی بالا بودن قطبش متعامد عبارت‌اند از: ضخیم بودن زیرلایه، تشعشع موده‌های تشدیدی مرتبه‌های بالاتر از جمله TM₂₀، تشعشعات غیرمفید از خطوط و کابل تغذیه و عدم تقارن در ساختار پچ تشعشعی [۱۴]. روش‌های متداول برای کاهش این مؤلفه تشعشعی ناخواسته، به‌کارگیری انواع شکاف‌ها با اشکال و موقعیت‌های مختلف در صفحه زمین [۱۴-۱۳] و یا یک یا چندین وایای اتصال کوتاه روی سطح پچ تشعشعی [۱۵] می‌باشد. قابل ذکر است که DGS و VIA در ساختارهای چاپی مناسب نبوده، پیچیدگی را بالا برده و کیفیت تشعشع را کاهش می‌دهد.

مرور مقالات نشان می‌دهد که کارهای اندکی در زمینه ارائه ساختارهای چندکاره که به‌طور هم‌زمان بتواند تزویج متقابل و قطبش متعامد را کاهش دهد، ارائه شده است [۱۸-۱۶]. در مرجع [۱۶]، یک تشدیدگر دمبل شکل بزرگ بین دو پچ آنتن قرار گرفته و می‌تواند کاهش تزویج و قطبش متعامدی به ترتیب برابر با ۱۲ و ۷/۵ دسی بل را فراهم کند. این مقادیر مناسب نبوده و ساختار ارائه شده فضای بسیاری را بین دو آنتن اشغال می‌کند. یک عملکرد دوقطبشی عمودی و افقی به‌طور هم‌زمان با ایزولاسیون خوب و با یک ساختار چند لایه در مرجع [۱۷] ارائه شده است. روش اصلی در این مقاله، استفاده از تغذیه‌های چندگانه و تزویجی بر اساس قانون تصویر و به‌کارگیری DGS می‌باشد. این ساختار بزرگ و پیچیده، نتایج خوبی شامل ایزولاسیونی بهتر از ۴۵ دسی بل و قطبش متعامدی کمتر از ۳۵ دسی بل را ارائه می‌کند. در نهایت مرجع [۱۸]، از یک لایه فراصفحه در بالای یک ساختار آرایه‌ای ۲ در ۲ با آنتن‌های شکافدار^{۱۷} و تغذیه دیفرانسیلی بهره می‌برد. در این روش، ساختار فراصفحه از چندین پچ متناوب تشکیل شده و توزیع جریان روی آنتن‌ها را کنترل می‌کند. برای این ساختار نازک، ایزولاسیون بهتر از ۵۳ و قطبش متعامد کمتر از ۴۰ دسی بل به‌دست آمده است.

در این مقاله، یک روش ساده و مؤثر برای کاهش هم‌زمان تزویج متقابل بین دو پچ و دامنه قطبش متعامد کلی در یک آرایه صفحه H ارائه می‌شود. ویژگی‌های اصلی این طرح، عدم استفاده از DGS و VIA می‌باشد. مهم‌تر اینکه این ساختار پارازیتی در بین دو آنتن قرار نگرفته و در نتیجه هیچ محدودیتی برای فاصله بین دو پچ نخواهیم داشت. این ساختار شامل دو جفت نوار

برای کاهش تزویج متقابل یا افزایش ایزولاسیون در یک آرایه دو عنصری، راهکارهای مختلفی تاکنون ارائه شده است که می‌توان آنها را به طور کوتاه در دسته‌بندی زیر معرفی کرد:

- ۱) ساختارهای با صفحه زمین ناقص^۱ [۶] که از انتقال جریان‌های متقابل جلوگیری می‌کند. مشکل اساسی آنها تشعشع به پشت آنتن و در نتیجه کاهش بهره، بازده و FBR می‌باشد.
- ۲) به‌کارگیری نظریه موده‌های مشخصه^۲ [۷] که در این روش، موقعیت‌هایی برای قرارگیری آنتن‌ها انتخاب می‌شوند که دارای میدان برابر با صفر بوده و یا اختلاف دامنه میدانی بالایی داشته باشند تا ایزولاسیون فراهم شود. این روش، دارای بازده بالا بوده ولی تطبیق امپدانس مناسبی ندارد.
- ۳) شبکه‌های ایزوله‌کننده و تطبیق‌دهنده هم‌زمان^۳ [۹-۸] که دارای انواع شاخک‌ها^۴ با امپدانس، طول الکتریکی و بار مختلف، تزویج‌گرها و خنثی‌سازها^۵ می‌باشند. در این روش، ماتریس‌های شبکه از جمله Y، ABCD، یا S تعریف شده و شروط تطبیق و ایزولاسیون بر روی آنها برآورده می‌شوند. این مدارات نیز دارای بازده بالا بوده ولی باند باریک هستند.
- ۴) ساختارهای ایزوله‌کننده هوشمند [۳، ۵ و ۱۰-۱۲]: شامل سطوح انتخاب‌گر فرکانس^۶، فیلتر باندنگذر الکترومغناطیسی^۷، فرا صفحه^۸ و تشدیدگر میدان نزدیک^۹. این ساختارها به‌صورت سلول‌های متناوب یا غیرمتناوب بوده و رفتارهایی مشابه فیلتر باند نگذر امواج سطحی و نشتی، و یا تغییردهنده قطبش^{۱۰} از خود نشان می‌دهند. محدودیت‌هایی از جمله پیچیدگی طراحی، ترکیب چندلایه و اشغال قابل توجه فضای بین دو آنتن دارند. همچنین اکثراً دارای چندین وایای اتصال کوتاه^{۱۱} بوده که پیچیدگی را افزایش می‌دهد.

از طرفی دیگر، برای بسیاری از کاربردها و ساختارهای خاص آرایه‌ای از جمله، آرایه‌های فازی دو-قطبشی^{۱۲}، رادارهای هواشناسی قطبی شده^{۱۳}، و آنتن‌های ماهواره‌ای، داشتن خلوص قطبش^{۱۴} بالا در الگوی تشعشعی بسیار ضروری است. این خلوص

¹ Defected Ground Structures (DGS)

² Characteristic Modes Theory

³ Matching and Decoupling Networks (MDN)

⁴ Stubs

⁵ Neutralization Lines

⁶ Frequency Selective Surfaces (FSS)

⁷ Electro-magnetic Band Gap (EBG)

