



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Chebyshev Antenna Array Miniturization with Aperture Feeding based on Effective Neutralizing Line Design for Mutual Coupling Reduction

Elham Atashpanjeh ^a, Pejman Rezaei ^{b,*}

^{a,b} Electrical and Computer Engineering, Semnan University Faculty, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

Keywords:

PCB Antenna Array;
5G Applications;
Massive MIMO;
Mutual Coupling;
Chebyshev Distribution;
Neutralization Lines.

ABSTRACT

In this paper, an 1×8 linear array of printed circuit board antennas with a Chebyshev aperture distribution is designed and simulated for fifth-generation (5G) applications. The primary goal of this design is to reduce mutual coupling between array elements using neutralization lines. The design process is carried out in two stages. In the first stage, the antenna array is designed and simulated with specifications including a central frequency of 28 GHz, a sidelobe level of -20 dB, and dimensions of $45 \times 10.5 \times 1.55$ mm. In the second stage, after reducing the spacing between elements to half (1 mm) to compact the structure, neutralization lines are proposed to significantly reduce mutual coupling between the elements. These neutralization lines, placed between each element, substantially suppress unwanted surface currents responsible for mutual coupling. The dimensions of these lines are derived based on analytical equations. To validate the proposed design, simulations are conducted in two antenna analysis software environments, with the results confirming each other. The simulation results indicate that mutual coupling between adjacent elements is reduced to -29.76 dB. The bandwidth of the proposed structure is 3.09 GHz, ranging from 25.84 to 28.95 GHz, and the minimum mutual coupling between adjacent elements within this bandwidth is -32.84 dB. Additionally, the maximum gain of the antenna array is 8.92 dB. Finally, the efficiency of the proposed method is compared with other published research.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مقاله پژوهشی

* Corresponding author.

E-mail address: prezaei@semnan.ac.ir

How to cite this article:

فشرده سازی آرایه آنتن چبی شف با تغذیه روزنه با کاهش تزویج عناصر مبتنی بر طراحی خطوط خنثی ساز موثر

الهام آتش پنجه^۱، پژمان رضائی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: بازنگری مقاله: پذیرش مقاله:	در این مقاله، یک آرایه خطی 1×8 از آنتن های مدارچاپی با توزیع روزنه چبی شف برای کاربردهای نسل پنجم (5G) طراحی و شبیه سازی شده است. هدف اصلی این طراحی کاهش تزویج متقابل بین المان های آرایه با استفاده از خطوط خنثی ساز است. فرآیند طراحی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول، آرایه آنتن با مشخصاتی شامل فرکانس مرکزی ۲۸ گیگاهرتز، سطح گلبرگ کناری ۲۰- دسیبل، ابعاد $45 \times 10 / 5 \times 1 / 55$ میلی متر طراحی و شبیه سازی شده است. سپس در مرحله دوم پس از کاهش فواصل بین المان ها به نصف (یک میلی متر) به منظور فشرده سازی ساختار، خطوط خنثی ساز به گونه ای پیشنهاد می شود که تزویج متقابل بین المان ها به میزان قابل توجهی کاهش یابد. خطوط خنثی سازی که بین هر المان قرار گرفته اند، جریان های سطحی ناخواسته را که عامل تزویج متقابل هستند، به طور چشمگیری کاهش می دهند. ابعاد این خطوط بر اساس روابط تحلیلی استخراج شده اند. بدین ترتیب برای صحت سنجی، طراحی پیشنهادی، در محیط دو نرم افزار تحلیل آنتن شبیه سازی شده که نتایج حاصل از آن ها یکدیگر را تایید می کنند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تزویج متقابل بین المان های مجاور تا میزان ۲۹/۷۶- دسیبل کاهش یافته است. پهنای باند ساختار پیشنهادی ۳/۰۹ گیگاهرتز از فرکانس ۲۵/۸۴ تا ۲۸/۹۵ گیگاهرتز بوده و کمترین تزویج متقابل بین دو المان مجاور در پهنای باند مذکور ۳۲/۸۴- دسیبل است. همچنین بیشینه بهره آرایه آنتن ۸/۹۲ بدست آمده است. در انتها، کارایی روش پیشنهادی با سایر تحقیقات منتشر شده مقایسه شده است.
واژگان کلیدی: آرایه آنتن مدار چاپی، کاربردهای نسل پنجم، سیستم های چند ورودی-چند خروجی حجیم، تزویج متقابل، توزیع چبی شف، خطوط خنثی ساز.	

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه

از دهه ۱۹۷۰ تاکنون، با افزایش تقاضا برای استفاده از سیستم های ارتباطات بی سیم پرسرعت و تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء، استفاده از تکنیک های چند ورودی-چند خروجی ($1^{\text{Multi Input-Multi Output}}$) با آنتن های آرایه ای پهن باند رشد چشمگیری پیدا کرده است [۵-۱]. از این رو، آنتن های میکرواستریپ به دلیل داشتن

ویژگی های خاص و سازگاری بالا، به عنوان گزینه ای مناسب برای پیکربندی های چندورودی-چند خروجی حجیم^۲ مطرح شده اند [۶ و ۷]. این آنتن ها مزایای متعددی از جمله اندازه کوچک، سهولت یکپارچه سازی با مدارهای الکترونیکی و سازگاری با بسترهای متنوع دارند که آن ها را برای کاربردهای مختلف MIMO مناسب می سازد [۸]. دستیابی به ساختار فشرده به عنوان یک ضرورت اصلی و حیاتی در کاربردهای MIMO شناخته می شود؛ چرا که

^۲Massive MIMO

^۱MIMO

[۱۹] یک روش طراحی انعطاف‌پذیر مبتنی بر تکنیک ساختار زمین ناقص برای فیلترهای میکرواستریپ باند توقف، بالاگذر و میان گذر پیشنهاد شده است. از رویکردی دیگر، استفاده از تکنیک اضافه کردن خطوط خنثی ساز نیز به عنوان یک روش موثر در کاهش تزویج متقابل به شمار می‌رود [۲۰]. نویسندگان [۲۱] به طراحی یک آنتن موج میلی‌متری برای ارتباطات 5G پرداخته‌اند که از فناوری MIMO با استفاده از رویکردهای سوراخ‌کاری/شکاف‌زنی بهره می‌برد. اهمیت کاهش تزویج متقابل در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم نسل بعدی در مطالعه آن‌ها مورد تأکید قرار گرفته است. در [۲۲ و ۲۳] بررسی جامعی از تکنیک‌های کاهش تزویج متقابل در آنتن‌های MIMO انجام شده است که تمرکز ویژه‌ای بر اثربخشی ساختار زمین ناقص و عناصر پارازیتی دارد. علاوه بر این، نویسندگان [۲۴] یک بررسی دقیق از تزویج متقابل در تنظیمات آنتن دو قطبی هم‌مکان انجام داده‌اند، که تأثیر آن را مورد بررسی قرار داده و در خصوص استراتژی‌های ممکن برای کاهش آن بحث کرده‌اند.

در این مقاله، یک آرایه خطی 1×8 از آنتن‌های مدارچاپی با توزیع روزنه چبی‌شف برای کاربردهای 5G طراحی و شبیه‌سازی شده است. توزیع چبی‌شف به دلیل قابلیت کنترل سطح گلبه‌های جانبی (SLL^3) و بهبود الگوی تشعشعی، در طراحی آرایه‌های آنتنی مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این طراحی، فشرده‌سازی ساختار و کاهش تزویج متقابل بین المان‌های آرایه با استفاده از خطوط خنثی‌ساز است. طراحی پیشنهادی تمامی ابعاد پچ را در نظر گرفته است، به‌گونه‌ای که در فرکانس ۲۸ گیگاهرتز با ویژگی‌های پهنای باند وسیع تشدید کند تا باند فرکانسی بالای 5G را پوشش دهد. همچنین، یک آرایه خطی یکنواخت طراحی شده است تا تفاوت اساسی بین آرایه یکنواخت و آرایه با توزیع چبی‌شف را نشان دهد.

