

Directional MIMO Slot Antenna Array and its Application for ITU-R F.386-9 & IEEE 802.11ac

M.jalali^{1*}, T. Aribi, T.Sedghi¹ , F.oruji

* Assistant Professor, Microwave and Antenna Research Center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

(Received: 18/04/2023 revised: 26/09/2023 Accepted:11/10/2023 published: 07/11/2023)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.3.6>

Abstract

In this article, a novel geometry for the multiple input multiple output (MIMO) array slot antenna with directive radiation patterns for WLAN (IEEE 802.11ac) & ITU applications is proposed. By using a two sub-element topology, a combined novel element is obtained. The proposed MIMO array slot antenna illustrates beneficences in terms of small size with physical dimensions of $8.5\lambda h \times 8.5\lambda h$ and relatively high front-to-back ratio without using reflectors and directors with approximately 20dB F/B. Therefore, a compact MIMO antenna array with high isolation among those the combined elements are obtained. The practicality of the proposed MIMO is validated by Simulated and measured results

Keywords : Slot antenna, directive antenna, antenna array, MIMO system

¹ Corresponding author E-mail: sedghi.tohid@gmail.com

علمی - پژوهشی

آنتن آرایه‌ای شکافدار چند ورودی - چند خروجی سمت‌گرا و کاربرد آن برای باندهای

IEEE 802.11ac, ITU-R F.386

مهدی جلالی^۱، توحید اریبی^۲، توحید صدقی^{۳*}، فردین اروچی^۴

۱-استادیار، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد نقره، دانشگاه آزاد اسلامی نقره، ایران ۲-استادیار، ۳-استادیار، مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران ۴-استادیار، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹، انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.3.6>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

پایسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله، یک ساختار جدید برای آنتن آرایه‌ای شکافدار چند ورودی- چند خروجی با الگوهای تشعشی سمت‌گرا برای کاربردهای WLAN(IEEE 802.11ac) و ITU پیشنهاد شده است. با استفاده از دو زیرعنصر، یک عنصر جدید ترکیب شده به دست آمده است. آنتن آرایه‌ای پیشنهادی دارای مزیت کوچکی ابعاد فیزیکی ($8.5\lambda_h \times 8.5\lambda_h$) است. ضمناً آنتن پیشنهادی نهایی، بدون استفاده از بازتاب‌دهنده‌ها و جهت دهنده‌ها دارای نسبتاً خوبی (در حدود ۲۰ دسی‌بل) است. هشت زیرعنصر برای تشکیل ساختار نهایی استفاده شده‌اند و چهار عنصر شکافدار سمت‌گرا در شکل آرایه ایجاد شده‌اند تا الگوهای تشعشی تقریباً عمودی را ایجاد کنند. بنابراین یک آرایه آنتنی چند ورودی-چند خروجی فشرده با ایزولاسیون بالا بین عنصرهای ترکیب شده به دست آمده است. آزمایش‌های عملی آنتن نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: آنتن شکافدار، سیستم چند ورودی - چند خروجی، آنتن سمت‌گرا، آرایه آنتنی

کرده‌اند تا سمت‌گرایی الگوهای تشعشی را افزایش دهند. علاوه بر آن شکاف‌های نامتقارن در شکل زمین به‌عنوان بازتابنده برای بهبود جهت الگوهای تابشی قرار داده شده است. همچنین از اصلاح ساختار آرایه نیز برای بهبود سمت‌گرایی به‌عنوان یک روش کارآمد استفاده شده است. روش اصلاح ساختار آرایه با روش نوارهای فلزی جهت دستیابی به F/B^۲ بالا، ترکیب شده‌اند [۹]. ساختارهای بازتابنده پستی^۳ و حفره پستی^۴ [۱۰-۱۲] برای بهبود سمت‌گرایی آنتن‌های شکافدار معرفی شده است. این آنتن‌ها مشکلاتی در مجتمع‌سازی با عناصر مدار را دارند و دارای ساختارهای سه‌بعدی حجیمی هستند.

در این مقاله از یک روش جدید برای بهبود F/B آنتن شکافدار چند ورودی-چند خروجی^۵ (MIMO) با استفاده از ساختار

۱- مقدمه

با پیشرفت سریع دستگاه‌های مخابراتی، عناصری با اندازه کوچک، سادگی در ساخت و الگوهای تشعشی مناسب برای کاربردهای WLAN(IEEE 802.11ac) و ITU مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عناصر شکافدار^۱ بهترین گزینه برای استفاده در مدارهای مجتمع‌سازی شده فرکانس بالا در ترکیب با سایر اجزای مدار می‌باشند. شکاف‌های با شکل‌های مخروطی و پنج‌ضلعی انتها باز [۷-۱۱] متداول‌ترین روش برای عناصر شکافدار سمت‌گرا می‌باشند. این نوع ساختارها الگوهای تابشی سمت‌گرا دارند و حداکثر جهت تابش آن‌ها شبیه الگوهای تابشی سمت‌گرای آنتن‌های شکافدار انتها باز می‌باشند. مطالعات قبلی مانند [۸] و [۹] از یک ساختار انگشتی شکل فلزی شکافدار که در گوشه سمت راست بالای زمین مستطیلی شکل قرار دارد، استفاده

2- Front-to- Back Ratio

3- Back-Reflector

4 -Back-Cavity

5-Multi Input-Multi Output

* رایانامه نویسنده مسئول: Sedghi.tohid@gmail.com

1-Slot Elements

فرکانسی و بهبود تطبیق امپدانس از عنصر پارازیتیکی شانه‌ای شکل استفاده شده است.