⁸ Metasurfaces

⁹ Near-field resonator

¹⁰ Polarization converter

¹¹ Short-circuited VIA

¹² Dual-polarized phased arrays

¹³ Polarimetric weather radar

¹⁴ Polarization purity

¹⁵ Co polarization component

¹⁶ Cross polarization component

¹⁷ Slot antenna

روش جدید خنثی شوند. زیرلایه (عایق) استفاده شده در این طراحی، FR4 بوده که یک انتخاب متداول و کم‌هزینه و مناسب برای امور آنتنی است. این زیرلایه با ضخامت $1/6$ میلی‌متری و ابعادی در حدود 85×55 میلی‌متر مربع، دارای ثابت دی الکتریک $4/4$ بوده و تانژانت تلفاتی نسبتاً بالا و برابر با حدود 0.02 دارد که عاملی برای ایجاد بخش موهومی در امپدانس ورودی آنتن است. قابل توجه است که صفحه زمین در این طراحی، کامل بوده و هیچ ساختاری مشابه DGS به کار برده نشده است. در تصویر (۱-الف) مشخص است که نوع آرایه خطی، چیدمان صفحه H می‌باشد که یعنی لبه‌های غیرتشعشی در کنار هم قرار می‌گیرند. فاصله این لبه‌ها طبق شکل برابر با یک میلی‌متر می‌باشد که کمترین فاصله قابل انتخاب بوده و برای فشرده کردن طراحی در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که با این فشردگی، یک مدار تزویج خازنی قابل توجه بین لبه‌ها ایجاد می‌شود که می‌توان آنرا با یک مدار شبکه π خازنی مدل کرد. این پدیده خود عاملی برای افزایش تزویج متقابل و بالطبع تضعیف پارامتر S_{21} خواهد بود. فاصله مرکز دو پچ نسبت به یکدیگر برابر با $22/7$ میلی‌متر می‌باشد که معادل 0.26λ در فرکانس $3/5$ گیگاهرتز است. این فاصله بسیار کمتر از فاصله متداول یعنی نصف طول موج در آرایه است و بنابراین این ساختار فشرده‌تر می‌باشد. آرایه ارائه شده در شکل (۱-الف) بدون عنصر پارازیتی بوده و شکل (۱-ب) این آرایه را با حضور جفت نوار پارازیتی نازک در دو طرف پچ‌ها و همسطح آنها نشان می‌دهد. این شبکه جدید، دارای وایا نیز نمی‌باشد. بطور کلی عدم تخریب صفحه زمین و نداشتن وایا در ساختار، باعث کاهش قابل توجه در پیچیدگی طراحی، ساخت و هزینه می‌شود. علاوه بر این، مشخص است که ساختار پارازیتی جدید برخلاف اکثریت روش‌های موجود بین دو پچ قرار نگرفته و بنابراین هیچ محدودیتی را برای فاصله آنتن‌ها اجبار نمی‌کند که این مزیت می‌تواند بسیار مفید باشد. فاصله این عناصر پارازیتی از پچ‌ها برابر با فقط 0.5 میلی‌متر انتخاب شده تا یک مسیر تزویجی قوی ایجاد گردد. عرض ساختارهای پارازیتی Wp بوده و در بهترین حالت برابر با 2 میلی‌متر بهینه و انتخاب شده است. قابل ذکر است که این عناصر پارازیتی را می‌توان با یک مدار LC (مدار سلف و خازن موازی) مدل کرد که از طریق تزویج میدان از روی پچ‌ها تحریک می‌شوند.

میکرواستریپی نازک در دو طرف هر دو پچ به‌طور هم‌زمان بوده و به لبه‌های تشعشی تزویج می‌شود. بدین ترتیب یک مسیر تزویج میدانی جدید ایجاد شده و با تزویج اصلی بین دو پچ مخالفت می‌کند. علاوه بر این، این نوارهای پارازیتی به فرم یک فیلتر عمل کرده و میدان‌های ناشی از جریان متعامد روی پچ‌ها را خنثی می‌کنند. بنابراین قطبش متعامد نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. معرفی ساختار، مطالعات پارامتری و انواع توزیع میدانی و جریانی در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج ساخت و اندازه‌گیری نیز به همراه مقایسه و بحث روی نتایج ارائه می‌گردد.

۲. ساختار و طراحی آنتن پچ آرایه‌ای میکرواستریپی

برای طراحی یک آرایه خطی دو عنصری از یک آنتن پچ میکرواستریپی با یک‌شکل شبه مستطیلی و تغذیه کابل کوکسیال استفاده می‌شود که یک انتخاب متداول برای انواع کاربردها می‌باشد. ساختار آنتن آرایه‌ای در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. موقعیت پروب تغذیه روی هر پچ مشخص شده که بر مبنای دست‌یابی به بهترین تطبیق امپدانس ورودی به دست آمده است. قرارگیری پروب در مرکز یکی از اضلاع پچ (در اینجا ضلع موازی محور x) و بهینه‌سازی موقعیت آن در طول ضلع دیگر (در اینجا ضلع موازی محور y) منجر به ایجاد قطبش خطی می‌شود. علاوه بر این، بر اساس این نوع موقعیت‌گیری پروب و با در نظر گرفتن مختصات $x-y$ نشان داده شده، مود تحریک و تشعشع در فرکانس تشدید غالب برابر با TM_{01} خواهد بود که مد نظر این طراحی می‌باشد. در این مود، لبه‌های پچ موازی با محور x را لبه‌های تشعشی گفته و دارای میدان الکتریک ثابت می‌باشد. در مقابل، لبه‌های دیگر، لبه‌های غیرتشعشی بوده و میدان الکتریکی در آنها دارای یک تغییر نصف طول موج خواهد بود [۱۹]. ابعاد پچ در شکل مشخص بوده و برای دست‌یابی به فرکانس تشدید در $3/5$ گیگاهرتز به‌طور پارامتری بهینه شده‌اند. ذکر این نکته حایز اهمیت است که طبق اصول طراحی در [۱۹]، اضلاع تشعشی باید مقدار بالاتری (در حدود 26 بجای $21/7$ میلی‌متر) داشته باشند تا به‌طور هم‌زمان پهنای باند مناسب و قطبش متعامد کمتری حاصل شود. ولی در این طراحی، مقداری پایین‌تر انتخاب شده است که کوچک بودن ساختار فراهم شده و در مقابل، محدودیت‌های حاصله، توسط

² Scattering parameter (from port 1 into port 2)