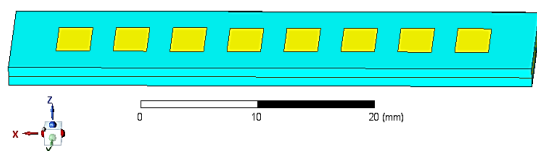
فرآیند طراحی پیشنهادی در دو بخش انجام شده است؛ در مرحله اول، آرایه آنتن با مشخصاتی شامل باند فرکانسی مورد نظر، SLL مطلوب، ابعاد مناسب و پهنای باند کافی طراحی و شبیه‌سازی شده است. سپس در مرحله دوم، روشی مؤثر برای کاهش تزویج متقابل بین المان‌ها معرفی و پیاده‌سازی شده است. بدین منظور، ابتدا فاصله بین

محدودیت فضا در کاربردهای مختلف، آنتن‌ها در فضاهای محدود جای‌گیری می‌شوند. لذا پدیده تزویج متقابل به یک چالش مهم در این کاربردها تبدیل شده است. این پدیده به تعامل بین آنتن‌های نزدیک به هم در یک آرایه اشاره دارد که می‌تواند منجر به اثرات ناخواسته‌ای مانند کاهش عملکرد آنتن و اعوجاج در الگوهای تشعشعی شود. چالش‌های ذکر شده در آنتن‌های آرایه‌ای با ساختار فشرده، که نزدیکی المان‌ها اثرات تزویج متقابل را تشدید می‌کند، بیشتر خودنمایی می‌کند [۹]. برای افزایش پهنای باند و کاهش ابعاد آنتن‌های باند ترازتر از طراحی صفحه زمین مشبک و عناصر فرامواد نیز استفاده شده است. به عنوان نمونه، در [۱۰] با بهره‌گیری از حلقه‌ها و صفحه زمین گرد و در [۱۱] با بهره‌گیری از رزوناتور مارپیچی و ساختار مکمل آنتن، فشرده‌سازی محقق شده است.

شایان ذکر است که بر اساس نتایج تجربی، زمانی که فاصله بین آنتن‌ها کمتر از نصف طول موج باشد، پارامترهای تابشی آنتن‌ها تحت تأثیر امواج سطحی و اثرات تزویج میدان نزدیک بین آنتن‌های مجاور قرار می‌گیرد [۱۴-۱۱]. از این رو هم‌زمان با گسترش این سیستم‌ها، روش‌های مختلفی برای مقابله با تزویج ناخواسته بین المان‌ها به بلوغ رسیده‌اند. به عنوان مثال، در مرجع [۱۵] یک راه‌حل برای کاهش تزویج متقابل در آنتن‌های آرایه‌ای پچ پیشنهاد شده است. در این کار، از چیدمان دیوارهای فلزی و پین‌های کوتاه‌کننده برای حل این مشکل استفاده شده است. رویکرد دیگری که در مرجع [۱۶] توضیح داده شده، استفاده از امواج الکترومغناطیسی مارپیچ مسطح با حرکت زاویه‌ای مداری برای کاهش تزویج متقابل در آنتن‌های آرایه‌ای است. تکنیک‌های جداسازی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: رویکردهای ساختاری و روش‌های مبتنی بر شبکه. رویکردهای ساختاری شامل انتخاب آنتن‌ها و همچنین موقعیت‌یابی و هم‌راستایی المان‌های کاهش تزویج هستند. از طرف دیگر، روش‌های مبتنی بر شبکه معمولاً بر اساس رویکردهای تحلیلی با استفاده از پارامترهای شبکه و عملیات ماتریسی استوار هستند [۱۷ و ۱۸].

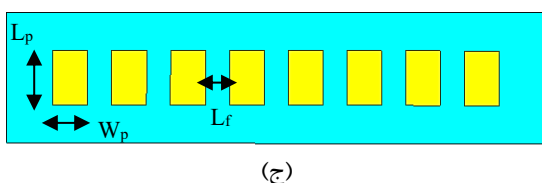
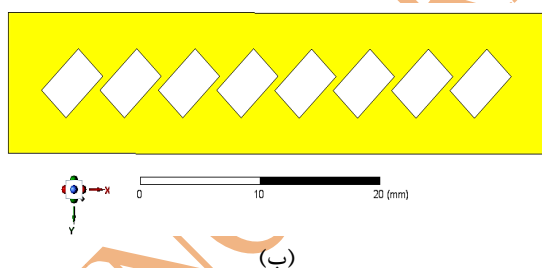
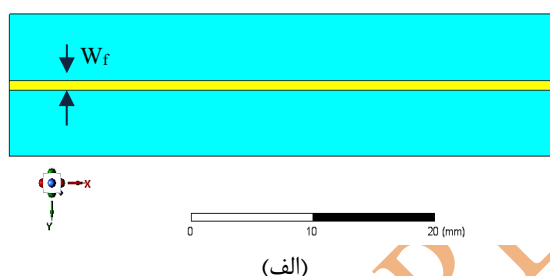
در اینجا، برخی از منابعی که به کاهش مشکلات ناشی از تزویج متقابل با استفاده از رویکردهای ساختاری پرداخته‌اند، معرفی شده است. به عنوان مثال، در مرجع

^۱ Side Lobe Level



شکل ۱- ساختار اولیه آنتن خطی یکنواخت

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، آنتن آرایه-ای مورد نظر متشکل از سه لایه اصلی می باشد؛ لایه پایینی به عنوان لایه تغذیه در نظر گرفته می شود. خط تغذیه به صورت یک نوار هادی با عرض مشخص از ابتدای ساختار تا انتها در نظر گرفته شده است. لایه میانی، صفحه زمین با قرارگیری روزنه ها جهت تزویج تغذیه به آرایه مورد نظر و لایه بالایی آرایه خطی شامل ۸ آنتن پچ مستطیلی می باشد که همه پچ ها مشابه یکدیگر بوده و در یک محور قرار گرفته اند. زاویه قرارگیری روزنه ها و پچ ها با یکدیگر ۴۵ درجه است که این به سبب رسیدن بهتر انرژی خط تغذیه به پچ ها است. شکل ۲ قسمت های ذکر شده را به تفکیک نشان می دهد.



شکل ۲- قسمت های مختلف آرایه آنتن خطی یکنواخت؛
(الف) خط تغذیه، (ب) صفحه زمین و روزنه های روی آن،
(ج) آنتن های پچ قرار گرفته بر روی بستر دی الکتریک.

ابعاد قسمت های مختلف ساختار که در شکل ۲ مشخص گردیده است، در جدول ۱ نشان داده شده است.

المان ها کاهش داده شده تا با ایجاد جریان های مخالف جریان سطحی ایجاد شده بین المان ها، تزویج متقابل و در نتیجه اثرات نامطلوب آن بر روی مشخصات تشعشعی آرایه آنتن کاهش یابد و در عوض ساختار فشرده تر شود. سپس، خطوط خنثی ساز بین هر المان قرار داده شده اند که جریان های سطحی ناخواسته را که عامل تزویج متقابل هستند، به طور چشمگیری کاهش می دهند. ابعاد این خطوط بر اساس روابط تحلیلی استخراج شده اند. در نهایت با بررسی نتایج شبیه سازی و مقایسه با کارهای گذشته، موثر بودن روش پیشنهادی در محقق ساختن اهداف مقاله نشان داده می شود.

۲- ساختار پیشنهادی برای آرایه آنتن روزنه ای مورد نظر

طراحی آنتن مورد نظر با بهره قابل قبول در باند فرکانسی امواج میلیمتری (mmWaves) که قابل استفاده برای کاربردهای نسل پنجم را دارد، از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش نخست طراحی آرایه خطی آنتن روزنه ای یکنواخت و ابعاد آن، بخش دوم استفاده از توزیع چپی شف جهت بهبود سطح گلبرگ کناری (SLL) و بخش سوم بررسی و مدل سازی تزویج بین المان ها است.

