

طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن هوشمند با پوشش فضایی گسترده و دارای ساخت ساده و ارزان به منظور استفاده در سیستم های بیسیم

تاریخ دریافت:

۲۸ آبان ماه ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۹ دیماه ۱۴۰۱

امیرمهدی سازدار^۱، احسان شریفی^{۲*}، اسماعیل زارع زاده^۳

۱. استادیار دانشکده رایانه، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲. دکترای کامپیوتر، دانشکده رایانه، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳. استادیار دانشکده برق، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، یک آنتن هوشمند با پوشش فضایی گسترده طراحی، شبیه سازی و ساخته می شود. این آنتن دارای ساختی ارزان و ساده و دارای فرکانس کاری $4/2$ GHz است که از آن می توان در سیستم های بیسیم استفاده نمود. این آنتن از یک زیرلایه FR4 تشکیل شده است، این زیرلایه شامل یک ماتریس باتلر مسطح 4×4 و یک آرایه آنتن میکرواستریپ مسطح 4×1 است. این آنتن دارای چهار الگوی تابشی مشخص در راستاهای $\pm 15^\circ$ و $\pm 58^\circ$ درجه است که می توان الگوی تابش شده از آنتن را به هر یک از این چهار الگو سوئیچ نمود. مزیت اصلی آنتن طراحی شده در مقایسه با سایر آنتن های هوشمند دارای یک یا چند زیرلایه، زاویه پوشش فضایی آن برابر با 154° درجه است و همچنین از ویژگی های این آنتن، ساخت ساده و کم هزینه، وزن پایین و رخنمون باریک آن است. این آنتن دارای چهار دهانه ورودی و دارای ساختاری متقارن است، با تحریک دو دهانه متقارن از این دهانه های ورودی، پهنای باند آنتن برابر 19.4% و با تحریک دو دهانه متقارن دیگر، پهنای باند آن برابر 11.0% مشاهده می شود. از بهینه سازی توسط نرم افزار CST در تمام مراحل طراحی ماتریس باتلر و آنتن میکرواستریپ استفاده شده است. آنتن هوشمند به منظور بررسی بهتر عملکرد آن، ساخته شده و ویژگی های آن در آزمایشگاه مورد اندازه گیری قرار می گیرد، نتایج اندازه گیری شده با نتایج شبیه سازی شده به یکدیگر نزدیک هستند.

واژه های کلیدی: آنتن هوشمند، ماتریس باتلر، شکل دهی پرتو، الگوی تابش چندگانه، پوشش فضایی گسترده

Design, Simulation and Fabrication of Smart Antenna with Wide Spatial Coverage and Low Cost and Easy Fabrication for Use in Wireless Systems

Abstract

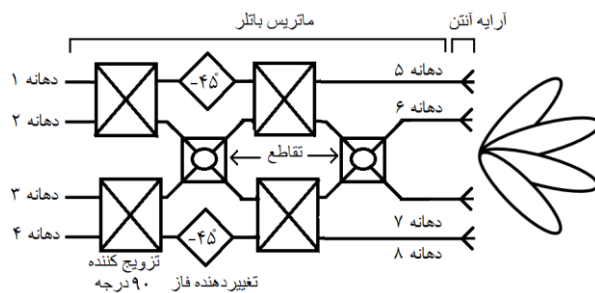
In this paper, a smart antenna with wide spatial coverage is designed, simulated and fabricated. This antenna is low-cost and easy fabrication with the operating frequency of 2.4 GHz that can be used in wireless systems. This antenna consists of single FR4 substrate, this substrate consists of planar 4×4 Butler Matrix and 1×4 microstrip planar array antenna. This antenna has determined specific four radiation patterns in the directions ± 15 degree and ± 58 degree that its radiation pattern can be switched to each of these four radiation patterns. The main advantage of designed antenna in compare with other smart antennas are implemented on a single substrare or multilayer substrates, degree of spatial coverage is 154 and also features of this antenna are simple and low cost fabrication, low weight and low lrofile. This antenna has four input and symmetrical structure, with two symmetrical input ports excitioan, antenna's bandwidth is equal to 19.4% and with other two symmetrical input ports excitioan, antenna's bandwidth is equal to 11.0%. Optimization by CST software has been used in all steps of Butler matrix design and microstrip antenna. Smart antenna is fabricated to better evaluate its performance and its feature is measured in laboratory, the results of this measurement are close to that of the simulation ones.

Key words: Smart Antenna, Butler Matrix, Beamforming, Radiation Pattern Diversity, Wide Spatial Coverage

آنتن هوشمند متشکل از آنتن میکرواستریپ و یک ماتریس باتلر 4×4 به صورت گام به گام طراحی می‌شوند. در بخش چهارم، آنتن هوشمند شبیه‌سازی شده و عملکرد آن بررسی می‌شود. همچنین این آنتن جهت ارزیابی بیشتر مورد تست آزمایشگاهی قرار می‌گیرد. در انتها نیز آنتن با سایر آنتن‌های مشابه مقایسه شده و در بخش پنجم جمع‌بندی ارائه می‌شود.

۲- مفاهیم اساسی در ایجاد الگوی تابش چندگانه با استفاده از ماتریس باتلر

نمودار بلوکی آنتن هوشمند مطرح شده در این مقاله، در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ - بلوک دیاگرام آنتن هوشمند تشکیل شده از آرایه آنتن و ماتریس باتلر

این آنتن هوشمند شامل یک آرایه‌ی آنتن میکرواستریپ 1×4 است که توسط یک ماتریس باتلر 4×4 تغذیه می‌شود. مطابق با این شکل، با تحریک هریک از چهار دهانه ورودی آنتن هوشمند، یک الگوی تابش مختص به همان دهانه‌ی تحریک شده تشکیل می‌شود. در صورتی که تحریک یک دهانه‌ی ورودی متوقف شده و دهانه‌ی ورودی دیگری تحریک شود، الگوی تابش شده از آنتن نیز به الگوی تابشی دیگری، سوئیچ می‌شود [۱۶]. در یک ماتریس باتلر 4×4 مطابق با شکل ۱، سیگنال ورودی به هریک از چهار دهانه‌ی ورودی، به چهار دهانه‌ی خروجی انتقال داده می‌شود. دامنه‌ی سیگنال‌های خروجی با یکدیگر برابر است و همچنین توزیع فاز آن‌ها نیز مطابق با جدول ۱ صورت می‌گیرد. وابسته به تحریک هر یک از دهانه‌های ورودی ماتریس باتلر، اختلاف فاز بین دهانه‌های خروجی مطابق با جدول ۱ برابر با مقادیر ۴۵ درجه، ۱۳۵- درجه، ۱۳۵ درجه و ۴۵ درجه است [۱۶].

طبق رابطه (۱) می‌توان فاکتور آرایه‌ی نرمالیزه شده^{۱۲} برای آرایه‌ی آنتن مشخص شده در شکل ۱ را محاسبه نمود [۱۷]. در این آرایه، فاصله‌ی المان‌ها از یکدیگر برابر است و اختلاف فاز بین آن‌ها نیز ثابت است.