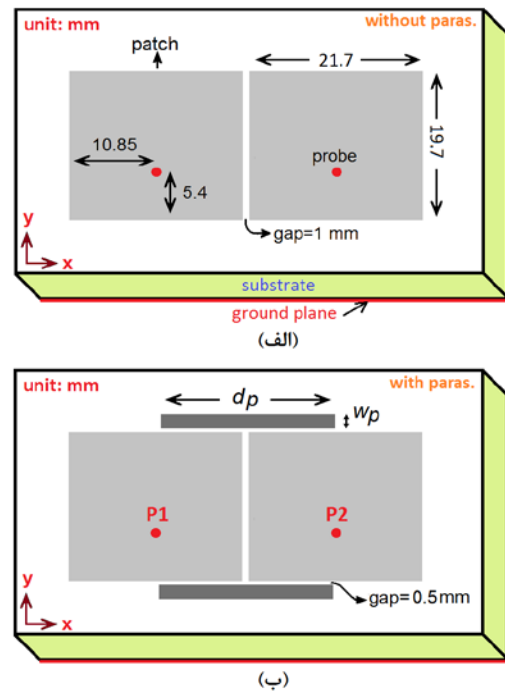
¹ Transverse magnetic mode

خنثی‌سازی این جریان مزاحم می‌باشد. ساختارهای پارازیتی به‌طور متقارن و در دوطرف پچ‌ها و به‌طور مشترک بین آنها به‌کار برده می‌شود تا بدین‌وسیله طبق شکل بتواند دو مسیر تزویجی جدید را بین پچ اول و پچ دوم برقرار سازد. ما ضریب تزویج بین هرکدام از پچ‌ها و ساختار پارازیتی را با β نشان می‌دهیم. این ضریب β می‌تواند برآیندی از تزویج خازنی و اندوکتانسی موجود بین لبه‌های تشعشعی پچ‌ها و نوارهای پارازیتی باشد (طبق شکل (۲-الف)). بر اساس شکل (۲-الف) از پچ اول تا نوار پارازیتی بالایی و ادامه مسیر تا پچ دوم، دو بار این ضریب β بایستی به‌کار برده شود (یعنی β در β) تا کل مسیر و دوبار عمل تزویج پوشش داده شود. بنابراین، از طریق مسیر نوار پارازیتی و تزویجی بالا یک جریان تزویجی - القایی جدید روی پچ دوم باندازه $\beta^2 I$ ایجاد می‌گردد. اگر تقارن ساختار پیشنهادی را لحاظ کنیم آنگاه تقریباً همین مقدار جریان القایی نیز به‌واسطه نوار پارازیتی پایینی بر روی پچ دوم ایجاد خواهد شد. مجموع دو جریان القایی برابر با $2\beta^2 I$ خواهد بود. در نهایت ما شاهد دو جریان $2\beta^2 I$ و αI بر روی پچ دوم خواهیم بود و نتیجتاً برای خنثی‌سازی آن جریان مزاحم (یعنی αI) و دستیابی به ایزولاسیون، باید رابطه زیر برقرار گردد:

$$\alpha I + 2\beta^2 I = I(\alpha + 2\beta^2) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، با حفظ فاصله دو پچ از یکدیگر، مشخصات زیرلایه و غیره، ضریب α ثابت خواهد بود. بنابراین، باید با کنترل β این شرط را برقرار ساخت. این ضریب تابع ابعاد و موقعیت نوارهای پارازیتی می‌باشد. حائز اهمیت است که به ترتیب اولویت، طول ساختارهای پارازیتی (یعنی dp)، عرض آنها (یعنی Wp) و فاصله آنها با پچ‌ها، ضریب β را کنترل می‌کنند. البته در این طرح، فاصله پچ‌ها از ساختار پارازیتی را ثابت و برابر با 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته‌ایم. بنابراین، dp و Wp می‌توانند شرط مذکور را برآورده سازند. در این مرحله باید متذکر شد که برای طراحی یک آرایه آنتنی به همراه پارازیت‌ها با هدف داشتن تطبیق و ایزولاسیون بالا به‌طورهم‌زمان یک فرکانس خاص، می‌توان ابعاد پارازیت‌ها و پچ تشعشعی را به‌عنوان متغیرهای آزاد تعریف کرد و سپس در یک محدوده منطقی از بابت طول موج هدایتی و به‌طورهم‌زمان مورد مطالعه و بهینه‌سازی گام به گام قرار داد. با توجه به آن فرکانس تشدید، می‌دانیم که ابعاد پچ بایستی در محدوده مجاز طراحی [۱۹] تغییرات داشته باشند.

شکل (۲-ب) ساز و کار کاهش مؤلفه متعامد الگوی تشعشعی را نشان می‌دهد. در این حالت، این عناصر پارازیتی که



شکل (۱): ساختار و پارامترهای آرایه دو عنصری با به‌کارگیری آنتن پچ میکرواستریپی (الف) بدون عناصر پارازیتی، و (ب) با عناصر پارازیتی

پارامتر Wp بیشتر روی خازن این مدار اثرگذار بوده و ما در این طراحی برای عدم اشغال فضای اضافی و حفظ مشخصات امپدانسی مورد نیاز، یک مقدار پایین برای آن انتخاب نموده‌ایم. طول این عناصر پارازیتی یعنی dp پارامتر بسیار مؤثری بوده و هر دو مقدار L و C مدل را کنترل می‌کند. بنابراین، عملکرد مناسب این ساختارهای پارازیتی و فرکانس کاری آنها بیشتر متأثر از dp بوده و در بخش مطالعات مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. تشریح نظریه جدید، نتایج و مقایسه

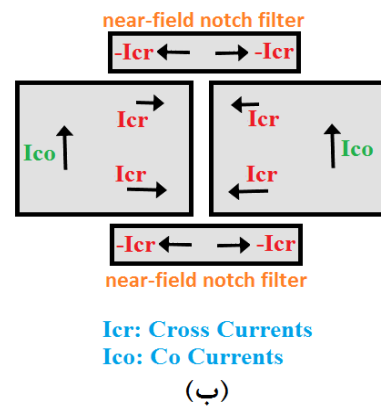
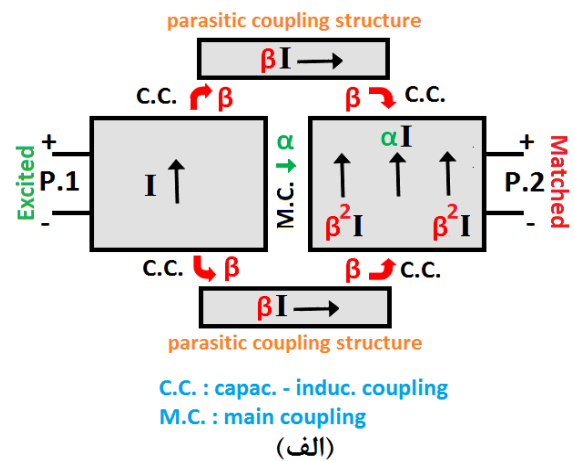
ساز و کار عملکرد ساختارهای پارازیتی و نظریه میدانی در شکل (۲) مشخص شده است. طبق شکل (۲-الف)، بین دو پچ نزدیک بهم، یک مسیر تزویج اصلی (main coupling) وجود دارد که میزان اثرگذاری آن از یک پچ به پچ دوم را با ضریب α مشخص می‌کنیم. این تزویج اصلی برآیندی از میدان‌های راه نزدیک بین دوپچ و امواج نشستی و سطحی عبوری بین دو پچ می‌باشد. در این مطالعه، پچ اول تحریک شده و پچ دوم تطبیق یافته امپدانسی است تا میزان اثرگذاری پچ اول روی پچ دوم مشخص شود. لذا، اگر جریان اصلی پچ اول را I تعریف کنیم آنگاه به‌واسطه تزویج اصلی مذکور، جریان αI روی پچ دوم القا می‌شود. بالطبع این جریان القایی ناشی از تزویج، مزاحم بوده و می‌تواند در دهانه دوم خودش را نشان داده و منجر به تخریب مشخصات امپدانسی آن دهانه گردد. هدف اول این ساختارهای پارازیتی،

در گام اول، نتایج پارامترهای S^1 (پراکندگی) آنتن آرایه‌ای برای دو حالت با و بدون عناصر پارازیتی در شکل (۳) نشان داده شده است. برای کل شبیه‌سازی‌ها در حالت تمام موج، از نرم افزار ANSYS HFSS (نسخه ۱۵) استفاده کرده‌ایم. همچنین به دلیل تقارن ساختار، صرفاً S_{11} و S_{21} مورد آنالیز قرار گرفته است. شکل (۳) نشان می‌دهد که فرکانس تشدید بدون پارازیت‌ها، حوالی ۳/۵۴ گیگاهرتز بوده و دارای تطبیق امپدانس خوبی نیست. با اضافه شدن عناصر پارازیتی، نه تنها فرکانس تشدید به حوالی ۳/۳۹۵ گیگاهرتز حرکت می‌کند که خود عاملی برای کاهش نسبی اندازه کلی است، بلکه همچنین میزان تطبیق امپدانس بهبود چشمگیری در حدود ۱۱ دسی‌بل را به خود می‌بیند.