۲-۱- طراحی آرایه خطی آنتن با تغذیه روزنه ای

برای طراحی ساختار در باند فرکانسی ۲۸-۳۸ گیگاهرتز با فرکانس مرکزی ۲۸ گیگاهرتز، یک آرایه خطی 1×8 در نظر گرفته می شود. ماده Rogers 5880 با $\epsilon_r = 2.2$ و ضخامت 0.7884 میلیمتر برای بستر دی الکتریک ساختار استفاده شده است. ابعاد ساختار پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه پارامتری در نرم افزار HFSS به دست آمده اند. لازم به ذکر است برای جلوگیری از وقوع گلبرگ های فرعی، بایستی فاصله بین المان ها عددی کمتر از $\lambda/2$ ($\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$) یعنی کمتر از $3/72$ میلیمتر انتخاب شود [۲۵]. در این مقاله این مقدار ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. ساختار اولیه آرایه آنتن مورد نظر به شکل نمایش داده شده در شکل ۱ است.

۲-۲- طراحی و استقرار عناصر بر اساس چندجمله‌ای

چبی شف

همان طور که در بخش ۱-۲ عنوان شد، برای کاهش سطح گلبرگ فرعی، ساختار اولیه بایستی بهینه گردد؛ لذا ساختاری فشرده با $SLL = -20$ dB هدف این مطالعه می‌باشد. بدین منظور با توجه به ویژگی‌های آرایه با توزیع چبی‌شف، آرایه با مشخصات بخش ۱-۲ با اعمال ضرایب چندجمله‌ای چبی‌شف بر روی ابعاد پیچ‌ها، باز طراحی می‌شوند. از رابطه موجود محاسبات مربوط به اندازه پیچ‌ها ($N=8$) محاسبه می‌گردد:

$$R = 10^{-\frac{SLL}{20}} = 10^{-\frac{-20}{20}} = 10 \quad (۱)$$

حال γ را از رابطه (۲) بدست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} \gamma &= \cosh \left[\frac{1}{(N-1)} \ln (R + \sqrt{R^2 - 1}) \right] \\ &= \cosh \left[\frac{1}{7} \ln (10 + \sqrt{99}) \right] = 1.18 \end{aligned} \quad (۲)$$

سپس عرض پرتو نصف توان را به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} HPBW &= \pi - 2\cos^{-1} \left(\frac{\psi_h}{\beta d} \right) \\ &= \pi - 2\cos^{-1} \left(\frac{42.43}{\frac{2\pi}{\lambda} \times 0.822\lambda} \right) = 16.49 \end{aligned} \quad (۳)$$

که ψ_h از رابطه (۴) به دست آمده است:

$$\begin{aligned} \psi_h &= 2\cos^{-1} \left\{ \frac{\cosh \left[\frac{1}{N-1} \cos h^{-1} \left(\frac{R}{2} \right) \right]}{\cosh \left[\frac{1}{N-1} \cos h^{-1} (R) \right]} \right\} \\ &= 2\cos^{-1} \left\{ \frac{\cosh \left[\frac{1}{7} \cosh^{-1} (5) \right]}{\cosh \left[\frac{1}{7} \cosh^{-1} (10) \right]} \right\} = 42.43 \end{aligned} \quad (۴)$$

همچنین:

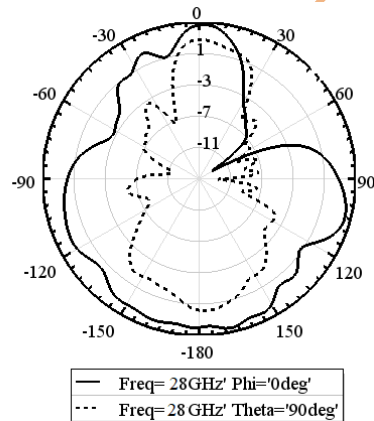
$$\begin{aligned} d_{opx} &= \lambda \left[1 - \frac{\cos^{-1} \left(\frac{1}{\gamma} \right)}{\pi} \right] \\ &= \lambda \left[1 - \frac{\cos^{-1} \left(\frac{1}{1.18} \right)}{180} \right] \\ &= 0.822\lambda \end{aligned} \quad (۵)$$

حال ψ_m را بدست می‌آوریم:

جدول ۱- ابعاد آرایه آنتن پیچ یکنواخت

مقدار (mm)	پارامتر	مقدار (mm)	پارامتر
2.9	W_p	0.7	W_f
4.38	L_p	2	L_f

ساختار نشان داده شده در شکل در نرم افزار HFSS شبیه‌سازی شده و نتایج الگویی تشعشعی و نمودارهای مربوط به پارامترهای ماتریس پراکندگی در شکل ۳ نشان داده شده است.

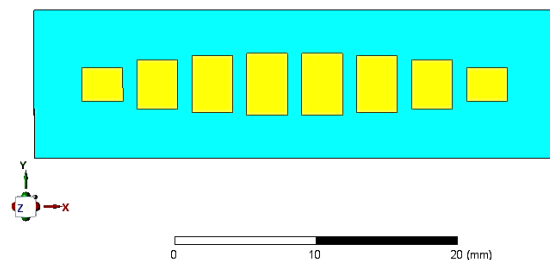


با نرمالیزه کردن جریان‌ها برحسب I_4 ، سایر جریان‌ها محاسبه می‌شوند [۲۶ و ۲۷]. جدول ۲ توزیع جریان چند جمله‌ای چپی شف اعمال شده بر روی آرایه برای تعیین عرض هر عنصر را نشان می‌دهد.

جدول ۲- عرض عناصر بر اساس چند جمله‌ای چپی شف

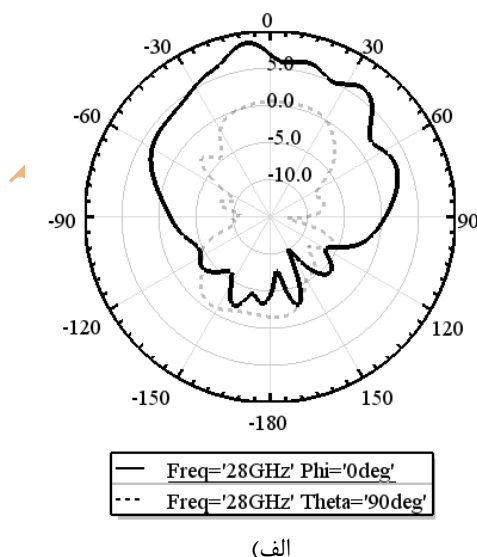
شماره عنصر	جریان (A)	عرض عنصر (mm)
1	0.55	2.41
2	0.8	3.50
3	0.92	4.03
4	1	4.38
5	1	4.38
6	0.92	4.03
7	0.8	3.50
8	0.55	2.41

حال بر طبق جدول فوق، ضرایب چپی شف بر آنتن آرایه‌ای یکنواخت بخش ۱-۲ لحاظ شده و مجدداً شبیه سازی می‌شود. شکل ۴ ساختار آرایه آنتن جدید را نشان می‌دهد.



شکل ۴- آنتن آرایه‌ای مورد نظر با توزیع چپی شف

آرایه آنتن مورد نظر در نرم افزار HFSS شبیه سازی شده و نتایج آن مطابق شکل ۵ می‌باشد.