۲- طراحی آنتن شکاف‌دار U شکل (شکل ۱ (ب)): با قرارگیری عنصر طراحی‌شده در قسمت اول در کنار عنصر شکل (۱) (ب) تزویج ناخواسته‌ای رخ می‌دهد. برای کاهش جریان سطحی و تزویج ناخواسته و همچنین بهبود تطبیق امپدانس، از ساختار شکاف‌دار مکمل U شکل استفاده شده است.

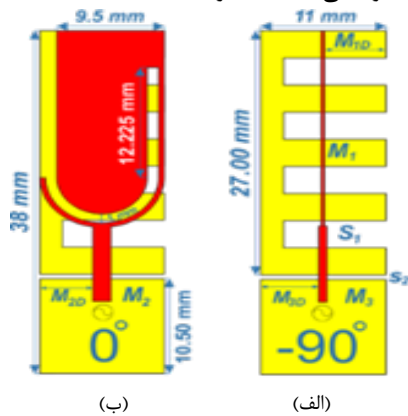
۳- قرارگیری دو زیرعنصر طراحی‌شده در کنار یکدیگر و طراحی ساختار تقسیم‌کننده تغذیه توان (شکل ۱ (ج)): برای رسیدن به تحریک ۹۰ درجه نسبت به همدیگر از یک خط تغذیه تریبیعی استفاده می‌شود. طول خط تغذیه باید $\lambda_g/4$ باشد (λ_g طول موج هدایت در فرکانس مرکزی که برابر ۵.۸ گیگاهرتز است). از لحاظ تئوری این مقدار با استفاده از روابط زیر قابل استخراج است:

$$\lambda_g = 300 / (F \sqrt{\epsilon_{eff}}) \quad (1)$$

که مقدار مؤثر نفوذپذیری الکتریکی مؤثر از رابطه آونز (۲) قابل استخراج است.

$$\epsilon_{eff} = (\epsilon_r + 1)/2 + (\epsilon_r - 1)/2 \left(1 + \frac{10W}{h}\right)^{-0.55} \quad (2)$$

با جای‌گذاری مقادیر λ_g برابر ۳۱/۴۷ میلی‌متر استخراج می‌شود. انتخاب ربع طول موج هدایتی منجر به اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای در تحریک و در شکاف تشعشعی می‌شود. این اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای از طول موج ساختار خط تغذیه حاصل می‌شود. (اضافه نمودن زائده در خط تغذیه برای دستیابی به تطبیق بهتر است. فرکانس‌های کاری به‌وسیله طول خط شکاف‌دار تعیین می‌شوند. بنابراین بهتر است که از روش مود شکافی در مقایسه با روش مود دوقطبی استفاده شود)



زیرعنصر استفاده شده است. برای کاهش ابعاد فیزیکی آنتن، دو زیرعنصر به فاصله $\lambda/4$ (طول موج فضای آزاد است) از هم قرار گرفته‌اند که در مرجع [۹] این فاصله $\lambda/2$ لحاظ شده است. در طراحی ساختار آنتن پیشنهادی از تئوری آرایه استفاده شده است. آنتن MIMO پیشنهادی نهایی از عناصر سمت‌گرا بهره می‌برد. آنتن شکاف‌دار پیشنهادی دارای نسبت F/B بالای ۲۰ دسی‌بل در فرکانس مرکزی است که در مقایسه با مرجع [۴-۱] و [۱۵-۲۰] دارای بهبود نسبی (۵ تا ۸ درصد) است. آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار چند ورودی-چند خروجی سمت‌گرا پیشنهادی از چهار عنصر ترکیبی استفاده می‌کند که دارای ایزولاسیون بالا، تطبیق امپدانس نسبتاً خوب و ابعاد الکتریکی کوچک است. آنتن آرایه‌ای پیشنهادی در باند 5-8GHz کار می‌کند که کل باندهای WLAN(IEEE 802.11ac) و ITU را پوشش می‌دهد.