در سیستم‌های بیسیم که در آن‌ها از آنتن‌هایی با الگوی تابش همه سو یکسان^۱ استفاده می‌شود، مشکلاتی مانند امنیت نامناسب و اتلاف بهره^۲ وجود دارد. برای رفع این مشکلات لازم است که از آنتن‌های دارای الگوی تابش چندگانه^۳ استفاده شود. این آنتن‌ها دارای تعدادی الگوی تابش مشخص هستند و قابلیت تغییر از یک الگو به الگوی دیگر را دارند. از جمله مزایای استفاده از این آنتن‌ها، افزایش نسبت سیگنال به نویز^۴ (SNR)، کاهش تداخل، افزایش ظرفیت کانال، کاهش اتلاف بهره و افزایش امنیت سیستم است. برای دستیابی به الگوی تابش چندگانه، امکان استفاده از آنتن‌های آرایه‌ی فازی و آنتن‌های شکل‌دهنده پرتو دیجیتال^۵ وجود دارد، اما به‌کارگیری این آنتن‌ها دارای مشکل حجم بالای آنتن و ساخت پرهزینه است. به منظور برطرف نمودن این مشکلات، از آنتن‌های هوشمندی که دارای حجم کم و ساخت کم‌هزینه هستند، استفاده می‌شود [۴-۱].

آنتن‌های هوشمند با هزینه ساخت پایین، بر پایه‌ی استفاده از فناوری‌های گوناگونی مانند سطح انتخاب‌گر فرکانس^۶ (FSS)، سیستم چند ورودی-چند خروجی^۷ (MIMO)، آرایه بازتابنده و لنز روتمن طراحی می‌شوند. یکی از فناوری‌های مورد توجه در طراحی آنتن‌های هوشمند ارزان، استفاده از ماتریس باتلر^۸ است [۵]. رویکردهای متفاوتی در استفاده از ماتریس باتلر در آنتن‌های هوشمند وجود دارد، این رویکردها شامل موج‌بر مجتمع شده در زیرلایه^۹ (SIW) [۶]، ساختارهای چندلایه [۷]، ماتریس باتلر دارای عناصر فعال [۸] و ماتریس باتلر بازتابنده [۹] است. ماتریس باتلر مسطح^{۱۰} دارای یک زیرلایه، به دلیل آسان بودن طراحی، ساخت کم‌هزینه و رخنمون باریک^{۱۱}، مورد توجه پژوهشگران واقع شده است [۱۲-۱۰].

در فرکانس ۲/۴ GHz و فرکانس‌های نزدیک به آن، آنتن‌های هوشمند طراحی شده با استفاده از ماتریس باتلر مسطح دارای یک زیرلایه، دارای الگوی تابش با پوشش فضایی محدود هستند که در ادامه چند نمونه از آنها مطرح می‌شوند. الگوی تابش شده از آنتن هوشمند ارائه شده در [۱۳] دارای چهار پرتو در زوایای $\pm 12^\circ$ درجه و $\pm 40^\circ$ درجه است و زاویه پوشش فضایی آن نزدیک به 100° درجه است. همچنین دو آنتن دیگر با استفاده از این فناوری در فرکانس ۲/۴ GHz مطرح شده‌اند که زاویه پوشش فضایی یکی از آن‌ها، کمتر از 60° درجه [۱۴] و زاویه پوشش فضایی دیگری نزدیک به 100° درجه است [۱۵]. در این مقاله برای بهبود این مشکل، یک آنتن طراحی و ساخته می‌شود که دارای پوشش فضایی گسترده‌ای بوده و سایر پارامترهای آن نیز مناسب باشد. این آنتن بر پایه استفاده از یک زیرلایه طراحی می‌شود. در بخش دوم این مقاله، مبانی طراحی آنتن هوشمند با استفاده از ماتریس باتلر بیان می‌شود. در بخش سوم، قسمت‌های مختلف این

⁷ Multiple Input Multiple Output

⁸ Butler Matrix

⁹ Substrate Integrated Waveguide

¹⁰ Planar Butler Matrix

¹¹ Low Profile

¹² Normalized Array Factor

¹ Omnidirectional Antenna

² Gain

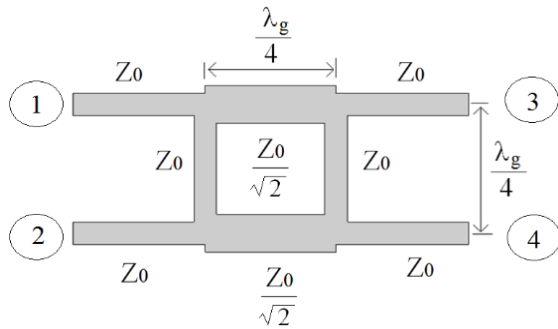
³ Radiation Pattern Diversity

⁴ Signal to Noise Ratio

⁵ Digital Beamforming

⁶ Frequency Selective Surface

خروجی وجود دارد و همچنین توان این دو سیگنال خروجی، برابر با نصف توان سیگنال ورودی است.

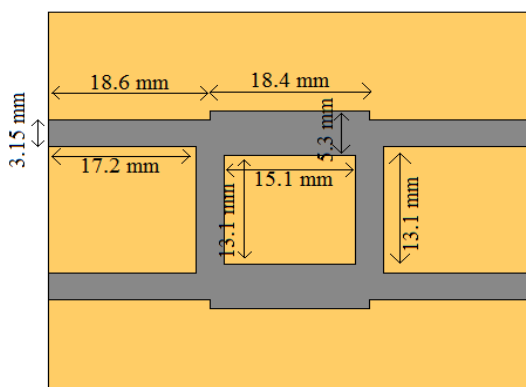


شکل ۲ - ساختار توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه

در شکل ۲، مقدار امپدانس مشخصه هر قسمت و اندازه طول موج در این ساختار به ترتیب با نماد Z_0 و λ_g نشان داده شده است و مقدار Z_0 برابر 50Ω در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۳) بیانگر ماتریس پراکنندگی این توزیع کننده است [۱۹].

$$S = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & j \\ 0 & 0 & j & 1 \\ 1 & j & 0 & 0 \\ j & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در شکل ۳ ساختار طراحی شده و شبیه‌سازی شده‌ی توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه نشان داده شده است. مطابق با شکل ۴-الف، اندازه‌ی پارامترهای S_{11} و S_{41} از فرکانس ۲/۰۵ GHz تا فرکانس ۳ GHz کمتر از ۱۰ dB است که این موضوع، بیانگر پهنای باند مناسب آنتن و همچنین ایزوله بودن دهانه‌ی ۴ است. در این شکل، اندازه پارامترهای S_{11} و S_{41} در فرکانس ۲/۴ GHz کمتر از ۳۰ dB است که بیانگر عملکرد مناسب این توزیع کننده در فرکانس کاری مورد نیاز است، همچنین اندازه پارامترهای S_{21} و S_{31} تقریباً برابر با ۱-۳ است که گویای تقسیم مساوی توان سیگنال ورودی از دهانه ۱ به دو دهانه خروجی است.