(الف)

$$\psi_m = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{\gamma} \cos \frac{(2m-1)\pi}{2(N-1)} \right] \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$M = \frac{(8-2)}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

$$\psi_1 = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{\gamma} \cos \frac{\pi}{2 \times 7} \right] = 72.58$$

$$\psi_2 = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{\gamma} \cos \frac{3\pi}{2 \times 7} \right] = 120.24 \quad (7)$$

$$\psi_3 = 2 \cos^{-1} \left[\frac{1}{\gamma} \cos \frac{5\pi}{2 \times 7} \right] = 136.85$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} = -I_{M+1} [A]^{-1} \begin{bmatrix} \cos \left[\left(M + \frac{1}{2} \right) \psi_1 \right] \\ \cos \left[\left(M + \frac{1}{2} \right) \psi_2 \right] \\ \vdots \\ \cos \left[\left(M + \frac{1}{2} \right) \psi_m \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos \left(\frac{\psi_1}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_1}{2} \right) & \dots & \cos \left[(2M-1) \frac{\psi_1}{2} \right] \\ \cos \left(\frac{\psi_2}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_2}{2} \right) & \dots & \cos \left[(2M-1) \frac{\psi_2}{2} \right] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos \left(\frac{\psi_M}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_M}{2} \right) & \dots & \cos \left[(2M-1) \frac{\psi_M}{2} \right] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos \left(\frac{\psi_1}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_1}{2} \right) & \cos \left(\frac{5\psi_1}{2} \right) \\ \cos \left(\frac{\psi_2}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_2}{2} \right) & \cos \left(\frac{5\psi_2}{2} \right) \\ \cos \left(\frac{\psi_3}{2} \right) & \cos \left(\frac{3\psi_3}{2} \right) & \cos \left(\frac{5\psi_3}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

با جایگذاری (۷) در (۱۰) داریم:

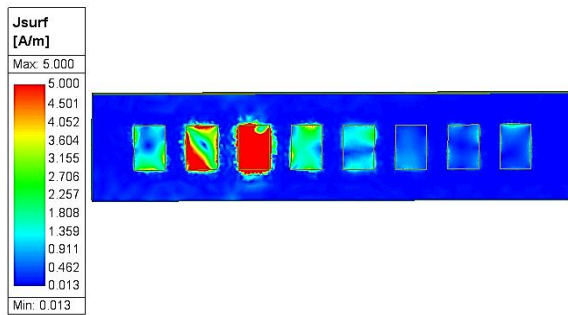
$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 5.27 & -5.49 & 2.22 \\ 4.11 & -5.14 & 1.30 \\ 2.92 & -2.76 & 0.37 \end{bmatrix} \quad (11)$$

و در نهایت جریان‌های عناصر از رابطه (۱۲) بدست می‌آیند:

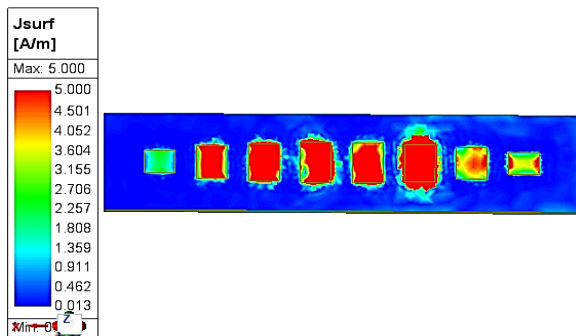
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = -I_4 \begin{bmatrix} 5.27 & -5.49 & 2.22 \\ 4.11 & -5.14 & 1.30 \\ 2.92 & -2.76 & 0.37 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0.5 \\ 0.3 \end{bmatrix} = -I_4 \begin{bmatrix} -0.55 \\ -0.8 \\ -0.92 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$I_1 = 0.55 I_4 \quad I_2 = 0.8 I_4 \quad I_3 = 0.92 I_4$$

ساختار آرایه یکنواخت آنتن و آرایه با توزیع چبی شف را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- نحوه توزیع جریان در دو ساختار (الف) آرایه یکنواخت آنتن و (ب) آرایه با توزیع چبی شف.

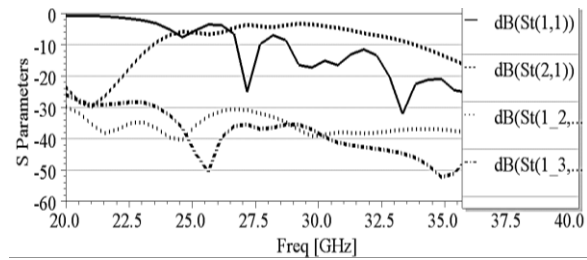
شکل ۶ (الف و ب) نحوه توزیع جریان زمانی که پورت ۳ روشن و پورت های دیگر خاموش است را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود جریان های سطحی موجب روشن شدن پورت های مجاور شده است.

به دلیل این که کاهش تزویج معمولاً یک یا چند عنصر با ماهیت امپدانس و یا ادمیتانس اضافه می شود، لذا راحت تر است که با ماتریس Z و Y تحلیل ها صورت پذیرد. ماتریس امپدانس متناظر از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$Z^a = Z_0(I + S^a)(I - S^a)^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11}^a & Z_{12}^a \\ Z_{12}^a & Z_{22}^a \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در این رابطه ماتریس I یک ماتریس $n \times n$ می باشد که معرف ماتریس همانی است. همچنین، Z_0 امپدانس مشخصه سیستم است. بنابراین، ماتریس ادمیتانس آرایه به صورت زیر خواهد بود.

$$Y^a = (Z^a)^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{11}^a & Y_{12}^a \\ Y_{12}^a & Y_{22}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^a + jB_{11}^a & G_{12}^a + jB_{12}^a \\ G_{12}^a + jB_{12}^a & G_{22}^a + jB_{22}^a \end{bmatrix} \quad (15)$$



(ب)

شکل ۵- نتایج شبیه سازی آنتن آرایه چبی شف (الف) الگوی تشعشعی آرایه آنتن و (ب) نمودار پارامترهای پراکندگی.

همان گونه در شکل ۵ مشاهده می شود، مطابق انتظارات با استفاده از ضرایب چند جمله ای چبی شف، گلبرگ های فرعی کاهش یافته و دامنه گلبرگ اصلی تقویت شده است. لیکن همچنان تزویج بین عناصر مطلوب نبوده که در بخش ۳-۲ به بررسی این موضوع پرداخته می شود.

۳-۲- بررسی و مدل سازی تزویج بین عناصر

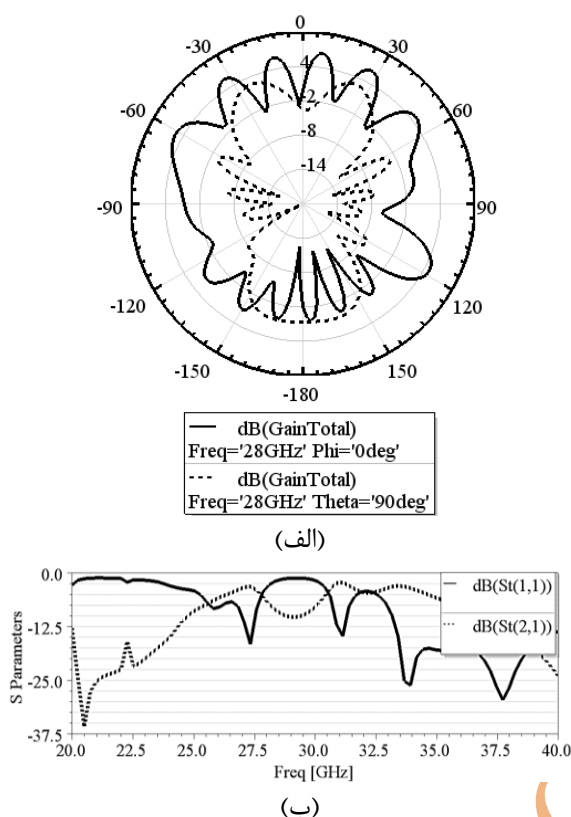
برای رسیدن به ساختار فشرده در آرایه آنتن، فاکتور بسیار مهم از دست رفتن مشخصات تشعشعی مطلوب است. با توجه به اینکه با کاهش فاصله بین عناصر، جریان های سطحی ناخواسته و در پی آن تزویج متقابل افزایش می یابد. تزویج متقابل به دلیل جریان های القایی و میدان های الکترومغناطیسی تولید شده توسط هر عنصر روی سایر عناصر به وجود می آید و می تواند الگوی تشعشعی، بهره و پهنای باند را تحت تاثیر اثرات نامطلوب قرار دهد. لذا نخست بایستی بررسی های لازم در این خصوص صورت گیرد؛ بدین منظور یک آرایه متشکل از یک جفت آنتن را که ماتریس پراکندگی آنتن های تزویج شده آن به صورت رابطه ۱۳ است در نظر گرفته می شود:

$$S^a = \begin{bmatrix} S_{11}^a & S_{12}^a \\ S_{12}^a & S_{22}^a \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در این رابطه S_{11}^a و S_{22}^a بیانگر تطبیق آنتن ها است. در صورتی که برابر صفر باشند یعنی هر دو آنتن تطبیق هستند و در صورت $S_{11}^a = S_{22}^a$ به معنی آنتن های همسان و S_{12}^a و S_{21}^a بیانگر آرایه متقارن است. پارامترهای S_{12}^a و S_{21}^a معرف تزویج بین دو عنصر مجاور می باشد [۲۸].