۲- طراحی عنصر شکاف‌دار سمت‌گرا

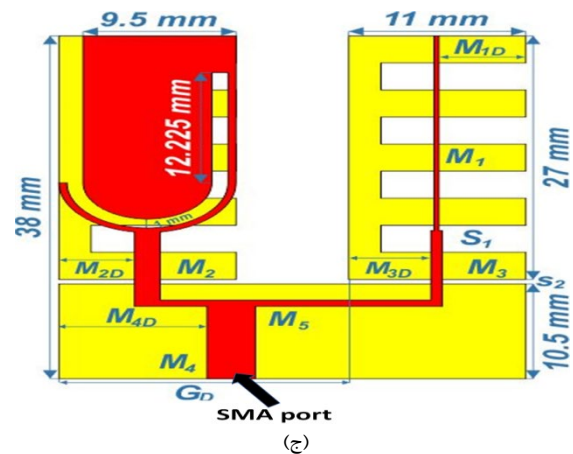
شکل (۱ الف) مراحل طراحی عنصر شکاف‌دار جهتی پیشنهادی را نشان می‌دهد که بر روی زیرلایه FR4 با $\epsilon_r=4.4$ و ضخامت یک میلی‌متر و تانژانت تلفات برابر ۰.۰۲ طراحی شده است. عنصر پیشنهادی از دو شکاف انتها باز تشکیل شده که با فاصله مشخصی و با اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای تغذیه می‌شوند. اگر دو عنصر با اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای تغذیه شوند، درحالی‌که فاصله بین آن‌ها یک‌چهارم طول موج باشد آرایه می‌تواند به F/B بالایی دست یابد چرا که الگوهای تشعشعی در یک جهت حذف می‌شوند. عنصر شکاف‌دار پیشنهادی دارای سمت‌گرایی قوی‌تری است. ابعاد عنصر شکاف‌دار پیشنهادی با توجه به مرور مقالات پیشین و تنظیم برای باند فرکانسی موردنظر بر مبنای محاسبات طول موج هدایتی و فرایند تکرار و خطا با استفاده از شبیه‌ساز به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} M_{1L}=21\text{mm}, M_{1W}=0.4\text{mm}, M_{1D}=5.3\text{mm}, M_{2L}=8\text{mm}, \\ M_{2W}=1.5\text{mm}, M_{2D}=4.5\text{mm}, M_{3L}=8.1\text{mm}, \\ M_{3W}=0.6\text{mm}, M_{3D}=9.1\text{mm}, M_{4L}=7\text{mm}, M_{4W}=3.1\text{mm}, \\ M_{4D}=9\text{mm}, M_{5L}=16.5\text{mm}, M_{5W}=0.5\text{mm}, S_{1L}=9\text{mm}, \\ S_{1W}=3\text{mm}, S_{1L}=9\text{mm}, S_{1W}=3\text{mm}. \end{aligned}$$

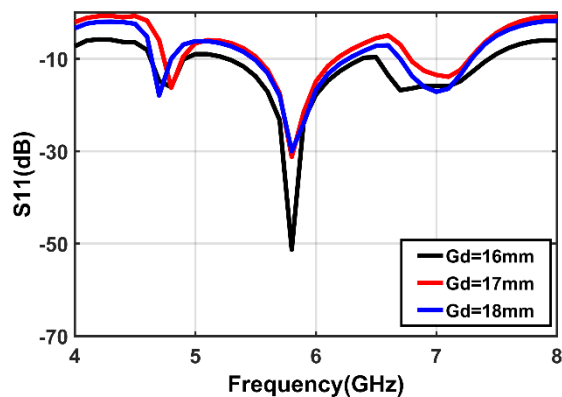
با ترکیب دو آنتن تک‌قطبی که هر کدام نسبت به همدیگر با اختلاف فاز ۹۰ درجه تحریک شده‌اند به عنصر آنتن شکل (۱) (ب) می‌رسیم. مراحل نحوه طراحی ساختار و اثرگذاری هر یک در ادامه توضیح داده می‌شود:

۱- طراحی آنتن تک‌قطبی میله‌ای شکل (شکل ۱ الف): این آنتن با زاویه ۹۰- درجه تحریک می‌شود. برای رزونانس تک

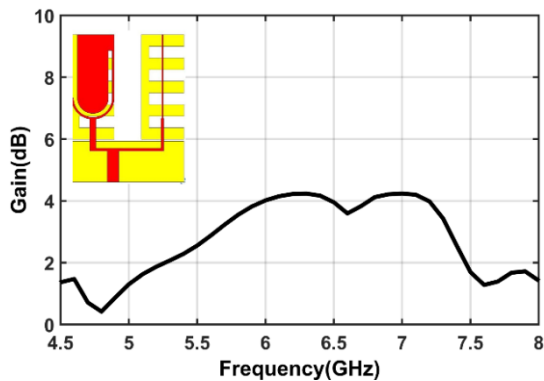
برای افزایش دقت شبیه‌سازی، خطوط تغذیه به‌وسیله SMA تحریک می‌شوند. مطالعات پارامتری برای انتخاب بهترین فاصله بین دو شکاف (G_D) انتها باز انجام شده است. شکل (۲) دامنه تلفات بازگشتی شبیه‌سازی شده برای G_D با اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد مقدار بهینه پارامتر G_D ۱۶ میلی‌متر انتخاب می‌شود تا بهترین تطبیق امپدانس و بالاترین نسبت F/B رخ دهد. GD نقش مهمی در کل ساختار دارد چون با تنظیم دقیق G_D الگوی G_D سمت‌گرا ایجاد می‌شود. علاوه بر آن تطبیق امپدانس در فرکانس مورد نظر با تنظیم G_D بهبود می‌یابد.