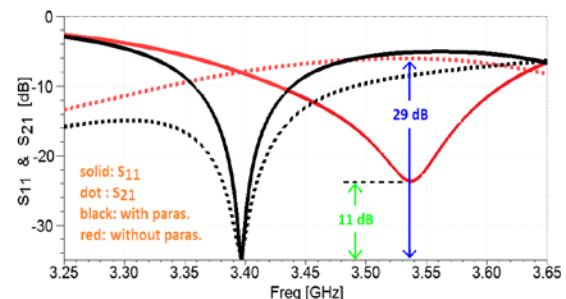
علاوه بر این موارد، کاملاً مشهود است که بعد از به‌کارگیری پارازیت‌ها، میزان ایزولاسیون (قدر مطلق S_{21}) به‌طور قابل توجهی در حدود ۲۹ دسی‌بل بهبود یافته است. نکته جالب توجه، هم فرکانس شدن محل بالاترین ایزولاسیون و بهترین تطبیق می‌باشد که باعث می‌شود در کل پهنای باند امپدانس، ایزولاسیون بالا باشد. همچنین، پارازیت‌ها باعث کاهش اندکی در پهنای باند امپدانس شده و محدوده ۳/۳۵ تا ۳/۴۵ گیگاهرتز با معیار $|S_{11}| \geq 10$ dB پوشش داده شده است. در ادامه، داده‌های S_{11} و S_{21} بهینه (مربوط به آرایه با حضور پارازیت‌ها) با کمک نرم افزار ADS (نسخه ۲۰۱۵)، بر روی یک مدل مداری دو دهانه‌ای شامل مدل LC پارازیت‌ها، ضرایب تزویج، مدل RLC پیچ‌ها و L اندوکتانس پروب تغذیه‌ها تطبیق داده شد. با یک خطای بسیار کم مقادیر L و C پارازیت‌ها حدوداً برابر با به ترتیب ۲,۲۶nH و ۱pF به‌دست آمدند که با فرکانس ۳,۴ گیگاهرتز سازگاری دارد.

برای ارزیابی میزان ایزولاسیون میدانی، توزیع میدان الکتریکی در دو حالت بدون و با پارازیت‌ها در شکل (۴) - الف و (ب) به ترتیب ارائه شده است. در این حالت، پیچ اول تحریک شده و پیچ دوم تطبیق یافته امپدانس است تا میزان تزویج از پیچ اول به پیچ دوم معین گردد. طبق شکل (۴) - ب، تضعیف قابل توجه میدان روی پیچ دوم و هم‌زمان القای بالای میدان روی عناصر پارازیتی کاملاً مشهود است. این پدیده نشان‌دهنده ایجاد ایزولاسیون بالا می‌باشد. علاوه بر این، شکل توزیع میدان در پیچ اول در هر دو حالت، مد تحریک TM_{01} را نشان می‌دهد. یعنی میدان ثابت در لبه‌های تشعشعی و یک تغییر نصف طول موج در لبه‌های غیرتشعشعی و یک صفر میدان (zero-field) در وسط همان لبه‌ها.

در طول لبه‌های تشعشعی پیچ‌ها قرار گرفته‌اند به‌عنوان فیلتر میدان نزدیک عمل نموده و میدان حاصل از جریان‌های متعامد روی پیچ‌ها (I_{cr}) را خنثی می‌کنند. دلیل این پدیده، مخالف بودن راستای جریان‌های القاشده روی عناصر پارازیتی با راستای I_{cr} ‌ها می‌باشد که توسط نمایش توزیع جریان سطحی در ادامه مقاله اثبات خواهد شد. در ضمن می‌دانیم که در مد تحریک TM_{01} ، جریان‌های اصلی I_{co} هستند که مؤلفه اصلی الگوی تشعشعی را باعث می‌شوند.



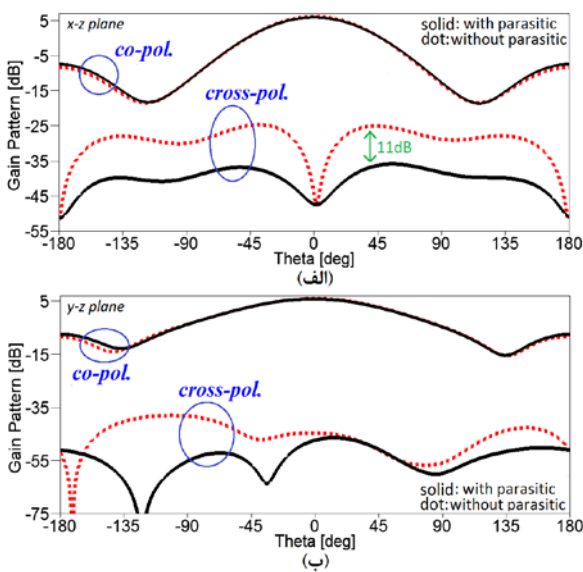
شکل (۲): نظریه جدید ارائه شده: (الف) ساز و کار کاهش تزویج متقابل و (ب) طریقه کاهش مؤلفه متعامد الگوی تشعشعی