نحوه توزیع جریان در صفحه آرایه آنتن ها و روی سطح هر آنتن، می تواند میزان نشت جریان به عناصر دیگر را نشان دهد. در شکل ۶ (الف و ب) نحوه توزیع جریان در دو

آنتن آرایه ای مورد نظر با فواصل جدید در نرم افزار HFSS شبیه سازی شده است و نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- مشخصات تشعشی آرایه آنتن فشرده شده با توزیع چبی شف، (الف) الگوی تشعشی و (ب) نمودار پارامترهای S.

نتایج شبیه سازی حاکی از آن است با وجود اینکه با کاهش فواصل بین عناصر انتظار می رفت سطح گلبرگ فرعی کاهش یابد، لیکن به دلیل تزویج قوی بین عناصر، الگوی تشعشی شکل مطلوبی ندارد. همچنین شکل ۸ (ب) نمودار پارامترهای پراکندگی بین دو عنصر اول و دوم را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، در بازه ای S_{11} مقدار زیر ۱۰- دسیبل دارد، کمترین مقدار S_{21} ، $3/0.8$ دسیبل بوده که موجب جابجایی فرکانس مرکزی به فرکانس $27/6$ گیگاهرتز شده و کاهش پهنای باند به 5.7 مگاهرتز گردیده است. با بررسی نحوه توزیع جریان که در شکل ۹ نشان داده شده است، می توان به جریان های سطحی غیر مطلوبی پی برد که موجب تزویج قوی بین هر عنصر آرایه با عنصر مجاورش شده است.

این جریان های ناخواسته موجب کاهش پهنای باند، بهره کل ساختار و همچنین تطبیق امپدانس آرایه شده است. در

بنابراین، تفکیک پورت زمانی حاصل می شود که $Y_{12}^a = 0$ باشد. در بخش ۳ به موضوع کاهش تزویج پرداخته خواهد شد.

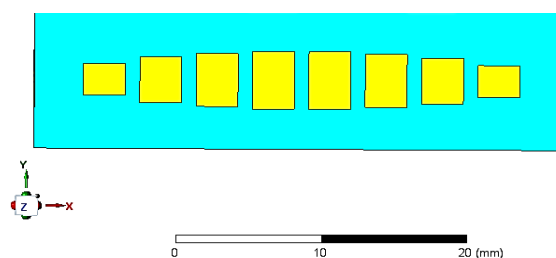
۳- فشرده سازی ساختار و کاهش تزویج متقابل

بین عناصر

در بخش ۲، نحوه طراحی آنتن آرایه ای خطی با تغذیه روزنه ای چبی شف به طور مفصل شرح داده شد. همان طور که در نتایج بخش ۲- آورده شده است، با توجه به مقدار SLL، نیاز به ساختار فشرده تر می باشد که این فشرده سازی و کاهش اندازه، ساختار را برای کاربردهای 5G مطلوب می سازد. از طرفی مطابق شکل ۶، در ساختار موجود تزویج بین عناصر زیاد بوده و موجب ایجاد جریان های سطحی ناخواسته شده است. این جریان ها علاوه بر تغییر مشخصات تشعشی ساختار، موجب کاهش پهنای باند نیز می گردند. لذا بایستی با اعمال روش های کاهش تزویج متقابل، اثرات جریان های سطحی حاصله از آن را کمینه نمود. برای این منظور ابتدا فاصله بین عناصر را به نصف تقلیل داده می شود. کاهش فاصله بین عناصر به دو دلیل مهم است؛ نخست، دستیابی به ساختار فشرده تر که برای کاربردهای جدید نظیر 5G بسیار ضروری است و دوم، کاهش SLL و در نتیجه مشخصات تشعشی بهتر را موجب خواهد شد.

۳-۱- فشرده سازی ساختار

برای داشتن SLL مناسب، فاصله بین عناصر بایستی کمتر از $\lambda/2$ باشد. همان گونه که در بخش ۲- بیان شد، فاصله بین عناصر بایستی کمتر از $3/72$ میلیمتر انتخاب شود. کمترین فاصله ممکن جهت اعمال روش کاهش تزویج، یک میلیمتر انتخاب می گردد. شکل ۷ تصویر آرایه آنتن فشرده شده را نشان می دهد.



شکل ۷- آرایه آنتن چبی شف فشرده شده

خطوط این است که یک مسیر تزویج اضافی ایجاد شود که باعث تولید جریانی با دامنه و فاز مناسب برای حذف اثر تزویج اصلی شود.

$$Z_{21}^{eff} = Z_{21} + Z_N \quad (17)$$

اگر بتوانیم طراحی را طوری انجام دهیم که:

$$Z_{21} + Z_N \approx 0 \quad (18)$$

آنگاه تزویج متقابل تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند. برای اینکه خط خنثی‌ساز بتواند تزویج را به‌خوبی خنثی کند، فاز سیگنالی که از طریق این خط عبور می‌کند، باید دقیقاً ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با تزویج اصلی داشته باشد:

$$4Z_N = 4Z_{21} + 180^\circ \quad (19)$$

یعنی اگر تزویج اصلی باعث انتقال سیگنالی با زاویه فاز ۴۵ درجه شده، خط خنثی‌ساز باید همان سیگنال را با زاویه ۲۲۵ درجه (۴۵ + ۱۸۰) به آنتن دوم برساند تا اثر آن را از بین ببرد.

یکی از روش‌های ساده برای ایجاد چنین مسیری، استفاده از یک خط انتقال با طول $\frac{\lambda}{4}$ است. دلیل این انتخاب این است که یک خط انتقال با طول $\frac{\lambda}{4}$ می‌تواند سیگنالی را با فاز ۹۰ درجه شیفت منتقل کند. حال اگر این خط، در ترکیب با یک خط اضافی دیگر استفاده شود، می‌توان اختلاف فاز ۱۸۰ درجه را به دست آورد.

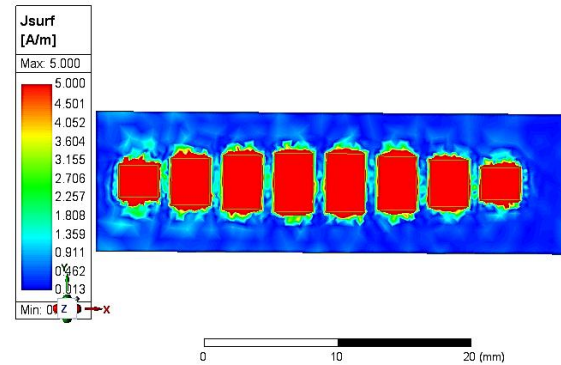
فرمول کلی برای امپدانس این خط به صورت (۲۰) است:

$$Z_N = -Z_{21} \quad (20)$$

یعنی خط خنثی‌ساز باید امپدانس دقیقاً برابر اما با علامت مخالف نسبت به تزویج اصلی داشته باشد [۲۹].