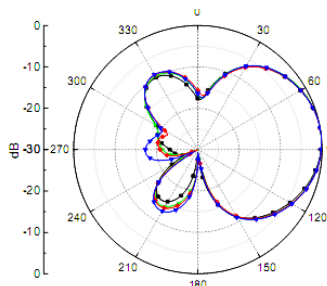
شکل (۱). ساختار آنتن شکاف‌دار سمت‌گرای پیشنهادی الف) آنتن تک‌قطبی میله‌ای ب) طراحی آنتن شکاف‌دار U ج) آنتن نهایی



شکل (۲). $|S_{11}|$ شبیه‌سازی شده برای G_D مختلف



شکل (۳). بهره شبیه‌سازی شده برای عنصر شکاف‌دار



شکل (۴). الگوی نرمالیزه شده بررسی پارامتر G_D در فرکانس مرکزی و بررسی مقادیر مختلف F/B

۱- طراحی و بهینه‌سازی با استفاده از تحلیل پارامتریک دو عنصر تشعشی

۲- تزویج دو عنصر طراحی شده در مرحله قبل با استفاده از یک خط تغذیه T شکل

عملکرد تطبیقی خوب و همبستگی کم بین عنصرهای MIMO برای یک آرایه ضروری است. کاهش تزویج متقابل به آسانی با قرار دادن عنصرهای سمت‌گرا در کنار یکدیگر به‌گونه‌ای که در شکل آمده است به دست می‌آید. آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار MIMO با چهار آنتن سمت‌گرا در یک حلقه مربعی ساخته شده است (شکل ۵)). تشعشع شکاف MIMO هر زیرعنصر می‌تواند باعث کاهش تزویج متقابل شود. در این نوع از پیکربندی، آرایه آنتنی شکاف‌دار MIMO پیشنهادی از عناصر سمت‌گرا استفاده می‌کند، بنابراین به ایزولاسیون نسبتاً مناسبی می‌رسد. آرایه آنتنی شکاف‌دار MIMO پیشنهادی گزینه بسیار خوبی برای محیط‌های شهری و داخل ساختمان^۱ است. یک نمونه از آنتن ساخته شده که با تحلیلگر شبکه-Keysight PNA-X مدل N5342A (۱۰ مگاهرتز تا ۲۶/۵ گیگاهرتز) در مرکز تحقیقات میکروویو و آنتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه اندازه‌گیری شده است.

پارامترهای پراکندگی S شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در شکل‌های (۶) و (۷) رسم شده‌اند. به دلیل تقارن در آنتن آرایه‌ای، پارامترهای پراکندگی S برای درگاه ۱ مطالعه شده است. زمانی که فاصله بین عناصر آنتن چند ورودی - چند خروجی نهایی $0.04\lambda_h$ طول موج فضای آزاد در فرکانسی که نسبت F/B بیشترین است) تنظیم می‌شود، این مقدار موجب کاهش 25dB- تزویج متقابل در باندهای WLAN (IEEE 802.11ac) و ITU می‌شود. این ساختار ایزولاسیون را بیشتر از 10dB در مقایسه با دیگر مراجع [۴-۱] بهبود می‌بخشد. ایزولاسیون برای دیگر مقالات [۶-۲] 14dB- است.

شکل (۸) بهره اندازه‌گیری شده آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار چند ورودی - چندخروجی سمت‌گرای پیشنهادی را نشان می‌دهد. بهره اندازه‌گیری شده بیشتر از 5dB در فرکانس مرکزی باندهای WLAN/ITU است. شکل (۹) راندمان تشعشی شبیه‌سازی شده چهار درگاه از آنتن MIMO پیشنهادی را نشان می‌دهد. واضح است که آنتن شکاف‌دار MIMO یک ساختار کارآمد برای باندهای WLAN/ITU است. در شکل (۱۰) نمونه ساخته شده آنتن پیشنهادی همراه با دستگاه تحلیلگر شبکه آورده شده است. در تست درگاه‌ها از بارهای تطبیق ۵۰ اهمی استفاده شده است. الگوهای تشعشی در شکل (۱۱) رسم شده‌اند. همان‌طور که