شکل ۳ - توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه طراحی شده و شبیه‌سازی شده

$$AF(\psi) = \frac{\sin(N\psi/2)}{N \sin(\psi/2)} \quad (1)$$

در رابطه فوق، N برابر با تعداد المان‌های آرایه و ψ نیز طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\psi = kd \cos(\theta) + \alpha \quad (2)$$

در این رابطه، k برابر با عدد موج^۱، d فاصله بین المان‌ها، α اختلاف فاز بین المان‌ها و θ برابر با زاویه بین محور آنتن و بیم اصلی^۲ است.

جدول ۱ - نحوه توزیع فاز در دهانه‌های خروجی ماتریس باتلر ۴×۴

فاز سیگنال در دهانه‌های خروجی (درجه)	دهانه ورودی تحریک شده			
	دهانه ۱	دهانه ۲	دهانه ۳	دهانه ۴
دهانه ۵	-۴۵	-۱۳۵	-۹۰	-۱۸۰
دهانه ۶	-۹۰	۰	-۲۲۵	-۱۳۵
دهانه ۷	-۱۳۵	-۲۲۵	۰	-۹۰
دهانه ۸	-۱۸۰	-۹۰	-۱۳۵	-۴۵
اختلاف فاز بین دهانه‌های خروجی	-۴۵	۱۳۵	-۱۳۵	۴۵

۳- طراحی و شبیه‌سازی ماتریس باتلر و آنتن میکرو

استریپ

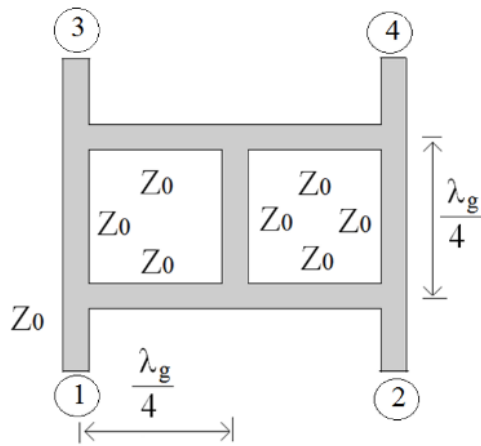
ماتریس باتلر ۴×۴ از چهار توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه^۳، دو تقاطع^۴ و دو تغییردهنده فاز^۵ تشکیل می‌شود [۱۸]. طراحی و شبیه‌سازی اجزای تشکیل دهنده ماتریس باتلر در ابتدای این بخش انجام می‌شود. در ادامه، با کنار یکدیگر قراردادن صحیح اجزای طراحی شده، ماتریس باتلر حاصل می‌شود و همچنین آنتن میکرواستریپ استفاده شده در آنتن هوشمند، طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. این طراحی‌ها با در نظر گرفتن یک زیرلایه FR4 به ضخامت ۱/۶ mm و فرکانس کاری ۲/۴ GHz صورت می‌گیرد. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST است و به منظور عملکرد بهتر المان‌های طراحی شده، ابعاد تمامی آن‌ها با استفاده از این نرم‌افزار، بهینه‌سازی می‌شوند.

۳-۱- توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه

توزیع کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه یکی از المان‌های استفاده شده در سیستم‌های مایکروویو است. در شکل ۲ ساختار این توزیع کننده نمایش داده شده است. این المان دارای دو دهانه ورودی و دو دهانه خروجی است و سیگنال وارد شده به هر یک از دهانه‌های ورودی به دو دهانه خروجی انتقال داده می‌شود. اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دو سیگنال

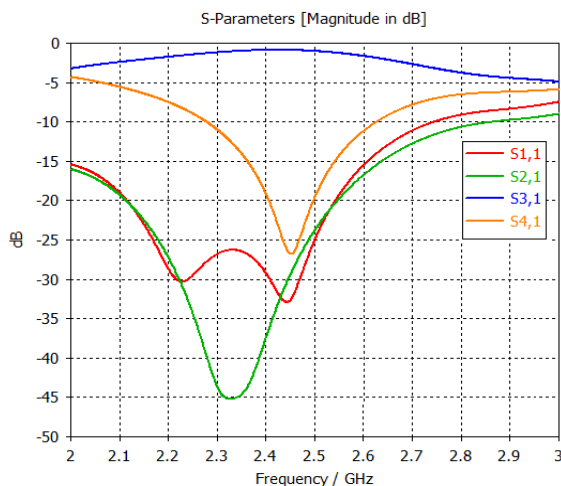
⁴ Crossover
⁵ Phase Shifter

¹ Wave Number
² Main Beam
³ Quadrature Hybrid Couple



شکل ۵ - ساختار تقاطع

همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اندازه پارامتر S_{11} در فرکانس $2/4$ GHz نزدیک به -29 dB است، این موضوع نشان‌دهنده تطبیق امپدانس مناسب در این فرکانس است و همچنین اندازه S_{31} نیز نزدیک به صفر dB است که به معنای انتقال تقریبی تمام توان سیگنال ورودی از دهانه ۱ به دهانه ۳ است. به علت تلفات زیرلایه‌ی FR4 مقداری از توان ورودی از زیرلایه از بین رفته و اندازه S_{31} دقیقاً برابر با صفر dB نمی‌شود. همچنین در فرکانس $2/4$ GHz، اندازه S_{41} و S_{11} کمتر از -25 dB است که گویای ایزوله بودن دهانه ۱ نسبت به دهانه ۲ و دهانه ۴ است.

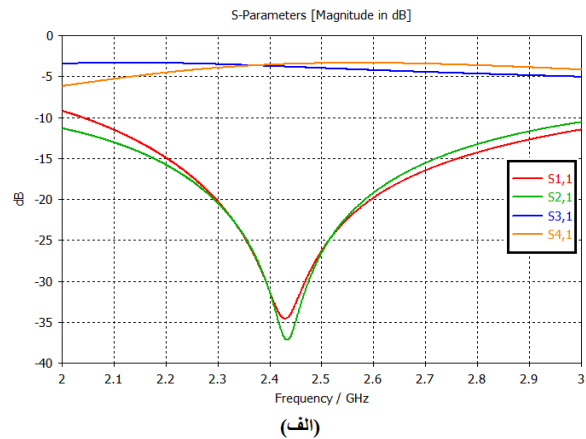


شکل ۶ - نتایج شبیه‌سازی شده اندازه پارامترهای پراکندگی تقاطع

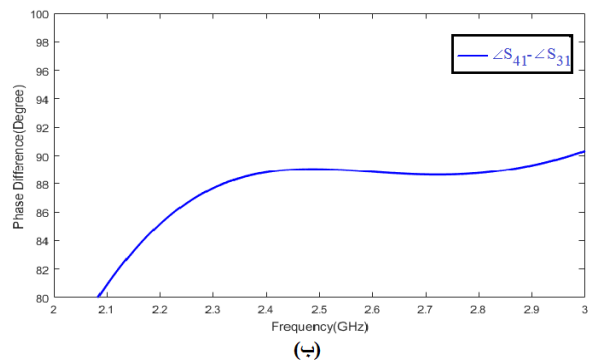
۳-۳- تغییردهنده فاز

تغییردهنده‌ی فاز، یکی از المان‌های استفاده شده در ماتریس باتلر است. برای طراحی تغییردهنده فاز از محاسبه‌ی اختلاف فاز ایجاد شده در خط انتقال میکرواستریپ استفاده می‌شود، به این منظور، یک خط انتقال میکرواستریپ به طول (L) ، عرض (W) ، ارتفاع زیرلایه (h) و ثابت دی‌الکتریک زیرلایه (ϵ_r) در نظر گرفته می‌شود و تغییر فاز صورت گرفته در آن طبق رابطه (5) محاسبه می‌شود. در این رابطه، مقدار

باتوجه به تلفات زیرلایه‌ی FR4 انتظار می‌رود که توان خروجی از دهانه ۳ و دهانه ۴ اندکی کمتر از -3 dB باشد که این افت اندک در خروجی‌ها قابل مشاهده است. مطابق با شکل ۴-ب اختلاف فاز 89° درجه بین دو دهانه خروجی مشاهده می‌شود که این مقدار اختلاف فاز، بسیار نزدیک به مقدار مورد انتظار اختلاف فاز 90° درجه است. عملکرد این تزویج کننده مطابق با عملکرد مورد انتظار است.