یکی از روش‌های ساده، طراحی خطوط میکرواستریپ بین عناصر آرایه است. این خطوط دقیقاً برای ایجاد تزویج کنترل‌شده طراحی می‌شوند تا اثرات ناخواسته تزویج اصلی را خنثی کنند. در این مقاله برای فائق آمدن بر اثرات نامطلوب تزویج متقابل، بین هر عنصر و عنصر مجاور، خطوط خنثی‌ساز به نحوی قرار گرفته اند که با ایجاد امپدانس برابر با فاز ۱۸۰ درجه با تزویج اصلی، جریان‌های سطحی را تا حد زیادی کاهش دهند. ساختار پیشنهادی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بخش بعد با اضافه کردن خطوط خنثی ساز اثرات این جریان‌ها را تا حد زیادی کاهش می‌یابد.



شکل ۹- نحوه توزیع جریان در آرایه آنتن فشرده شده با توزیع چبی شف

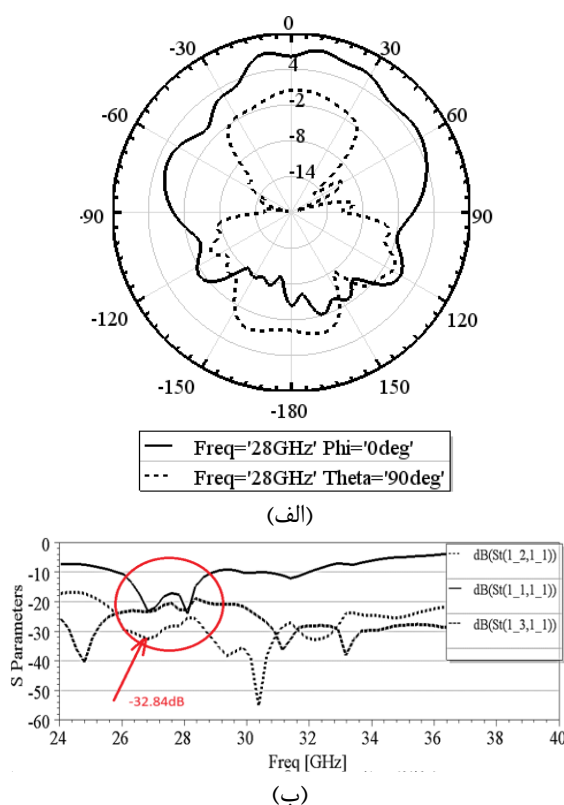
۳-۲- افزودن خطوط خنثی‌ساز برای کاهش تزویج متقابل

یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش این اثر ناخواسته، استفاده از خطوط خنثی‌ساز (Neutralization Lines) است. در این روش، با طراحی یک مسیر اضافی برای انتقال انرژی، سعی می‌شود تأثیر تزویج متقابل تا حد زیادی خنثی شود. وقتی دو عنصر در یک آرایه نزدیک به هم قرار می‌گیرند، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی آن‌ها روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند. این اثر می‌تواند به‌صورت تزویج خازنی یا القایی مدل‌سازی شود؛ وقتی دو آنتن نزدیک به هم هستند، میدان الکتریکی یکی از آن‌ها روی دیگری تأثیر می‌گذارد و باعث ایجاد یک ظرفیت معادل بین آن‌ها می‌شود که موجب تزویج خازنی می‌شود و زمانی که جریان‌های عبوری از عناصر آنتن باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود که می‌تواند در عنصر مجاور جریان ناخواسته‌ای القا کند. این اثر را می‌توان با مدل‌سازی مدار معادل دو آنتن به‌صورت روابط (۱۶) نمایش داد:

$$\begin{aligned} V_1 &= I_{11}Z_{11} + I_{12}Z_{12} \\ V_2 &= I_{21}Z_{11} + I_{22}Z_{12} \end{aligned} \quad (16)$$

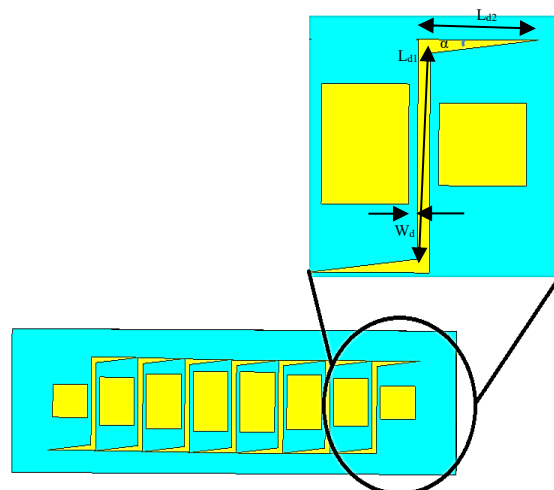
که در آن Z_{12} و Z_{21} مقدار تزویج متقابل بین دو عنصر را نشان می‌دهند و Z_{11} و Z_{22} امپدانس ورودی هر آنتن هستند.

اگر بتوان مسیری را طراحی کرد که انرژی تزویج‌شده را با فازی معکوس به عنصر دوم برساند، می‌توان اثر تزویج متقابل را کاهش داد. برای این منظور می‌توان از خطوط خنثی‌ساز بهینه شده استفاده کرد. مکانیزم اصلی این



شکل ۱۱- مشخصات تشعشی آرایه آنتن فشرده شده با توزیع چبی شف پس از اضافه شدن خطوط خنثی ساز، (الف) الگوی تشعشی و (ب) نمودار پارامترهای S.

شکل ۱۲ نتایج بدست آمده دو نمودار S_{11} و S_{21} از دو نرم افزار مذکور را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود نمودارها نزدیک بهم بوده و یکدیگر را تایید می کنند. علاوه بر این، برای نشان دادن بیشتر روش پیشنهادی، نتایج دست آمده از شبیه سازی ساختار نهایی با خطوط خنثی ساز با سایر روش های منتشر شده در مقالات اخیر مقایسه و در جدول ۴ آورده شده است. همچنین برای بهتر نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، توزیع جریان در ساختار نهایی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که پس از اضافه شدن خطوط خنثی ساز، میزان جریان القایی بر روی عناصر مجاور به شدت کاهش یافته است. در ساختار اولیه، مقدار قابل توجهی از جریان از طریق میدان های پراکنده بین عناصر تزویج شده و باعث افزایش تزویج متقابل می شود. اما پس از افزودن خطوط خنثی ساز، این جریان القایی تضعیف شده و جریان ها عمدتاً بر روی عنصر تحریک شده متمرکز باقی می ماند.



شکل ۱۰- آرایه آنتن فشرده با توزیع چبی شف به همراه خطوط خنثی ساز به عنوان کاهنده تزویج متقابل.

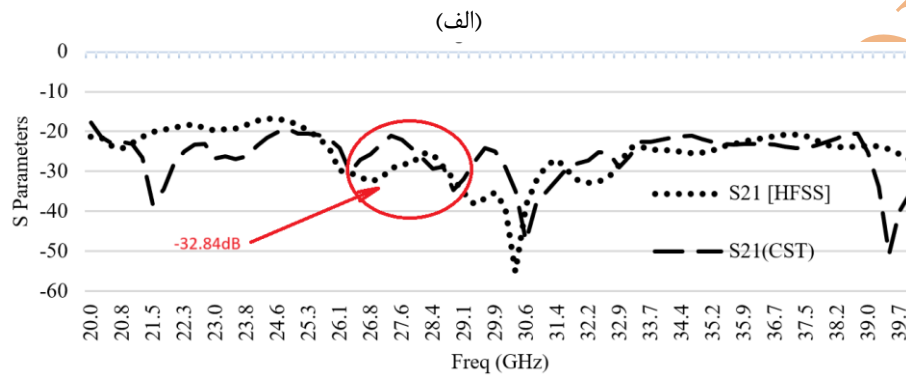
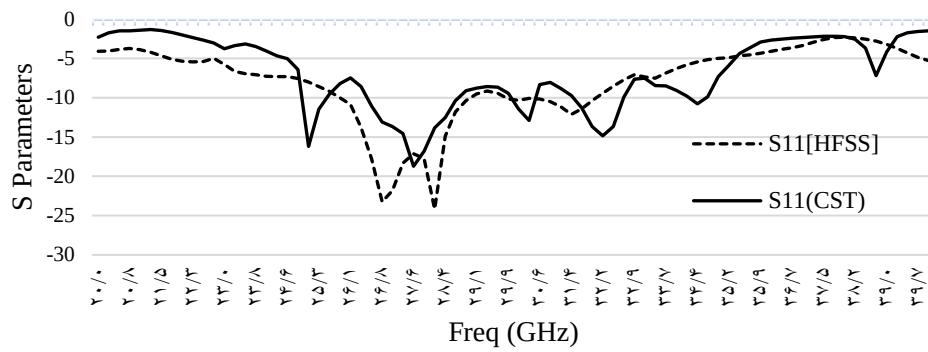
طول این خطوط به نحوی طراحی شده اند که مسیر جریان برگشتی کنترل شده باشند. عرض خطوط خنثی ساز پیشنهادی با استفاده از یک مطالعه پارامتری در نرم افزار HFSS به دست آمده است. ابعاد خط خنثی ساز بین هر یک از عناصر به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳- ابعاد هر یک از خطوط خنثی ساز