جدول (۱). رنگ‌بندی منحنی‌های شکل (۴) بر اساس نسبت F/B

منحنی قرمز	منحنی سیاه	منحنی آبی	GD میلی‌متر
۱۷	۱۶	۱۸	
۱۹/۴	۲۰	۱۹/۲	F/B دسی‌بل

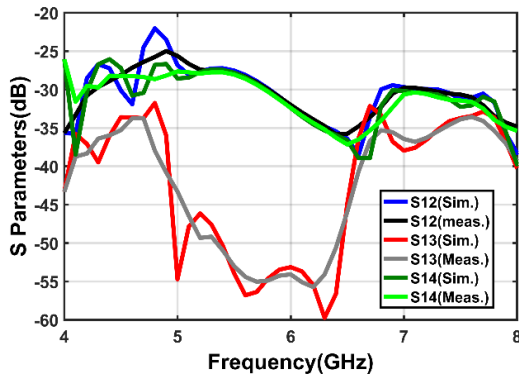
بهره شبیه‌سازی شده برای عنصر شکاف‌دار در شکل (۳) مطالعه شده است. واضح است که عنصر طراحی شده بهره خوبی در باندهای عملیاتی دارد. بهره در باند WLAN بیشتر از 3dB و در باند ITU در حدود 4dB_i ثبت شده است. اندازه عنصر پیشنهادی $1.2\lambda_g \times 0.78\lambda_g$ است. شکل (۴) الگوی نرمالیزه شده پارامتر G_D در فرکانس مرکزی (۵/۸ گیگاهرتز) برای مقادیر مختلف F/B را نشان می‌دهد. از شکل (۴) کاملاً واضح است که برای مقدار ۱۶ میلی‌متر بیشترین F/B به دست آمده است. در جدول (۱) رنگ‌بندی شکل (۴) بر اساس نسبت F/B آورده شده است. در شکل (۶) ضرایب انعکاس کاملاً زیر سطح -10dB در باندهای WLAN (IEEE 802.11ac) و ITU هستند. راندمان تشعشی بیشتر از ۹۰ درصد در سرتاسر باند حاصل شده است. جدول (۲) مقایسه بین نسبت‌های F/B برای عنصر پیشنهادی و بعضی از مراجع را نشان می‌دهد. نسبت F/B آنتن پیشنهادی با آنتن‌های شکاف‌دار صفحه‌ای ارائه شده در مقالات [۴-۱] و مراجع [۱۵-۱۷] مقایسه شده است. عنصر پیشنهادی F/B خیلی بهتری از سمت‌گرایی و ابعاد را نسبت به هر کدام از مراجع را دارد.

جدول (۲). مقایسه عنصر پیشنهادی با سایر مراجع

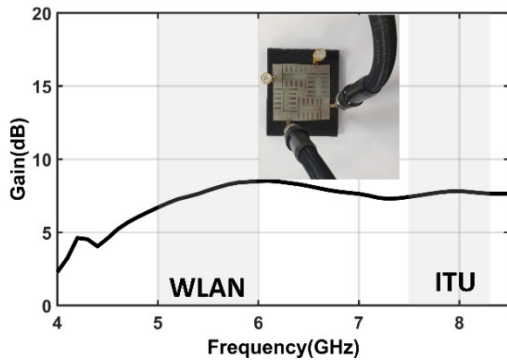
میانگین کارایی	بهره dBi	نسبت F/B به اندازه	اندازه بر اساس طول موج	F/B نسبت	مرجع
۰.۸	۷	۱۲.۳۵	$0.89\lambda_h \times 0.91\lambda_h$	dB۱۰	[۱]
۰.۷۵	۸	۹.۱۶	$1.29\lambda_h \times 1.10\lambda_h$	dB۱۳	[۲]
۰.۷۸	۶.۸	۶.۳۷	$1.26\lambda_h \times 1.62\lambda_h$	dB۱۳	[۳]
۰.۸۵	۷.۴	۱۵.۶۳	$1.20\lambda_h \times 0.96\lambda_h$	dB۱۸	[۴]
۰.۸	۷	۱۳.۴۴	$1.1\lambda_h \times 1.02\lambda_h$	dB۱۵	[۱۵]
۰.۷۵	۶	۱۴.۵۶	$1.0\lambda_h \times 0.96\lambda_h$	dB۱۶	[۱۶]
۰.۷۵	۶.۶	۱۳.۹۶	$1.13\lambda_h \times 0.96\lambda_h$	dB۱۴	[۱۷]
۰.۸۲	۴	۱۸.۳	$1.2\lambda_g \times 0.78\lambda_g$	dB۲۰	آنتن پیشنهادی

۳- طراحی MIMO

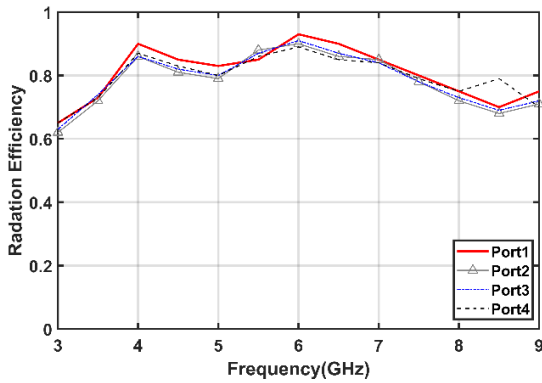
عنصر شکاف‌دار پیشنهادی با سمت‌گرایی مناسب و اندازه کوچک، بهترین انتخاب برای آرایه چند ورودی - چند خروجی است. شکل (۵) طرح پیشنهادی آنتن آرایه‌ای چندورودی - چندخروجی سمت‌گرا را نشان می‌دهد. روند طراحی شامل مراحل زیر است:



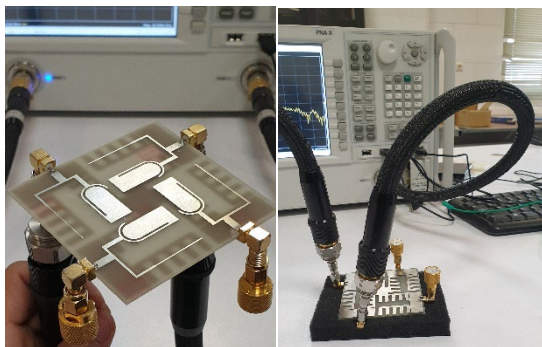
شکل (۷). پارامترهای پراکنندگی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای آرایه MIMO پیشنهادی نهایی.