(الف)



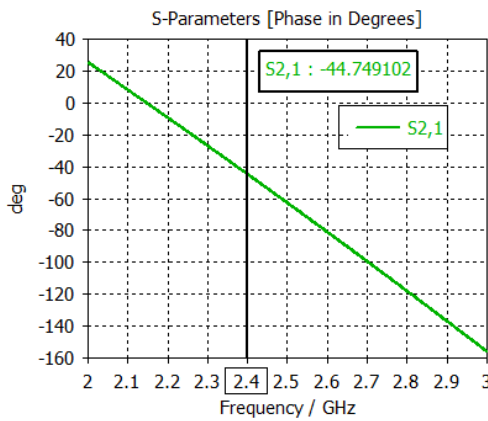
(ب)

شکل ۴ - نتایج شبیه‌سازی تزویج کننده شاخه‌ای 90° درجه: (الف) پارامترهای پراکندگی، (ب) اختلاف فاز دهانه‌های خروجی شماره ۴ و شماره ۳

۳-۲- تقاطع

تقاطع به‌عنوان تزویج کننده صفر dB شناخته می‌شود و در شکل ۵ ساختار یک تقاطع نشان داده شده است. این ساختار دارای دو دهانه ورودی و دو دهانه خروجی است. در این شکل با تحریک دهانه ۱، سیگنال ورودی از دهانه ۱ به دهانه ۳ منتقل شده و همچنین دهانه ۱ نسبت به دهانه ۲ و دهانه ۴ ایزوله است. رابطه (4) بیانگر ماتریس پراکندگی تقاطع است. برای ایجاد ساختار تقاطع، دو تزویج کننده‌ی شاخه‌ای 90° درجه که تغییرات جزئی در آن‌ها اعمال شده است به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند [۲۰]. مطابق با شکل ۵ ساختار تقاطع، طراحی و شبیه‌سازی می‌شود.

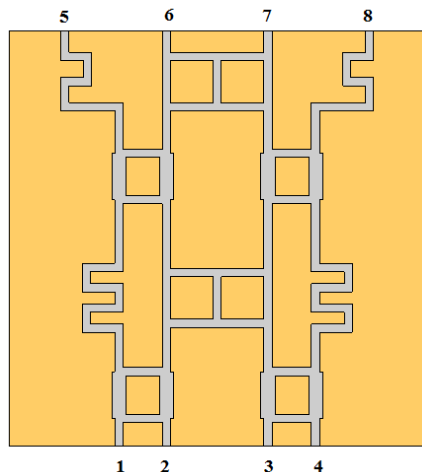
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & j \\ 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \\ j & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$



شکل ۹- نتیجه شبیه‌سازی شده تغییر فاز صورت گرفته در تغییردهنده فاز

۳-۴- ماتریس باتلر

با کنار یکدیگر قراردادن المان‌هایی که در قسمت‌های قبلی طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند، یک ماتریس باتلر مطابق با شکل ۱۰ طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی شده‌ی اندازه‌ی پارامترهای پراکنده‌ی ماتریس باتلر در حالت تحریک دهانه ۱ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. حداقل اندازه افت بازگشتی ۱۰ dB در باند فرکانسی از ۲/۲ GHz تا ۲/۹۱ GHz مشاهده می‌شود. با بررسی پارامترهای پراکنده‌ی این ساختار در حالت تحریک دهانه ۱ در فرکانس ۲/۴ GHz مطابق با شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که اندازه پارامترهای پراکنده‌ی در دهانه‌های خروجی ماتریس، از مقدار ۸ dB- تا ۹/۲ dB- متغیر است. این نتایج نشان می‌دهد که توان به صورت تقریباً یکسانی از دهانه ۱ به دهانه‌های خروجی منتقل می‌شود. اختلاف فاز شبیه‌سازی شده دهانه‌های خروجی در تحریک دهانه ۱ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



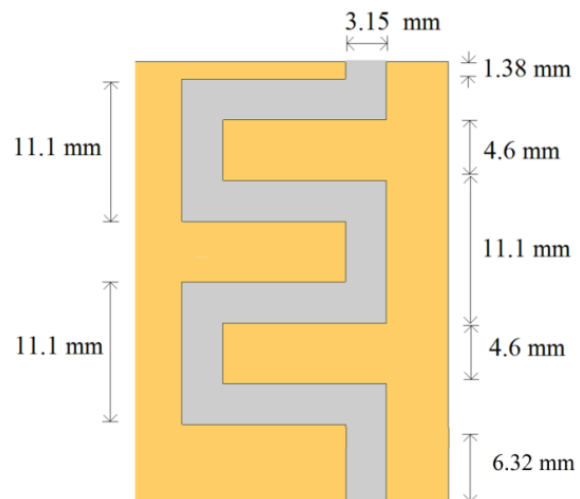
شکل ۱۰- ماتریس باتلر طراحی شده و شبیه‌سازی شده

λ_0 برابر با طول موج در فضای آزاد است و همچنین مقدار ثابت دی‌الکتریک مؤثر ϵ_e نیز طبق رابطه (۶) به دست می‌آید [۲۱-۲۲].

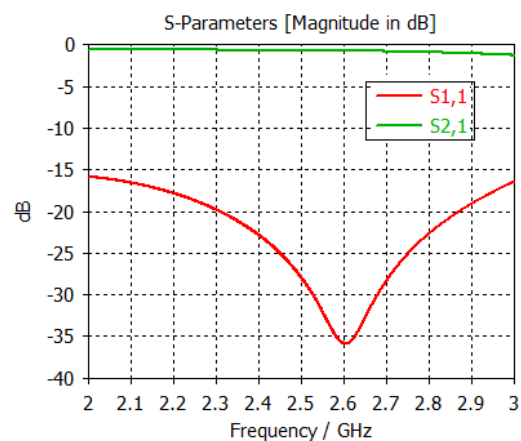
$$\phi = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_e} l}{\lambda_0} \quad (5)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r - 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \quad \frac{W}{h} > 1 \quad (6)$$

در ماتریس باتلر استفاده شده در این مقاله، یک تغییردهنده‌ی فاز برای ایجاد تأخیر فاز ۴۵ درجه نسبت به فاز سیگنال خارج شده از تقاطع موردنیاز است. تغییردهنده‌ی فاز شبیه‌سازی در شکل ۷ نمایش داده شده است. مقادیر پارامتر پراکنده‌ی و تغییر فاز صورت گرفته در تغییردهنده فاز به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ نمایش داده شده است. تغییر فاز صورت گرفته و افت بازگشتی در فرکانس ۲/۴ GHz به ترتیب برابر با ۴۴/۷ درجه و ۱۷/۹ dB مشاهده می‌شوند که این مقادیر مطلوب هستند.