شکل (۳): نمودار S_{11} و S_{21} آرایه با و بدون عناصر پارازیتی

¹Scattering parameters

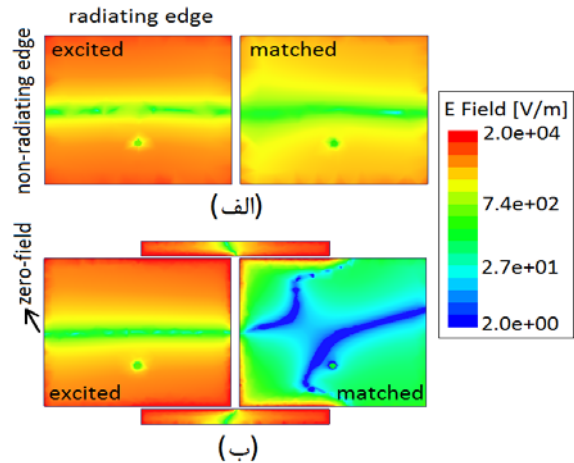
برای بررسی میزان اثرگذاری عناصر پرازیتی روی مؤلفه متعامد الگوی تشعشعی، الگوهای صفحه H (یا صفحه X-Z) و صفحه E (یا صفحه Y-Z) این آرایه را در فرکانسهای تشدید ۳/۵۴ (بدون پرازیت) و ۳/۳۹۵ (با پرازیت) گیگاهرتز به ترتیب در شکل (۶-الف و ب) نشان داده‌ایم. در این مطالعه، هر دو آنتن تحریک‌شده‌اند. در شکل (۶-الف) کاملاً مشهود است که اضافه شدن پرازیت‌ها، باعث کاهش قابل توجه مؤلفه متعامد (cross-pol.) در حدود ۱۱ دسی‌بل و در اکثریت زوایای Theta شده است. طبق بخش (ب) این شکل، کاهش نسبی مؤلفه متعامد در صفحه E نیز دیده می‌شود. بنابراین افزایش خلوص قطبش در هر دو صفحه نمایش به دست می‌آید که برای اکثریت کاربردها ضروری است. مقایسه مؤلفه‌های اصلی الگوی تشعشعی (co-pol.) در هر دو صفحه نشان می‌دهد که اضافه شدن پرازیت‌ها باعث کاهش بسیار اندکی در سطح بهره آرایه ۲ شده است. این کاهش در حدود ۰/۱۵ دسی‌بل بوده و قابل اغماض است.



شکل (۶): مقایسه الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای در حالات با و بدون عناصر پرازیتی در (الف) صفحه H و (ب) صفحه E

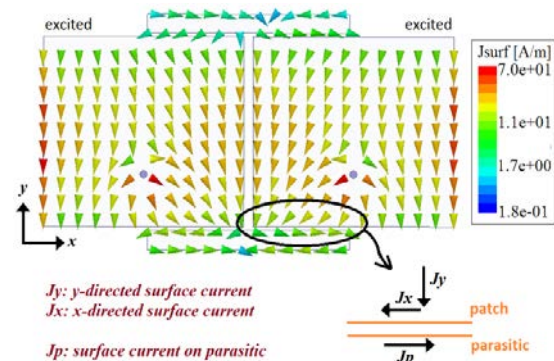
۳. مطالعات پارامتری، نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا پارامتر حساس dp مطالعه می‌شود. در این بررسی، مقادیر Wp و فاصله بین عنصر پرازیتی و پیچ در مقادیر بهینه خود، یعنی ۲ و ۰/۵ میلی‌متر ثابت فرض می‌شود. شکل (۷) نمودارهای مربوط به پارامترهای S_{11} و S_{21} را برای سه مقدار متفاوت از dp نشان می‌دهد. کاملاً مشخص است که با



شکل (۴): توزیع میدان الکتریکی روی آنتن آرایه‌ای برای حالت: (الف) بدون پرازیت‌ها، و (ب) با پرازیت‌ها

توزیع جریان سطحی بر روی ساختار در شکل (۵) ارائه شده است. طبق شکل، جریان‌های روی پیچ در لبه‌های تشعشعی به دو مؤلفه J_x و J_y تبدیل می‌شوند که اولی در راستای جریان‌های اصلی پیچ بوده و دومی، جریان‌های متعامد و تخریب‌گر هستند. در طرف مقابل، جریان‌های القاشده روی عناصر پرازیتی یعنی J_p مخالف این جریان‌های تخریب‌گر بوده و بالطبع میدان‌های تشعشعی یکدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین انتظار داریم مؤلفه متعامد الگوی تشعشعی به طور قابل توجهی کاهش یابد. نکته دیگر این است که صفر جریان در میانه هر دو عنصر پرازیتی بوده و در کناره‌ها تقریباً دامنه جریان بالا است. بنابراین این توزیع جریان، نشان می‌دهد که طول مؤثر این عناصر (یعنی dp) باید نزدیک و یا کمی کوتاه‌تر از نصف طول موج هدایت‌شده^۱ (λ_g) در فرکانس تشدید باشد. این موضوع در بخش بعدی بررسی خواهد شد.

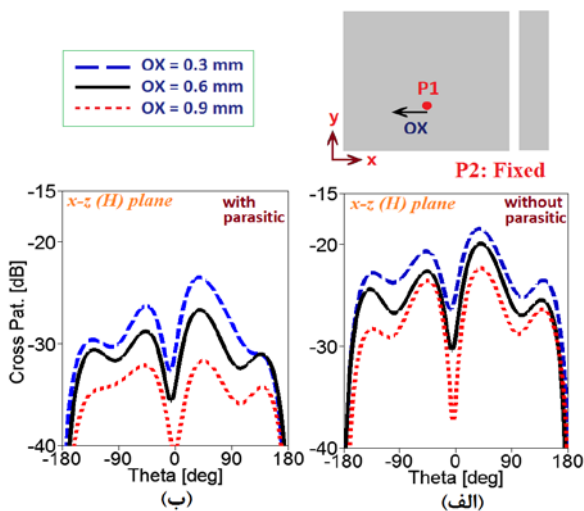


شکل (۵): توزیع جریان روی پیچ‌ها و عناصر پرازیتی به همراه بردارهای جریان

²Array Gain

¹Guided wavelength (λ_g)

تشعشی صفحه H برای این آرایه در دو حالت بدون و با پارازیت‌ها به ترتیب در شکل (۸-الف و ب) ارائه شده است. در این مطالعه، ۳ مقدار برای پارامتر OX یعنی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ (معادل $\lambda/0.1$ در $3/395$ گیگاهرتز) میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقایسه نمودارهای بخش (ب) با بخش (الف) اثبات می‌کند که حضور پارازیت‌ها در هر سه مقدار از خطا، منجر به کاهش قابل توجه مؤلفه متعامد الگو شده است. بنابراین اگر در ساخت این آرایه خطای جزئی در موقعیت پروب نیز ایجاد شده باشد، آنگاه حضور این عناصر پارازیتی می‌تواند از افزایش مؤلفه متعامد الگوی تشعشی و کاهش خلوص قطبش جلوگیری کند.



شکل (۸): مؤلفه متعامد الگوی صفحه H آرایه برای مقادیر مختلف از انحراف موقعیت پروب دهانه ۱ (P1) در راستای محور x (OX) برای (الف) بدون عنصر پارازیتی و (ب) با حضور پارازیت

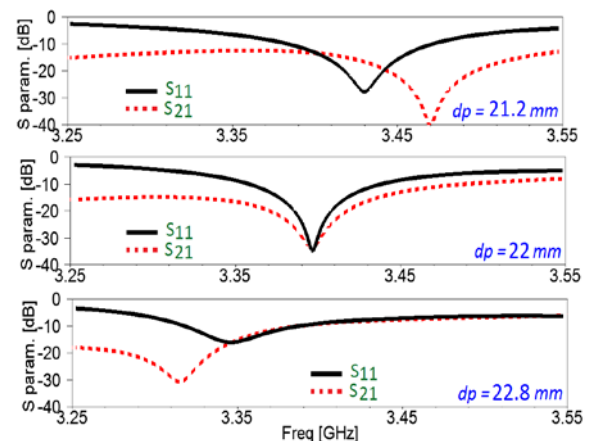
۴. ساخت نمونه بهینه، اندازه گیری، نتایج و مقایسه

در این بخش، یک نمونه از آنتن آرایه دو عنصری بهینه شده، ساخته و اندازه گیری می‌شود. تصویر نمونه ساخته شده در شکل (۹-الف) نشان داده شده است. برای ساخت، از دو اتصال دهنده SMA^۱ کوچک استفاده شده و پروب آن از داخل عایق عبور داده شده و در روی پیچ به آن لحیم شده است. از عایق خانواده FR4-Epoxy با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک حدود ۴/۴ استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری پارامترهای S آرایه از تحلیل‌گر شبکه ZVA-67 بهره برده شده است.