شکل (۸). بهره اندازه‌گیری شده برای آرایه MIMO پیشنهادی

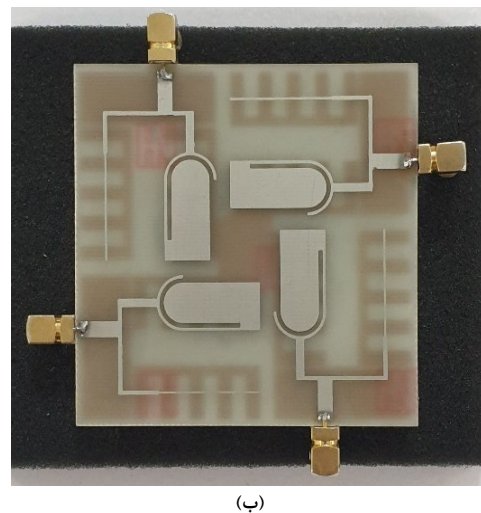
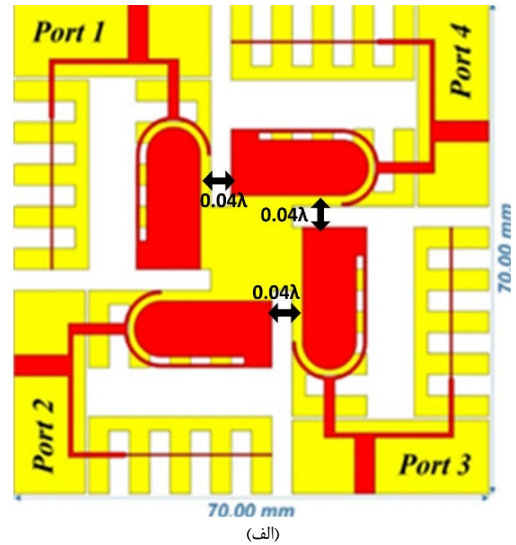


شکل (۹). راندمان تشعشعی شبیه‌سازی شده چهار درگاه از آنتن MIMO پیشنهادی

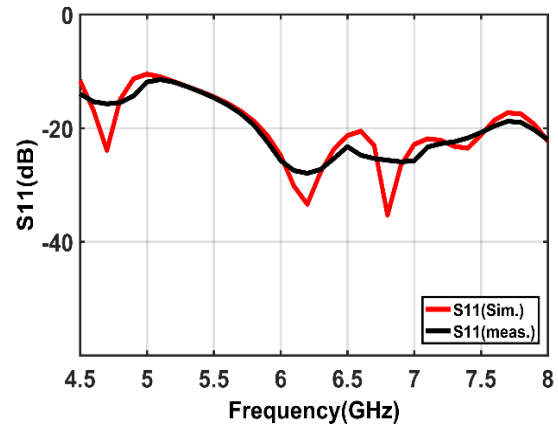


شکل (۱۰). نمونه ساخته شده و فرایند اندازه‌گیری پارامترهای S آنتن با دستگاه آنالیزگر شبکه

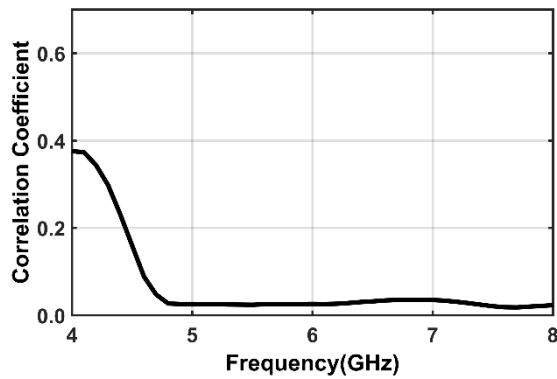
مشخص است عملکرد تمامی خروجی‌ها در بازه فرکانسی موردنظر دارای تطابق نسبی قابل قبولی هستند.



شکل (۵). (الف) طراحی آرایه‌های شکاف‌دار چند ورودی-چند خروجی سمت‌گرا پیشنهادی (ب) نمونه ساخته شده



شکل (۶). دامنه ضریب برگشتی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای آرایه MIMO پیشنهادی



شکل (۱۲). ضریب همبستگی آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار MIMO پیشنهادی