شکل ۷- تغییردهنده فاز طراحی شده شبیه‌سازی شده

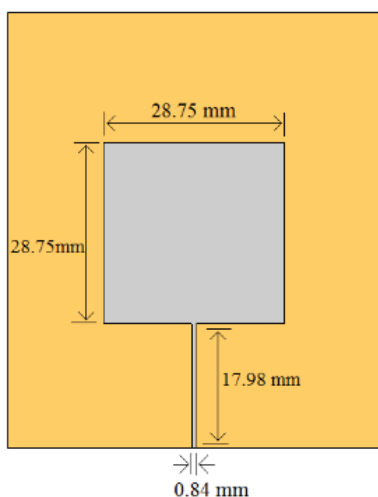


شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی شده اندازه پارامترهای پراکنده‌ی تغییردهنده فاز

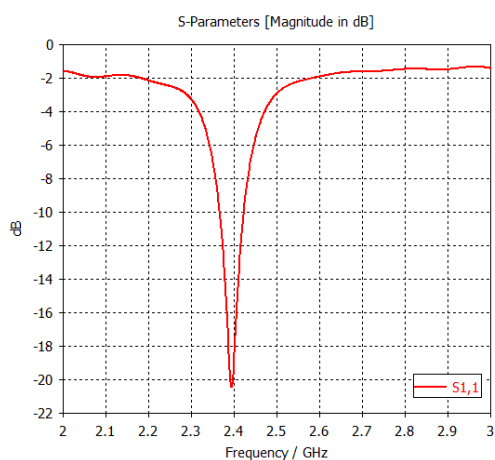
حالت تحریک دهانه ۱ و دهانه ۲ به ترتیب با تحریک دهانه ۳ و دهانه ۴ یکسان است. در حالت تحریک دهانه ۲ نیز اندازه و فاز پارامترهای پراکندگی نزدیک به مقدار مورد انتظار است. این ماتریس باتلر دارای عملکرد مناسبی است.

۳-۵- آنتن پیچ

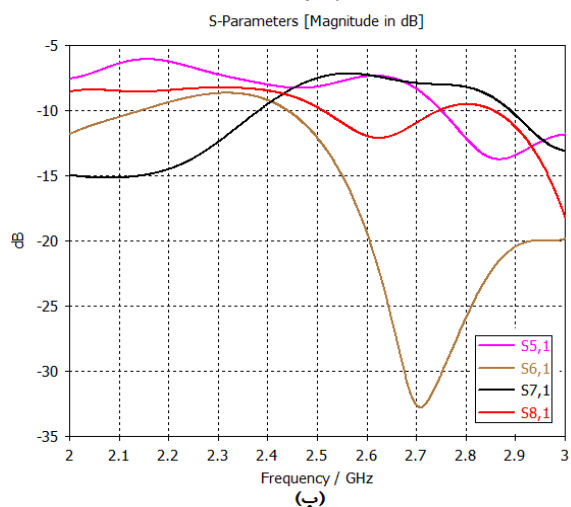
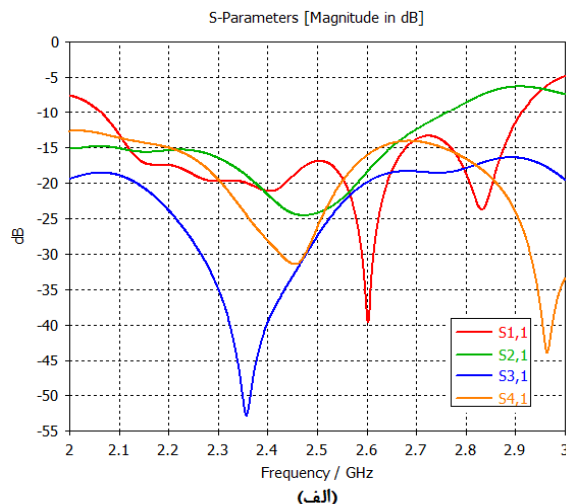
در این پژوهش یک آنتن پیچ مربعی شکل نیز طراحی و شبیه‌سازی می‌شود تا از آن به منظور ایجاد یک آرایه‌ی آنتن میکرواستریپ استفاده شود. برای طراحی این آنتن پیچ، از مدل خط انتقال مطرح شده در [۲۳] استفاده می‌شود. در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب آنتن پیچ شبیه‌سازی شده و مقدار افت بازگشتی شبیه‌سازی شده آن نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که افت بازگشتی در فرکانس $4/2$ GHz برابر با 20 dB است. در شکل ۱۵ الگوی تابش سه‌بعدی آنتن در فرکانس $4/2$ GHz نمایش داده شده است که راستاوری، بهره راستاوری و بهره شبیه‌سازی شده آن به ترتیب برابر با 55/6 dBi و 86/2 dB است. تفاوت مقدار بهره و راستاوری به دلیل تلفات بالای FR4 است.



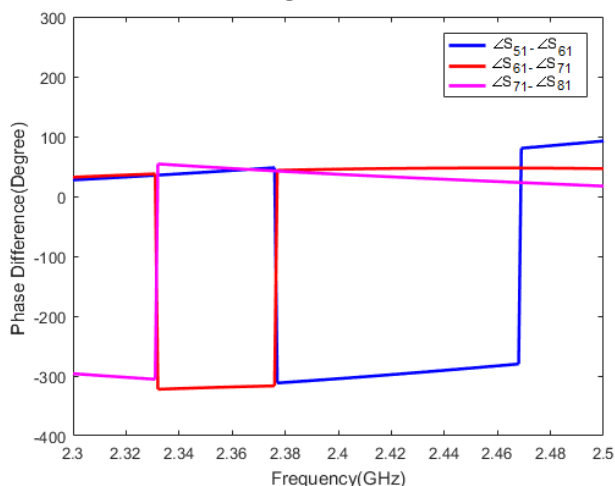
شکل ۱۳- آنتن پیچ مربعی شکل طراحی شده و شبیه‌سازی شده



شکل ۱۴ - مقدار افت بازگشتی شبیه‌سازی شده در آنتن پیچ

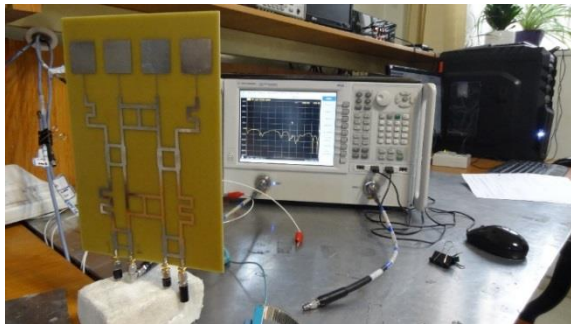


شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی شده اندازه پارامترهای پراکندگی ماتریس باتلر در حالت تحریک دهانه ۱: (الف) پارامترهای پراکندگی در دهانه‌های ورودی، (ب) پارامترهای پراکندگی در دهانه‌های خروجی