اندازه‌گیری الگوهای تشعشی نیز در یک اتاق آنتن بدون انعکاس با حفظ نسبی استاندارد ارزیابی میدان دور انجام گرفته

افزایش طول این عناصر، فرکانس مربوط به بیشترین ایزولاسیون (بالاترین مقدار قدر مطلق S_{21} یا همان عمق نمودار) به‌طور قابل توجهی به مقادیر پایین‌تر حرکت می‌کند. این اثرگذاری روی موقعیت فرکانس تشدید و تطبیق امپدانس آن نیز تاحدودی مشهود است. بهترین انتخاب برای این پارامتر، مقدار ۲۲ میلی‌متر می‌باشد که در آن بهترین تطبیق و بالاترین ایزولاسیون به‌طورهم‌زمان به‌دست آمده و مقادیر بالاتر از ۳۲ دسی‌بل دارند. این مقدار بهینه برای dp معادل دقیقاً $0.25\lambda_0$ می‌باشد که λ_0 طول موج فضای آزاد در فرکانس $3/395$ گیگاهرتز است. البته اگر طول موج هدایت شده (λ_g) و ثابت دی‌الکتریک مؤثر را برای این فرکانس، ثابت دی‌الکتریک ۴/۴ و عرض عنصر پارازیتی ۲ میلی‌متری محاسبه کنیم، مقادیر به ترتیب ۴۹ میلی‌متر و $3/28$ به‌دست می‌آید. بنابراین مقدار بهینه ۲۲ میلی‌متری برای dp معادل خواهد بود با $0.45\lambda_g$. این موضوع را بر اساس توزیع جریان در بخش قبلی نشان دادیم.

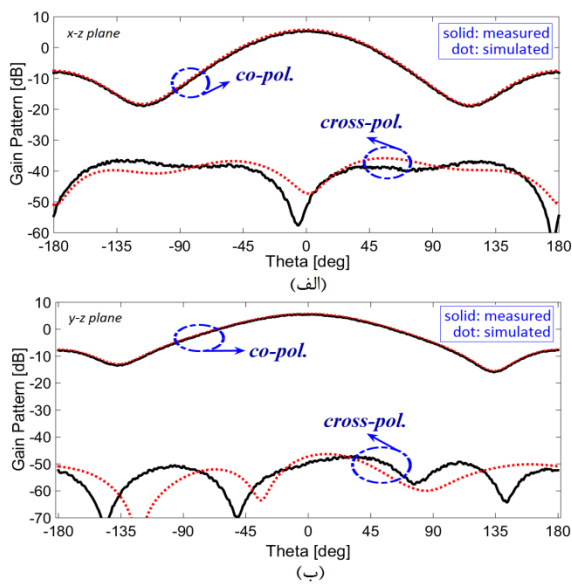
موضوع دیگر، میزان افزایش مؤلفه متعامد الگوی تشعشی به‌واسطه خطا در موقعیت پروب تغذیه (یا همان محل اتصال هادی میانی کابل کوکاسیال به پیچ) می‌باشد. موقعیت پروب روی پیچ برای کسب بهترین تطبیق امپدانس بهینه می‌شود. بخصوص موقعیت آن در مرکز پیچ و در راستای محور y . اگر در فرآیند ساخت، خطا در موقعیت پروب در راستای مذکور اتفاق بیافتد آنگاه منجر به کاهش قابل توجه تطبیق امپدانس خواهد شد که این وضعیت مدنظر ما نیست. مهم‌ترین مساله، خطای موقعیت پروب در راستای محور x است که می‌تواند منجر به عدم تقارن فیزیکی و میدانی شده و جریان متعامد روی پیچ افزایش یابد.



شکل (۷): S_{11} و S_{21} آرایه پارازیت‌دار برای مقادیر مختلف از dp

در نهایت مؤلفه متعامد الگوی تشعشی افزایش می‌یابد که مطلوب نخواهد بود. این خطا را با OX در شکل (۸) نشان داده‌ایم. این خطا در موقعیت پروب را صرفاً برای دهانه اول در نظر گرفته و پروب در پیچ دوم در موقعیت بهینه خود ثابت است. نمودار الگوی

^۱SMA connector
^۲Network Analyzer



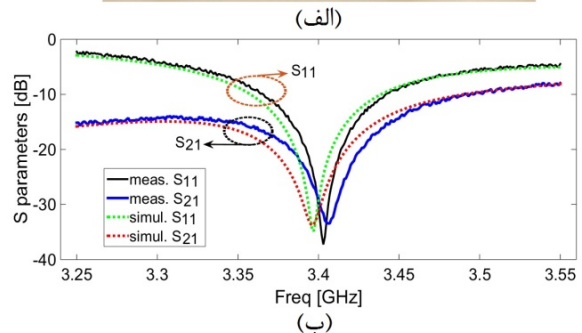
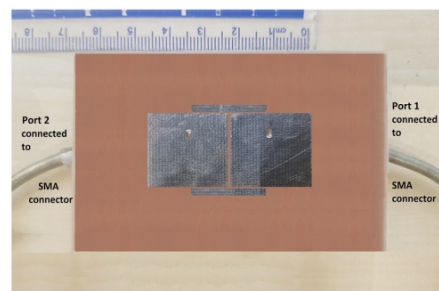
شکل (۱۰): مقایسه الگوی تشعشی اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی برای آنتن آرایه‌ای نهایی در (الف) صفحه تشعشی H (صفحه x-z) و (ب) صفحه تشعشی E (صفحه y-z).