۴- نتیجه‌گیری

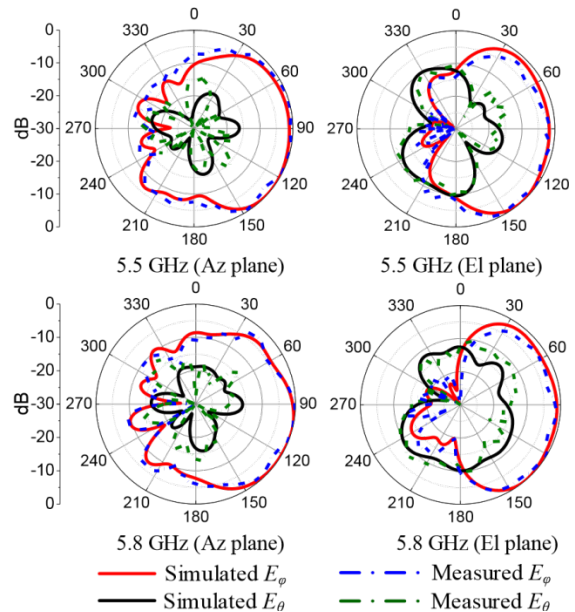
در این مقاله یک آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار چند ورودی-چند خروجی جهت‌دار فشرده در WLAN/ITU ارائه شده است. آنتن آرایه‌ای پیشنهادی دارای ابعاد $8.5\lambda_h \times 8.5\lambda_h$ و نسبت F/B نسبتاً خوبی را در فرکانس کاربردی معرفی می‌کند. آنتن آرایه‌ای چند ورودی-چند خروجی ارائه شده دارای تزویج متقابل 20dB و دارای تلف ظرفیتی کمتر از 0.5 Bits/s/Hz برای عناصر ترکیب شده با فاصله کمتر از ۳ میلی‌متر است. آنتن آرایه‌ای صفحه‌ای شکاف‌دار چند ورودی-چند خروجی با عملکرد بالا و بدون هیچ‌گونه پیچیدگی در شکل و ساختار دارای کاربرد گسترده‌ای در مخابرات (IEEE 802.11ac) و WLAN و ITU است.

۵- قدردانی

مقاله حاضر منتج از پروژه تحقیقاتی تأیید شده در شورای پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارومیه و واحد نقده می‌باشد. بدین وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه صمیمانه قدردانی می‌شود. از جناب آقای طاها صدقی و خانم فاطمه زهرا جلالی به خاطر همکاری دقیقی که در این مقاله داشتند تشکر می‌نماییم. همچنین بدین‌وسیله از راهنمایی ارزشمند داوران محترم و نیز ویراستار مجله که با نظرات خود ما را در بهبود کیفیت مقاله یاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] P. Rezaei, Z. Mousavi Razi, "Broadband and High Gain Circularly Polarized Slot Array Antenna with Hybrid Coupler Feed Network", Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 4, No. 1, 2016. (In Persian)
- [2] M. Sonkki, D. Pfeil, and K. R. Dandekar, "Wideband planner four-Element linear Antenna Array," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 13, pp. 1663-1666, 2014. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2350259
- [3] C. J. Wang and Y. Dai, "Enhancement of Pattern Directivity for the Open Slot Antenna by utilizing Array Topology," Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 54, no. 5, pp. 1273-1277, May. 2012. DOI: 10.1002/Mop.26782



شکل (۱۱). الگوهای تشعشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده درگاه ۱ از آنتن MIMO پیشنهادی

به‌صورت نظری ظرفیت سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی با تعداد عناصر آنتن افزایش می‌یابد. اگرچه وجود همبستگی در کانال‌های MIMO موجب کاهش ظرفیت می‌شود. در مواقعی که نسبت سیگنال به نویز بالا می‌باشد، توسط فرمول زیر تلفات ظرفیتی محاسبه می‌شود [۱۸].

$$C_{\text{loss}} = -\log_2 \det(\Phi^R) \quad (3)$$

که Φ^R ماتریس همبستگی آنتن گیرنده است [۱۹].

$$\Phi^R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} & \rho_{14} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} & \rho_{24} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} & \rho_{34} \\ \rho_{41} & \rho_{42} & \rho_{43} & \rho_{44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\rho_{ii} = 1 - \sum_{n=1}^4 (S_{in}^* S_{ni}) \quad (5)$$

$$i, j = 1, 2, 3, 4$$

ضریب همبستگی آنتن آرایه‌ای شکاف‌دار MIMO در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این آنتن در سرتاسر باندهای WLAN/ITU تلفات ظرفیت شبیه‌سازی شده بیش از 0.5 Bits/s/Hz نیست. ظرفیت کانال سیستم (4×4) MIMO برای SNR برابر 20dB تقریباً 25 Bits/s/Hz است. بنابراین دارای تلف ظرفیتی 0.3 است که مقدار قابل قبولی برای سیستم‌های MIMO است. تلف ظرفیتی پایین سیستم به‌دلیل تطبیق خوب و ایزولاسیون بالا در بین عناصر آنتن است. با در نظر گرفتن مدل محفظه تشدید و استخراج پارامترهای پراکندگی این مقدار از رابطه زیر قابل استخراج است:

$$CC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - (|S_{11}^2| + |S_{21}^2|))(1 - (|S_{22}^2| + |S_{12}^2|))} \quad (6)$$