پارامتر	مقدار (mm)	پارامتر	مقدار (mm)
W_d	0.4	L_{d1}	6.4
α	6.38°	L_{d2}	4

نتایج شبیه سازی ساختار نهایی با اعمال خطوط خنثی ساز پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که پهنای باند ساختار ۳/۰۹ گیگاهرتز از فرکانس ۲۵/۸۴ تا ۲۸/۹۵ گیگاهرتز بوده و کمترین تزویج متقابل بین دو عنصر مجاور در پهنای باند مذکور ۳۲/۸۴- دسیبل است. همچنین بیشینه بهره آرایه آنتن ۸/۹۲ و سطح گلبزرگ فرعی ۲۰- دسیبل بدست آمده است.

برای تصدیق نتایج حاصله با توجه به کوچک بودن ابعاد و عدم امکان ساخت با دقت مناسب، برای مقایسه شبیه سازی با دو نرم افزار CST نیز شبیه سازی شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده از نرم افزار HFSS مقایسه شده است.



شکل ۱۲- مقایسه نتایج پارامترهای پراکندگی با دو نرم افزار HFSS و CST، الف) نمودار S_{11} و ب) نمودار S_{21} .

جدول ۴- مقایسه روش پیشنهادی برای کاهش تزویج متقابل با سایر تحقیقات منتشر شده.

مرجع	سال انتشار	روش کاهش تزویج	تعداد عناصر آرایه	فرکانس مرکزی	تزویج متقابل dB(S_{21})	فاصله بین المان ها (λ_0)
مقاله حاضر		خطوط خنثی ساز	1×8	27.6 GHz	-32.84	0.13
[۳۰]	2024	المان پارازیتیکی	1×2	2.45 GHz 5.4 GHz	-22(2.45GHz) -27(5.4GHz)	0.16
[۳۱]	2023	روش کاهش تزویج میدان نزدیک	1×2	2.37 GHz	-21	0.03
[۱۷]	2022	شبکه کاهش تزویج و تطبیق	1×2	2.4 GHz 5.4 GHz	-10 (2.4 GHz) -12 (5.4 GHz)	0.78
[۳۲]	2021	شبکه کاهش تزویج و تطبیق	1×2	12-18 GHz	-23	0.15
[۳۳]	2020	شبکه کاهش تزویج و تطبیق	1×2	2 GHz 3.4 GHz	-31 (2GHz) -30 (3.4GHz)	2
[۳۴]	2017	فرامواد	1×2	6.75 GHz	-16	0.83
[۳۵]	2017	کاهش تزویج سطحی	1×2	2.45 GHz	-30	0.08
[۳۶]	2016	باند باز الکترومغناطیسی	1×2	2.55 GHz	-26	0.26
[۳۷]	2016	دیوار نواری نامتقارن	7×3	5.8 GHz	-20	0.72
[۳۸]	2014	رزوناتور دایروی	1×2	3.7 GHz	< -40	0.05
[۳۹]	2011	رزوناتور دایروی	1×2	5.2 GHz	< -20	0.50
[۴۰]	2011	فرامواد	7×3	5.7 GHz	< -20	0.72

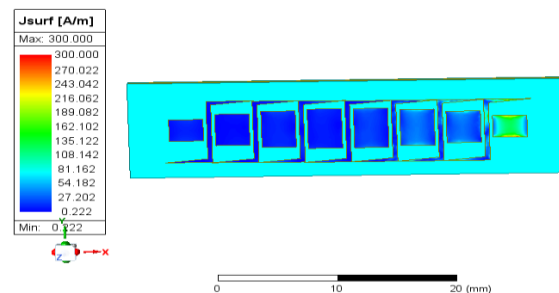
خطوط خنثی سازی، توانست تزویج متقابل را به میزان $32/84$ - دسیبل کاهش دهد. همچنین پهنای باند ساختار $3/09$ گیگاهرتز و بهره آرایه آنتن $8/92$ بدست آمد. نتایج شبیه سازی در نرم افزارهای HFSS و CST، کاهش موثر تزویج و بهبود مشخصات تشعشعی را تایید نموده است. شایان ذکر است که استفاده از خطوط خنثی ساز به توزیع خاصی از روزنه وابسته نیست و یک روش عمومی برای کاهش تزویج متقابل در آرایه های آنتنی به شمار می رود. هرچند در این مقاله ساختار با توزیع چبی شف به دلیل ویژگی های آن در کنترل لوب های جانبی مورد توجه قرار گرفته است، اما روش پیشنهادی قابل تعمیم به سایر توزیع ها مانند یکنواخت و تیلور نیز می باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله قدردانی خود را از حمایت دانشگاه سمنان ابراز می دارند. همچنین از نکات ارزشمند داوران محترم مجله قدردانی می شود.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.



شکل ۱۲: نحوه توزیع جریان سطحی در ساختار پیشنهادی

این تغییر در توزیع جریان، به خوبی اثربخشی خطوط خنثی ساز را در کاهش تداخلات بین عناصر آرایه را نشان می دهد و همچنین به عنوان توجیه فیزیکی عملکرد بهتر پارامترهای پراکندگی نیز قابل استناد است.

۴- نتیجه گیری

یک آرایه خطی 1×8 از آنتن های مدارچاپی فشرده شده با توزیع روزنه چبی شف برای کاربردهای 5G طراحی و شبیه سازی شد. هدف اصلی، کاهش تزویج متقابل بین المان های آرایه با استفاده از خطوط خنثی ساز بود. لذا فاصله بین عناصر یک میلی متر در نظر گرفته شد. روش پیشنهادی با ایجاد جریان های مخالف در سطح آنتن و طراحی بهینه

مراجع

- [1] M. M. Fakharian and P. Rezaei, "Very compact palmate leaf-shaped CPW-FED monopole antenna for UWB applications," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56, no. 7, (2014): 1612–1616.
- [2] D. Jing and H. Li, "A Compact Dual-Band Two-Element Implantable MIMO Antenna for Biotelemetric Applications," *IEEE Int. Microw. Work. Ser. Adv. Mater. Process. RF THz Appl.*, 2022.
- [3] M. Hatam, A. Sheikhi, and M. A. Masnadi-Shirazi, "A pulse-train mimo radar based on theory of independent component analysis," *Trans. Electr. Eng.*, 35, no. E2 (2011): 75–94.
- [4] N. Dalakoti and P. Jain, "A compact dual-element UWB-MIMO antenna with single band-notched characteristics," *Frequenz*, 78, no. 7–8 (2024): 335–345.
- [5] A. Valizade, P. Rezaei, A. Orouji, "A new design of dual-port active integrated antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN applications," *Progress Electromag. Res. B*, 58, (2014): 83-94.
- [6] A. Valizade, J. Nourinia, and P. Rezaei, "Design of a compact dual-band-notch ultra-wideband bandpass filter based on wave cancellation method," *IET Microw. Antennas Propag.*, 9, no. 1 (2015): 1-9.
- [7] S. Khani, S. Mohammad, H. Mousavi, M. Danaie, and P. Rezaei, "Tunable compact microstrip dual-band bandpass filter with tapered resonators," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 60, no. 5, (2018): 1256–1261.
- [8] G. Dadashzadeh, E. Jedari, M. Hakak, and M. Kamareei, "Antenna array configuration effects on the radiation pattern and BER of the modified adaptive CMA in CDMA based systems," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. B, Eng.*, 30, no. B2 (2006).
- [9] H. Nimehvari Varcheh and P. Rezaei, "Integration of the modified Butler matrix and decoupling network for beam-steering antenna array," *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, 32, no. 3 (2022): 23015.