جدول (۱): مقایسه پارامترهای آنتن آرایه‌ای در حالت با (اندازه‌گیری شده) و بدون عناصر پارازیتی (شبیه‌سازی شده)

پارامترها	بدون عناصر پارازیتی	با عناصر پارازیتی
فرکانس تشدید (معادل با بهترین تطبیق امپدانس) [GHz]	۳/۵۴	۳/۴۰۵
محدوده [GHz] و پهنای باند امپدانس با معیار $ S_{11} \geq 10\text{dB}$	۳/۴۳۳-۳/۶۱۵ ٪۴/۵	۳/۳۵۵-۳/۴۵۵ ٪۳/۱
بهره آرایه (array gain) [dBi]	۴/۰۷	۳/۹۸
راندمان تشعشی [%] (rad. efficiency)	۸۵	۸۳/۵
نسبت دامنه گلبرگ اصلی به گلبرگ پشتی (F/B)	۲۲/۵	۲۱/۴

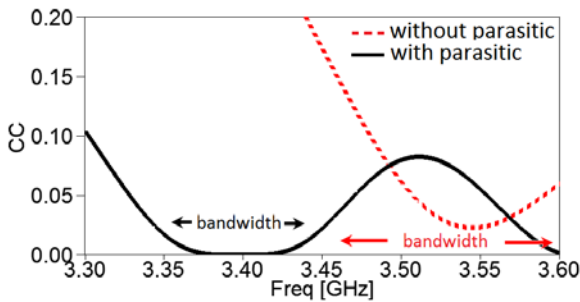
به‌عنوان مطالعه آخر روی طرح جدید پیشنهاد شده، پارامتر ضریب همبستگی (CC) بین دو آنتن بررسی می‌شود. اگر بخواهیم این ساختار آرایه‌ای را به دلیل داشتن ایزولاسیون و خلوص قطبش بالا در یک سامانه MIMO به کار بگیریم، آنگاه ضریب CC که به مفهوم میزان استقلال الگوهای تشعشی دو آنتن کنار هم می‌باشد، بایستی مطالعه شود. چون دو آنتن به کار گرفته شده در کنار هم فاصله بسیار نزدیکی داشته و دارای قطبش یکسان هستند، بنابراین باید ضریب CC بالایی به دست بیاید که برای سامانه MIMO اصلاً مناسب نیست. بنابراین طرح جدید پیشنهاد شده باید بتواند این ضریب را در محدوده پهنای

است. نتایج پارامترهای S_{11} و S_{21} در حالات شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در شکل (۹-ب) ارائه و مقایسه شده است. تطابق مناسبی بین آنها در هر دو پارامتر به طور کلی دیده می‌شود. خطای اندکی در موقعیت فرکانس تشدید در حالت اندازه‌گیری مشهود است که این اختلاف در حدود ۰/۰۱ گیگاهرتز (یا ۱۰ مگاهرتز) می‌باشد که قابل اغماض می‌تواند باشد. سطح تطبیق امپدانس و ایزولاسیون نیز بسیار نزدیک بهم هستند. الگوهای تشعشی صفحه H و صفحه E اندازه‌گیری شده در فرکانس به ترتیب در شکل (۱۰-الف و ب) ارائه شده است. تطابق قابل قبولی بین نمودارها مشهود است. بیشترین اختلاف بین مؤلفه‌های متعامد در هر صفحه تشعشی، در حدود ۳-۴ دسی‌بل می‌باشد. دامنه بهره نیز در حالت اندازه‌گیری در هر دو صفحه، اندکی پایین‌تر است. این کاهش کمتر از ۰/۶ دسی‌بل بوده و بنابراین می‌تواند قابل قبول باشد. مقایسه کامل نتایج با جزئیات در جدول (۱) ارائه شده است. داده‌های این جدول کاهش حدود ۱۵۰ مگاهرتزی در موقعیت فرکانس تشدید را نشان می‌دهد که می‌توان از آن برای کاهش نسبی اندازه آرایه، بهره برد. به مفهوم دیگر، می‌توان افزایش اندازه ناشی از حضور عناصر پارازیتی در اطراف آنتن‌ها را تعدیل کرد. کاهش نسبی در پهنای باند نیز مشهود است که یک محدودیت فرض می‌شود. در طرف مقابل، کاهش قابل توجهی در بهره و راندمان دیده نمی‌شود که یک مزیت عمده برای این ساختار جدید محسوب می‌شود.



شکل (۹): (الف) تصویر نمونه ساخته‌شده از آنتن آرایه‌ای بهینه با حضور عناصر پارازیتی و (ب) نمودارهای S_{11} و S_{21} در حالات شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

مشخصات با وجود نبود وایا و DGS در ساختار می‌باشد که نه تنها پیچیدگی ساخت و طراحی را کاهش می‌دهد بلکه از تشعشع به سمت پشت آرایه جلوگیری می‌کند. و در آخر قابل ذکر است که همان‌طور که در مقدمه بدان اشاره گردید، کارهای کمی در مورد کاهش هم‌زمان مؤلفه متعامد الگو و تزویج متقابل ارائه شده است [۱۸-۱۶]. در مقایسه با این مراجع با ساختارهای چندلایه یا پیچیده، طرح ارائه شده در این مقاله، دارای اندازه کوچک‌تر و مشخصات خیلی بهتری می‌باشد و بدین دلیل، مراجع مذکور جهت مقایسه وارد جدول (۲) نشده‌اند.



شکل (۱۱): نمودار ضریب همبستگی (CC) برای آرایه بهینه در حالت با و بدون عناصر پارازیتی

باند فرکانسی خود به مقادیر نزدیک به صفر محدود کند. برای محاسبه این ضریب از روی پارامترهای S اندازه‌گیری شده، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۲۰]:

$$CC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (2)$$

براساس این رابطه، نمودار ضریب CC برای دو حالت با و بدون پارازیت‌ها محاسبه شده و در شکل (۱۱) نشان داده شده است. کاهش CC با حضور پارازیت‌ها و در کل محدوده پهنای‌بند پوشش داده شده، کاملاً مشهود است. بدون عناصر پارازیتی، میزان CC بالا بوده و حتی در ابتدای پهنای باند در اطراف ۳/۴۶ گیگاهرتز، به مقادیر بالای ۰/۱ افزایش می‌یابد که نشان از عدم ایزولاسیون تشعشعی دو آنتن نسبت به یکدیگر است.

در نهایت، داده‌های طرح ارائه شده و مشخصات آن در مقایسه با چندین کار جدید در جدول (۲) جمع‌آوری شده‌اند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که اندازه کلی ارائه شده به طور قابل توجهی از اندازه مراجع انتخاب شده کوچک‌تر بوده و فاصله لبه به لبه آنتن‌ها نسبت به یکدیگر نیز بسیار اندک است. ضریب همبستگی در حد کارهای جدید بوده و میزان ایزولاسیون نیز مقدار بالا و قابل توجهی دارد. راندمان نیز بالاتر از ۸۳ درصد بوده و بالطبع قابل قبول است. نکته مهم دیگر، فراهم شدن این

جدول (۲): مقایسه آنتن آرایه‌ای ارائه شده با کارهای مشابه جدید.