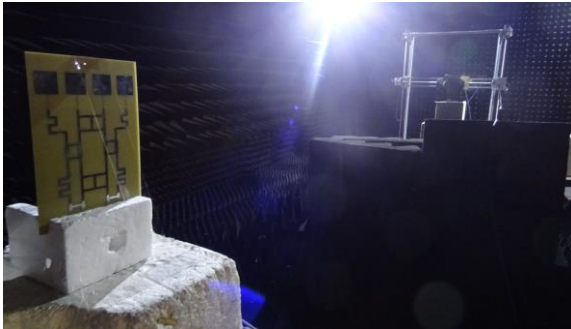


شکل ۱۲ - نتایج شبیه‌سازی شده اختلاف فاز پارامترهای پراکندگی دهانه‌های خروجی ماتریس باتلر در حالت تحریک دهانه ۱

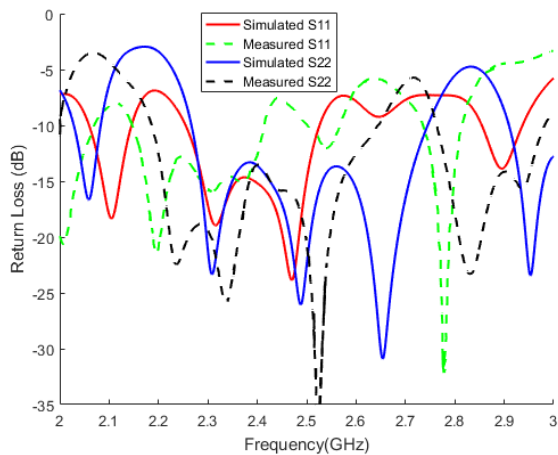
این مقادیر به مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک هستند. باتوجه‌به تقارن موجود در ماتریس باتلر، نتایج شبیه‌سازی شده این ساختار در



شکل ۱۷ - اندازه‌گیری افت بازگشتی آنتن هوشمند ساخته شده در آزمایشگاه

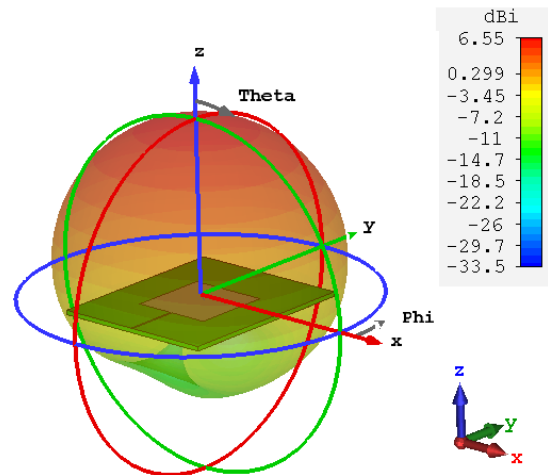


شکل ۱۸ - اندازه‌گیری الگوی تابشی آنتن هوشمند ساخته شده در آزمایشگاه



شکل ۱۹ - مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری افت بازگشتی آنتن هوشمند ساخته شده در آزمایشگاه با تحریک دهانه ۱ و دهانه ۲

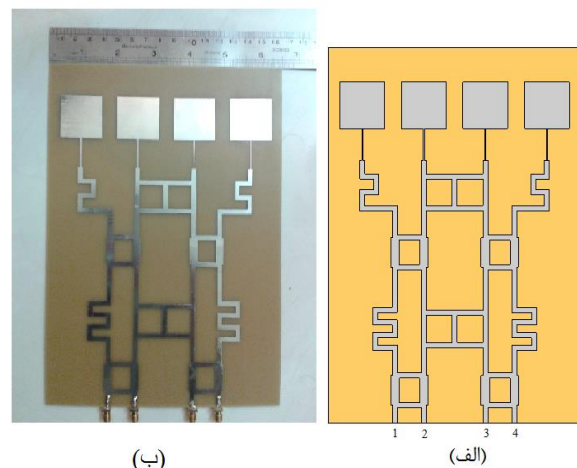
نتایج مشاهده شده در اندازه‌گیری و شبیه‌سازی دهانه‌ی ۱ و دهانه‌ی ۲ با توجه به ساختار متقارن این آنتن، بادقت خوبی قابل تعمیم به نتایج تحریک دهانه‌ی ۳ و دهانه‌ی ۴ هستند. در شکل ۱۹ نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری افت بازگشتی آنتن در حالت تحریک دهانه‌ی ۱ و دهانه‌ی ۲ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در فرکانس $4/2$ GHz با تحریک دهانه ۱ و دهانه ۲، افت بازگشتی به ترتیب برابر با $97/11$ dB و $46/13$ dB اندازه‌گیری می‌شود. افت بازگشتی بیش از 10 dB در حالت تحریک دهانه‌ی ۱ از فرکانس



شکل ۱۵ - الگوی تابش سه‌بعدی شبیه‌سازی شده آنتن پیچ طراحی شده

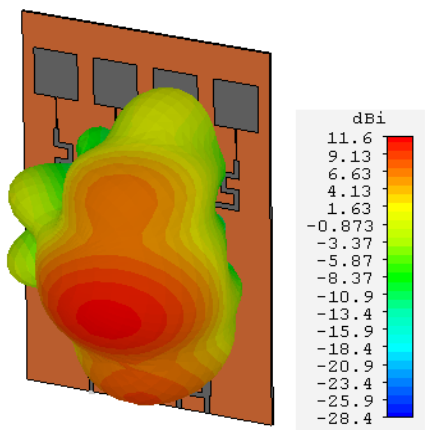
۴- شبیه‌سازی و ساخت آنتن هوشمند

با کنار یکدیگر قراردادن چهار آنتن پیچ که در بخش قبلی شبیه‌سازی شده‌اند، یک آرایه آنتن متشکل از 4×1 المان تشکیل می‌شود. با اتصال این آرایه آنتن به ماتریس باتلر طراحی شده، آنتن هوشمند ایجاد می‌شود. این آنتن بر پایه استفاده از یک زیرلایه FR4 طراحی شده است. در شکل ۱۶-الف و شکل ۱۶-ب به ترتیب آنتن هوشمند در دو وضعیت شبیه‌سازی شده و ساخته شده نشان داده شده است. ابعاد این آنتن برابر با 164×235 mm معادل $88/1 \times 31/1 \lambda$ است.