- [10] S. Poorgholam-Khanjari, F. B. Zarrabi, and S. Jarchi, "Compact and wide-band Quasi Yagi-Uda antenna based on periodic grating ground and coupling method in terahertz regime," *Optik*, 203, (2020): 163990.
- [11] M. M. Fakharian, "A low-profile compact UWB antenna array for sub-6 GHz MIMO applications in 5G metal-frame smartphones," *Int. J. RF Microw. Comput. Aided. Eng.*, 32, no. 10 (2022): e23320.
- [12] M. H. Aghamohammadi, S. Jarchi, and A. Zamani, "Mutual coupling reduction in multiple-input multiple-output antenna based on metamaterial at low THz frequency band," *IEEE Proc. 6th Int. Conf. Millimeter-Wave Terahertz Technol. (MMWaTT)*, (2022): 1–4.
- [13] M. M. Fakharian, P. Rezaei, "Mutual coupling reduction in microstrip array antenna using a novel compact electromagnetic band-gap structure," *2nd National Conf. New Technol. Elec. Comput. Eng.* (2019): 1–9.
- [14] S. Khani, M. Danaie, and P. Rezaei, "Plasmonic all-optical modulator based on the coupling of a surface Plasmon stub-filter and a meandered MIM waveguide," *Opt. Quantum Electron.*, 54, no. 12 (2022).
- [15] I. A. Tunio, Y. Mahé, T. Razban, and B. Froppier, "Mutual coupling reduction in patch antenna array using combination of shorting pins and metallic walls," *Prog. Electromagn. Res. C*, 107, (2021).
- [16] A. Habibi Daronkola, F.T. Hamedani, P. Rezaei, N. Montaseri, "Mutual coupling reduction using plane spiral orbital angular momentum electromagnetic wave," *J. Electromag. Wav. Appl.*, 36, no. 3 (2022): 346–355.
- [17] E. Atashpanjeh and P. Rezaei, "Applying decoupling method to a dual-band antenna array for element isolation," *Model. Simul. Electr. Electron. Eng.*, 1, no. 4 (2022): 1–5.
- [18] L. Zhao, "A MIMO antenna decoupling network composed of inverters and coupled split ring resonators," *Prog. Electromagn. Res. C*, (2017): 175-183.
- [19] W. Yuan, X. Liu, H. Lu, W. Wu, and N. Yuan, "Flexible design method for microstrip bandstop, highpass, and bandpass filters using similar defected ground structures," *IEEE Access*, vol. 7, (2019).
- [20] E. Atashpanjeh, P. Rezaei, "Innovative design for mutual coupling reduction in dual-element array antennas for ISM applications using whale optimization algorithm," *Prog. Electromagn. Res. C*, 152, (2025): 121–129.
- [21] B.R. Devi, C. Niharika, A.M. Lakshmi, D. Jayaram, B. Tarun, "Design of a millimeter wave antenna using MIMO for 5G applications," *IEEE 2nd Int. Conf. Appl. Electromag., Signal Proc. Commun.*, (2021): 1–7.
- [22] A. Kumar, A. Q. Ansari, B. K. Kanaujia, J. Kishor, and L. Matekovits, "A Review on Different Techniques of Mutual Coupling Reduction Between Elements of Any MIMO Antenna. Part 1: DGSs and Parasitic Structures," *Radio Sci.*, 56, no. 3 (2021).
- [23] O. Elalaoui, M. El Ghzaoui, and J. Foshi, "Mutual coupling reduction of a two-port MIMO antenna using defected ground structure," *e-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, 8, (2024): 100557.
- [24] A. S. Adesoye, J. J. Popoola, and A. O. Fadamiro, "Mutual coupling in a collocated dipole antenna setup: a comprehensive review," *J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol.*, 8, (2022): 2458–9403.
- [25] S. Benny, S. Sahoo, "Aperture fed microstrip dual polarization wide scan phased array antenna with mutual coupling reduction," *IEEE Access*, (2024).
- [26] C. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. 2015.
- [27] V. Kothapudi, V. Kumar, "SFCFOS uniform and Chebyshev amplitude distribution linear array antenna for K-band applications," *Journal Electromagn. Eng. Sci.*, 19, no. 1 (2019): 64-70.
- [28] Y.-F. Cheng and K.-K. M. Cheng, "A novel dual-band decoupling and matching technique for asymmetric antenna arrays," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 66, no. 5 (2018): 2080–2089.
- [29] Y. Wang and Z. Du, "A wideband printed dual-antenna with three neutralization lines for mobile terminals," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62, no. 3, (2014): 1495–1500.
- [30] W. A. Awan, T. Islam, F. N. Alsunaydih, F. Alsaleem, and K. Alhassoonc, "Dual-band MIMO antenna with low mutual coupling for 2.4/5.8 GHz communication and wearable technologies," *PLoS One*, 19, no. 4, (2024): e0301924.
- [31] A. Omidvar, P. Rezaei, and E. Atashpanjeh, "Mutual coupling reduction with Peyton Turtle pattern nearfield surface for MIMO patch antenna," *Frequenz*, 77, no. 7–8 (2023).
- [32] M. Abesht, T. Azadi, and H. Oraizi, "Design and simulation of array antenna in Ku band with high gain and very low sidelobe level for space and radar applications," *Radar, Imam Hussein University*, 8, no. 2 (2020).

- [33] K. Da Xu, H. Luyen, and N. Behdad, "A decoupling and matching network design for single-and dual-band two-element antenna arrays," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 68, no. 9 (2020).
- [34] X. Zhu, X. Yang, Q. Song, and B. Lui, "Compact UWB-MIMO antenna with metamaterial FSS decoupling structure," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2017, no. 1, (2017): 115.
- [35] K.-L. Wu, C. Wei, X. Mei, and Z.-Y. Zhang, "Array-Antenna Decoupling Surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 65, no. 12 (2017): 6728–6738.
- [36] T. Jiang, T. Jiao, and Y. Li, "Array mutual coupling reduction using L-loading E-shaped electromagnetic band gap structures," *Int. J. Antennas Propag.*, (2016).
- [37] H. Qi, L. Liu, X. Yin, H. Zhao, and W. J. Kulesza, "Mutual coupling suppression between two closely spaced microstrip antennas with an asymmetrical coplanar strip wall," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 15, (2016).
- [38] Z. Qamar, L. Riaz, M. Chongcheawchamnan, S. A. Khan, and M. F. Shafique, "Slot combined complementary split ring resonators for mutual coupling suppression in microstrip phased arrays," *IET Microwav. Antennas Propag.*, 8, no. 15 (2014).
- [39] A. Habashi, J. Nourinia, and C. Ghobadi, "Mutual coupling reduction between very closely spaced patch antennas using low-profile folded split-ring resonators (FSRRs)," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 10, (2011).
- [40] M. C. Tang, S. Xiao, B. Wang, J. Guan, and T. Deng, "Improved performance of a microstrip phased array using broadband and ultra-low-loss metamaterial slabs," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 53, no. 6 (2011).