- [17] S. Mojarrad, T. Sedghi, L. Asadpor, "Switchable & Configurable Feed Network for Array Antenna at C-Band Application", *Wireless Personal Communications*, 120, pages 3217-3224, 2021. DOI: 10.1007/s11277-021-08609-7
- [18] Ghader Sharifi, Yashar Zehforoosh, Tohid Sedghi, Manouchehr Takrimi, "A high Gain pattern Stabilized Array Antenna fed by modified Butler matrix for 5G Applications", *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Volume 122, July 2020. DOI: 10.1016/j.aeue.2020.153237
- [19] S. H. Chae, S. K. Oh, and S. O. Park, "Analysis of mutual Coupling, Correlations, and TARC in WiBro MIMO Array Antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 6, pp. 122-125, 2007. DOI: 10.1109/LAWP.2007.893109
- [20] J. Thaysen and K. B. Jakobsen, "Envelope Correlation in (N, N) Mimo Antenna Array from Scattering Parameters," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 48, no. 5, pp. 832-834, May. 2006. DOI: 10.1002/mop.21490.
- [4] Y. Luo, Q. X. Chu, J. F. Li, and Y. T. Wu, "A planar H-Shaped Directive Antenna and its Application in compact MIMO Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 9, pp. 4810-4814, Sep. 2013. DOI: 10.1109/TAP.2013.2267193
- [5] R. Karimian, H. Oraizi, S. Fakhte, and M. Farahani, "Novel F-shaped quad-band printed slot Antenna for WLAN and WiMAX MIMO Systems," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 405-408, 2013. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2252140
- [6] Sedghichongaralouye-Yekan, M. Naser-Moghadasi, and R. A. Sadeghzadeh, "Broadband Circularly Polarized 2x2 Antenna Array with Sequentially Rotated Feed Network for C-Band Application", *Wireless Personal Communications*, vol. 91, no. 2, pp. 653-660, November 2016. DOI: 10.1007/s11277-016-3485-4
- [7] Panos N. Alevizos, Xiao Fu, Nicholas D. Sidiropoulos, Ye Yang, Aggelos Bletsas, "Limited Feedback Channel Estimation in Massive MIMO With Non-Uniform Directional Dictionaries", *IEEE Trans. Signal Processing.*, vol. 66, no. 19, pp. 5127 - 5141, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TSP.2018.2865412
- [8] Nibedita Nandan, Sudhan Majhi, Hsiao-Chun Wu, "Maximizing Secrecy Capacity of Underlay MIMO-CRN Through Bi-Directional Zero-Forcing Beamforming", *IEEE Trans. Wireless Communications.*, vol. 17, no. 8, pp. 5327 - 5337, Jun. 2018. DOI: 10.1109/TWC.2018.2841939
- [9] Y. Zehforoosh, and T. Sedghi, "An Improved CPW-Fed Printed UWB Antenna with Controllable Band-notched Functions", *Journal of Communication Engineering (J. Comm. Eng.)*, vol. 5, no. 1, pp. 38-49, June 2016. DOI: 10.22070/jce.2016.386
- [10] T. Sedghichongaralouye-Yekan, M. Naser-Moghadasi, RA Sadeghzadeh, "Reconfigurable wide Band Circularly polarized Antenna Array for WiMAX, C-Band, and ITU-R Applications with Enhanced Sequentially Rotated Feed Network", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 25, no. 9, pp. 825-833, November, 2015. DOI: 10.1002/mmce.20922
- [11] M. Naser-Moghadasi, and T. Sedghichongaralouye-Yekan, "Semifractal Antenna with dual-bands filtering and Circular Polarization Properties Using SCBP and MDGS Structures", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 11, pp. 2483-2487, November, 2015. DOI: 10.1002/mop.29372
- [12] S. Shafei, and T. Sedghichongaralouye-yekan, "Slot Antenna with Multiband Functionality in wireless Industrial Applications", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 7, pp. 1653-1655, July 2015. DOI: 10.1002/mop.29150
- [13] T. Sedghi, S. Shafei, A. Kalami, and T. Aribi, "Small Monopole Antenna for IEEE 802.11 a and X-Bands Applications Using Modified CBP Structure," *Wireless Personal Communications*, vol. 80, no. 2, pp. 859-865, January 2015. DOI: 10.1007/s11277-014-2045-z
- [14] T. Sedghichongaralouye-Yekan, R. A. Sadeghzadeh, and M. Naser-Moghadasi, "Microstrip-fed Circularly Polarized Antenna array using Semi-fractal Cells for Implicational Band", *IETE Journal of Research*, vol. 60, no. 6, pp. 383-388, November, 2014. DOI: 10.1080/03772063.2014.901484
- [15] M. Jalali, T. Sedghi, and S. Shafei, "Dual-band Antenna fed with CPW Technology using Modified Mirrored L-shaped Conductor-Back Plane", *Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 2, pp. 881-887, September, 2014. DOI: 10.1007/s11277-014-1789-9
- [16] Mahdi Jalali, Mohammad Naser-Moghadasi and Ramezan Ali Sadeghzadeh, "Dual Circularly Polarized Multilayer MIMO antenna array with an Enhanced SR-feeding Network for C-band Application", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 9 (8), 1741-1748, October 2017. DOI: 10.1017/S1759078717000435