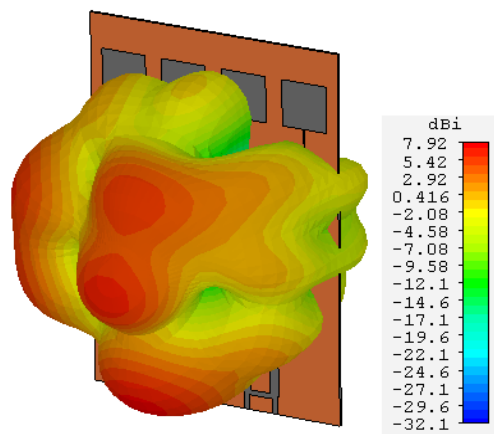


شکل ۱۶ - آنتن هوشمند طراحی شده: (الف) نمونه شبیه‌سازی شده (ب) نمونه ساخته شده

در حالتی که هریک از دهانه‌های شماره ۱ و شماره ۲ تحریک شده‌اند، پارامترهای آنتن هوشمند در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شوند. در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ به ترتیب اندازه‌گیری افت بازگشتی و اندازه‌گیری الگوی تابشی آنتن را در آزمایشگاه محیط‌های پیچیده دانشگاه علم و صنعت نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲۰ - الگوی سه بعدی تابش آنتن هوشمند شبیه سازی شده در فرکانس 4/2 GHz: (الف) در حالت تحریک دهانه ۱ (ب) در حالت تحریک دهانه ۲

GHz 15/2 تا GHz 41/2 و با تحریک دهانه‌ی ۲ از فرکانس GHz 18/2 تا GHz 64/2 اندازه‌گیری می‌شود. نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی پارامترهای پراکندگی، مناسب بوده و در اکثر فرکانس‌ها به یکدیگر نزدیک هستند. به دلیل نامشخص بودن مقدار دقیق ضریب دی‌الکتریک زیرلایه‌ی FR4 در بعضی از فرکانس‌ها، نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقداری با یکدیگر متفاوت هستند. الگوی تابش سه‌بعدی آنتن بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده در فرکانس GHz ۲/۴ در دو حالت تحریک دهانه ۱ و تحریک دهانه ۲ به ترتیب در شکل ۲۰-الف و شکل ۲۰-ب نشان داده شده است. در شکل ۲۱ الگوی شبیه‌سازی شده‌ی دوبعدی آنتن با در نظر گرفتن تحریک هر یک از چهار دهانه‌ی ورودی آن در فرکانس GHz ۲/۴ را نمایش می‌دهد. طبق نتایج شبیه‌سازی شده در تحریک دهانه‌ی ۱، راستاوری و بهره به ترتیب برابر ۱۱/۶۰ dBi و ۶/۱۷ dBi است، همچنین با تحریک دهانه‌ی ۲ مقادیر راستاوری و بهره به ترتیب برابر با ۷/۹۲ dBi و ۲/۳۵ dBi است. با در نظر گرفتن تلفات بالای زیرلایه‌ی FR4 و ابعاد فیزیکی گسترده‌ی ساختار که برابر با ۱۶۴ mm × ۲۳۵ mm است، می‌توان کاهش بهره را نسبت به راستاوری انتظار داشت. با توجه به موضوع تلفات بالای زیرلایه‌ی استفاده شده، آنتن دارای بهره و راستاوری مناسبی است. در شکل ۲۲ الگوی تابش دوبعدی آنتن در دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی بهره آنتن، زاویه بیم اصلی و زاویه پهنای نیم توان به ترتیب برابر با 1/4 dBi، ۵۸ درجه و ۴۶ درجه است. همچنین زاویه

جدول ۲ - مقایسه آنتن پیشنهادی با سایر آنتن‌های هوشمند دارای یک زیرلایه یا چند زیرلایه مطرح شده در فرکانس ۲/۴ GHz

مرجع	فرکانس کاری (GHz)	تعداد زیر لایه	زوایای بیم اصلی (درجه)	زاویه گستردگی پوشش فضایی (درجه)	ابعاد (λ)	بهره (dBi)	افت بازگشتی (dB)	درصد پهنای باند نسبی (%)
[۱۴]	۲/۴	۱	۵،۱۳ -۹،-۲	۳۲	-	-	-	-
[۲۴]	۲/۴	۲	۲۰± ۴۰±	۱۱۴	۲/۰۸×۲/۲۴	۶/۱ ۳/۹	۱۲ ۱۲/۷	۸/۶ ۴/۲
[۲۵]	۲/۴	۳	۱۵± ۴۲±	۸۸	۱/۷۳×۱/۵۳	۶ ۷	۳۰ ۲۶	۴۶/۳ ۴۵/۱
[۲۶]	۲/۴	۱	۱۶± ۴۵±	۱۲۴	۱/۳۶×۱/۱۴	-	۱۷ ۲۳	۱۴ ۱۰
[۲۷]	۲/۴	۱	۱۴± ۳۹±	۹۶	۲/۰۹×۱/۴۸	۲ ۵/۱	-	-
این مقاله	۲/۴	۱	۱۵± ۵۸±	۱۵۴	۱/۳۱×۱/۸۸	۴/۱ ۲/۷	۱۲ ۱۳/۴	۱۱/۴ ۱۹/۰

دو دهانه، پهنای باند برابر با ۱۹/۴٪ و با تحریک دو دهانه‌ی دیگر برابر با ۱۱/۰٪ است. این آنتن هوشمند، شبیه‌سازی و ساخته شده و مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است. همچنین این آنتن در جدول ۲ با سایر آنتن‌های هوشمند دارای یک زیرلایه یا چند زیرلایه مطرح شده در فرکانس ۲/۴ GHz مقایسه شده است. نتایج مقایسه بیان می‌کند که آنتن طراحی شده علاوه بر اینکه دارای پوشش فضایی گسترده‌تری نسبت به سایر آنتن‌ها است، دارای پارامترهای افت بازگشتی، درصد پهنای باند، بهره و ابعاد آنتن مناسبی است.

۶- مراجع

[1] H. L. Bachman, "Smart antennas-the practical realities," In 1997 IEEE Aerospace Conference, Vol. 1, pp. 63-70, IEEE, 1997.

[2] Z. Mousavirazi, V. Rafiei, and T. A. Denidni. "Beam-Switching antenna array with dual-circular-polarized operation for WiMAX applications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 137, no. 3, pp.153-164, 2021.

[3] S. Luo, Z. Zhang, S. Wang, S. Zhang, J. Dai, X. Bu, and J. An, "Network for hypersonic UCAV swarms," *Science China Information Sciences*, Vol. 63, no. 4, pp. 1-28, 2020.

[4] A. H. Daronkola, S. Chamani, and Y. Qane, "Design and Construction of Smart Antennas to Improve the Security of Communications Links," *journal of Advanced Defense Science and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 329-350, 2016.

[5] Q. Luo, S. Gao, W. Liu, and C. Gu, "Low-cost smart antenna," 1st edit, Wiley, 2019.

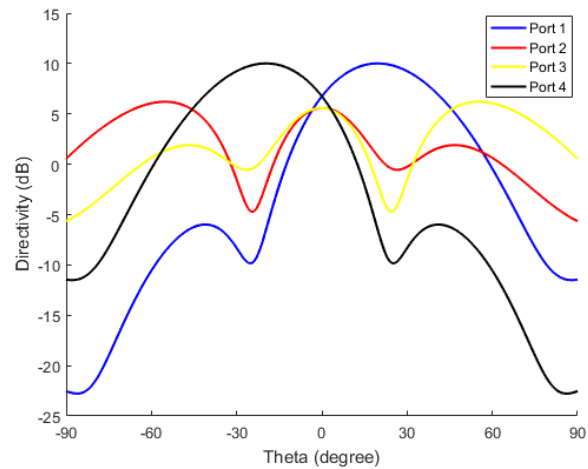
[6] B. D. Horwath and R. Abhari, "Characterization of a 4×4 substrate integrated waveguide Butler matrix at 60 GHz for two-dimensional beam steering," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no. 9, 2018.