اندازه [λ ₀ ²]	وایا	راندمان [%]	CC	فاصله لبه به لبه [λ ₀]	S ₂₁ [dB]	فرکانس تشدید [GHz]	نوع روش	[مراجع] تاریخ
۰/۴×۰/۶۳	بله	--	۰/۰۸	۰/۰۶	۶۲	۱۰	Parasitic	[۳] ۲۰۱۸
۰/۷۶×۰/۸۴	خیر	۹۶	--	۰/۳۸	۶۰	۲/۳	DGS	[۶] ۲۰۱۶
۰/۴×۰/۷۶	خیر	۸۹	۰/۰۱	۰/۰۱۸	۲۵	۲/۴	Neutralization line	[۸] ۲۰۲۰
۰/۶×۰/۶	بله	۸۸	۰/۰۱	۰/۲۱۶	۴۵	۲	MDN	[۹] ۲۰۲۰
۰/۳۸×۰/۶۱	خیر	۶۰	--	۰/۱۷	۳۲	۵/۸	Polarization- Converter	[۱۱] ۲۰۱۷
۰/۶۷×۱/۰۴	خیر	۸۰	--	۰/۰۱۵	۲۱	۲/۲۳	Near field resonator	[۱۲] ۲۰۱۹
۰/۲۸×۰/۵	خیر	۸۳/۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۳۳	۳/۴	Parasitic	کار ارائه شده

۴. نتیجه‌گیری

دو پچ تشعشعی فشرده و کاهش دامنه مؤلفه متعامد الگوی تشعشعی برآورده می‌شود. این طرح پیشنهادی بهبود تطبیق امپدانس و ایزولاسیون به بالاتر از ۳۲ دسی‌بل و کاهش مؤلفه متعامد الگو به کمتر از ۳۰ دسی‌بل را فراهم کرد که نتایج

در این مقاله، یک آرایه دو عنصری میکرواستریپی از آنتن‌های پچ با تغذیه کواکسیالی و اندازه کوچک و فشرده ارائه شده است. نشان دادیم که با استفاده از یک زوج از عناصر پارازیتی-تشدید می‌کرواستریپی، دو هدف هم‌زمان شامل افزایش ایزولاسیون بین

- [10] S. Gupta, Z. Briqech, A. R. Sebak, and T. A. Denidni, "Mutual-coupling Reduction Using Metasurface Corrugations for 28 GHz MIMO Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2763-2766, 2017.
- [11] Y.-F. Cheng, X. Ding, W. Shao, and B.-Z. Wang, "Reduction of Mutual Coupling Between Patch Antennas Using a Polarization-conversion Isolator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1257-1260, 2016.
- [12] M. Li, B. G. Zhong, and S. Cheung, "Isolation Enhancement for MIMO Patch Antennas Using Near-field Resonators as Coupling-mode Transducers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 755-764, 2018.
- [13] M. I. Pasha, C. Kumar, and D. Guha, "Mitigating High Cross-Polarized Radiation Issues Over the Diagonal Planes of Microstrip Patches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 4950-4954, 2019.
- [14] M. I. Pasha, C. Kumar, and D. Guha, "Simultaneous Compensation of Microstrip Feed and Patch by Defected Ground Structure for Reduced Cross-polarized Radiation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 7348-7352, 2018.
- [15] X. Zhang and L. Zhu, "Patch Antennas with Loading of a Pair of Shorting Pins Toward Flexible Impedance Matching and Low Cross Polarization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 4, pp. 1226-1233, 2016.
- [16] C. K. Ghosh, R. Hazra, A. Biswas, A. Bhattacharjee, and S. Parui, "Suppression of Cross-polarization and Mutual Coupling Between Dual Trace Dual Column Coaxial Microstrip Array Using Dumbbell-shaped Resonator," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 9, pp. 2182-2186, 2014.
- [17] H. Saeidi-Manesh and G. Zhang, "High-isolation, Low Cross-polarization, Dual-polarization, Hybrid Feed Microstrip Patch Array Antenna for MPAR Application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 5, pp. 2326-2332, 2018.
- [18] S. Liu, D. Yang, Y. Chen, X. Zhang, and Y. Xiang, "High Isolation and Low Cross-Polarization of Low-Profile Dual-Polarized Antennas via Metasurface Mode Optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Doi: 10.1109/TAP.2020.3030107.
- [19] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, third ed. John Wiley & sons, 2005.
- [20] Ch. H. See, R. A. Abd-Alhameed, Z. Z. Abidin, N. J. McEwan, and P. S. Excell, "Wideband Printed MIMO/diversity Monopole Antenna for WiFi/WiMAX Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 4, pp. 2028-2035, 2012.

اندازه‌گیری نیز آن را تأیید نمود. مشاهده کردیم که اضافه کردن این عناصر پارازیتی، نه تنها بهره و راندمان را خیلی تضعیف نکرد، بلکه توانست ضریب همبستگی را به‌طور قابل توجهی در کل باند کاهش دهد. خنثی شدن افزایش شدت قطبش متعامد به دلیل خطای احتمالی در موقعیت پروب تغذیه نیز نتیجه دیگری بود که حضور پارازیت‌ها منجر به آن شد. در نهایت باید متذکر شد که به دلیل تقارن فیزیکی طرح پیشنهادی، این ایده جدید می‌تواند به‌خوبی برای آرایه‌های بیشتر از دو عنصر نیز پاسخگو و کارساز باشد. آرایه‌های چند آنتنی قطعاً نیاز حال حاضر و آتی سامانه‌هایی نظیر انواع رادارها و MIMO حجیم می‌باشد.

۵. مراجع

- [1] Y. Haghian, S. H. MohseniArmaki, and M. Kazerooni, "Design, Simulation and Realization of S band Circular Polarization Microstrip Array Antenna," *Applied. Electromagnetic*, no. 1, pp. 49-54, 2015. (In Persian)
- [2] M. Safari Dehnavi, S. M. J. Razavi, and S. H. MohseniArmaki, "Beam Width Expansion of Microstrip Array Antenna by Wide Angle Impedance Matching Layer," *Applied. Electromagnetic*, vol. 6, no. 1, pp. 31-39, 2018. (In Persian)
- [3] R. Zaker, "Design of a Very Closely-spaced Antenna Array with a High Reduction of Mutual Coupling Using Novel Parasitic L-shaped Strips," *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol. 28, no. 9, p. e21422, 2018.
- [4] H. Xu, S. S. Gao, H. Zhou, H. Wang, and Y. Cheng, "A Highly Integrated MIMO Antenna Unit: Differential/common Mode Design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 11, pp. 6724-6734, 2019.
- [5] K.-L. Wu, C. Wei, X. Mei, and Z.-Y. Zhang, "Array-antenna Decoupling Surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6728-6738, 2017.
- [6] K. Wei, J.-Y. Li, L. Wang, Z.-J. Xing, and R. Xu, "Mutual Coupling Reduction by Novel Fractal Defected Ground Structure Bandgap Filter," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4328-4335, 2016.
- [7] X. Zhao, S. P. Yeo, and L. C. Ong, "Decoupling of Inverted-F Antennas with High-order Modes of Ground Plane for 5G Mobile MIMO Platform," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4485-4495, 2018.
- [8] M. Li, L. Jiang, and K. L. Yeung, "A General and Systematic Method to Design Neutralization Lines for Isolation Enhancement in MIMO Antenna Arrays," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 6, pp. 6242-6253, 2020.
- [9] K.-D. Xu, H. Luyen, and N. Behdad, "A Decoupling and Matching Network Design for Single-and Dual-Band Two-Element Antenna Arrays," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 9, pp. 3986-3999, 2020.