[7] S. Gruszczynski, K. Wincza, and K. Sachse, "Compact broadband Butler matrix in multilayer technology for integrated multibeam antennas," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 11, pp. 635-636, 2007.

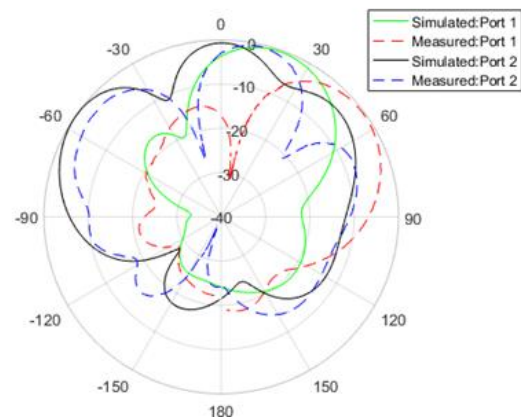
[8] T. A. Denidni, and M. Nedil, "Experimental investigation of a new Butler matrix using slotline technology for beamforming antenna arrays," *IET microwaves, antennas & propagation*, vol. 2, no. 7, pp. 641-649, 2008.

[9] J. Shelton, and J. Hsiao, "Reflective butler matrices," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 27, no. 5, pp. 651-659, 1979.

بیم اصلی، زاویه‌ی پهنای نیم توان و بهره‌ی اندازه‌گیری شده در تحریک دهانه‌ی ۲ به ترتیب برابر با ۱۵ درجه، ۳۲ درجه و ۲/۷ dBi است. زاویه پوشش‌دهی فضایی این آنتن نیز بر اساس نتایج اندازه‌گیری الگوی تابشی آنتن برابر با ۱۵۴ درجه است که مقدار مطلوبی است.



شکل ۲۱ - الگوی دوبعدی تابش آنتن هوشمند شبیه‌سازی شده در فرکانس 4/2 GHz با تحریک هر یک از چهار دهانه ورودی آنتن



شکل ۲۲ - مقایسه الگوی دوبعدی تابش آنتن هوشمند در دو

حالت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در فرکانس 4/2 GHz در دو حالت تحریک دهانه ۱ و تحریک دهانه ۲

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن هوشمند در فرکانس ۲/۴ GHz بر پایه استفاده از یک زیرلایه‌ی FR4 طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شد. ساختار این آنتن متشکل از آرایه آنتن میکرواستریپ و ماتریس باتلر است که هر دو قسمت با استفاده از این زیرلایه طراحی شده‌اند. آنتن دارای چهار پرتو اصلی در راستاهای ± ۱۵ درجه و ± ۵۸ درجه است که می‌تواند به هریک از این چهار پرتو سوئیچ نماید. بهبود اصلی صورت گرفته در این آنتن نسبت به سایر آنتن‌های هوشمند مشابه، پوشش فضایی گسترده آن است که برابر با ۱۵۴ درجه است. از دیگر ویژگی‌های آنتن می‌توان از ساخت ساده و ارزان، رخنمون باریک و وزن پایین آن نام برد. آنتن دارای چهار دهانه‌ی ورودی بوده که با تحریک

- [18] A.M. Zaidi, T. Khan, M. T. Beg, B. K. Kanaujia, and K. Rambabu, "Dual-Band Design Techniques for Microwave Passive Circuits: A Review and Applications," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 23, no. 7, pp. 61-77, 2022.
- [19] T. Jayachitra, V. K. Pandey, and A. Singh, "Design of Hybrid Coupler," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum*, vol. 3, no. 3, pp. 23-27, 2014.
- [20] J. Cheng, S. Liao, W. Feng, W. Che and Q. Xue, "Millimeter-Wave Wideband Wide-Angle Scanning Proactive Conformal Phased Array Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2022
- [21] D. M. Pozar, "Microwave engineering," 4th edit, Wiley, 2011.
- [22] I. Bahl, P. Bhartia , and S. Stuchly, "Design of microstrip antennas covered with a dielectric," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 30, no. 2, pp. 314-318, 1982.
- [23] C. A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design," 3rd edit, Wiley, 2015.
- [24] F.Y. Zulkifli, N. Chasanah , and E. T. Rahardjo, "Design of Butler matrix integrated with antenna array for beam forming," In international symposium on antennas and propagation (ISAP), pp. 1-4, 2015.
- [25] M. Fernandes, A. Bhandare , C. Dessai , and H. Virani, "A wideband switched beam patch antenna array for LTE and Wi-Fi," In 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON) , pp. 1-6, 2013.
- [26] M. Hanaoui, and M. Rifi, "Contribution to the Study of Beamforming at 2.4 GHz of a Smart Antenna Alimented by a 4× 4 Butler Matrix for Wireless Applications," In International Symposium on Ubiquitous Networking ,Springer, Cham , pp. 572-583, 2017.
- [27] S. Chamaani, and A. Rifi, ". Indoor On-body to Off-body Fading Mitigation Using Pattern Diversity," *Wireless Personal Communications*, vol. 90, no. 1, pp. 109-120, 2016.
- [10] I. I. Idrus, T. Abdul Latef, N. K. Aridas, M. S. Abu Talip, Y. Yamada, T. Abd Rahman, I. Adam, and M. N. Mohd Yasin, "A low-loss and compact single-layer butler matrix for a 5G base station antenna," *PloS one*, vol. 14, no. 12, 2019.
- [11] S. A. Babale, S. K. Rahim, O. A. Barro, M. Himdi, and M.Khalily, "Single Layered 4 × 4 Butler Matrix Without Phase- Shifters and Crossovers," *IEEE Access*, vol. 6, 2018.
- [12] M. Ikram, M. S. Sharawi, K. Klionovski, and A. Shamim, "A switched-beam millimeter-wave array with MIMO configuration for 5G applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 60, no. 4, pp. 915-920, 2018.
- [13] a H. Tran, G. R. Branner, and B.P. Kumar, "Optimized Microwave Multiport Beam-forming Circuit Design for Wideband Applications," *IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2019, pp. 949-952.
- [14] aH. Nawaz, and I. Tekin, "Ten switched-beams with 2× 2 series-fed 2.4 GHz array antenna and a simple beam-switching network," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 221-232, 2020
- [15] S. Kiehadrouinezhad, J. F. Bousquet, M. Cada, A. Shahabi, and M. A. Kiehadrouinezhad, "Analysis and Design of Different Methods to Reach Optimum Power in Butler Matrix," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 19-35, 2019.
- [16] S. Kim, S. Yoon, Y. Lee, and H. Shin, "Miniaturized Butler aaaaa Matrix Based Switched Beamforming Antenna System in a aaaaa Two-Layer Hybrid Stackup Substrate for 5G Applications," *Electronics*, vol. 8, no. 11, pp. 1232, 2019.
- [17] W. L. Stutzman, and G. A. Thiele, "Antenna theory and design," 3rd edit, Wiley, 2012.