# Decoupling of Two Co-Frequency Small Patch Array Antennas Using Metasurface Mantle Cloaking for Beam Steering Applications

Reza Masoumi, Robab Kazemi\*

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran E-mails: rezamasoumi@tabrizu.ac.ir; r.kazemi@tabrizu.ac.ir

#### Short Abstract

In this study, the mantle cloaking method is utilized to eliminate strong mutual coupling between two compact co-frequency patch antenna arrays with orthogonal polarizations. The patches are reduced in size by 33% through the addition of two slots on the resonant edges, allowing a reduction in distance between elements and enabling beam steering. To mitigate the destructive effects of mutual coupling between elements, a thin metasurface cloak is placed on the top and bottom surfaces of the patches. The metasurface cloak exhibits capacitive reactance at the desired operating frequency and eliminates the inductive reactance caused by induced currents from adjacent patches, making the elements of the two arrays invisible to each other. Full-wave simulation is used to evaluate the performance of this cloak structure in terms of array radiation characteristics. Results show that adding the cloak increased array efficiency by 35% compared to the uncloaked case, with isolation between elements improving by over 24 dB at the operating frequency. Radiation patterns in the cloaked case demonstrate a 98.5% similarity to those of isolated arrays. The antenna gains in the cloaked case slightly decreased by 0.1 dB and 0.2 dB for arrays I and II, respectively, and the sidelobe levels increased by 0.5 dB and 0.2 dB compared to isolated arrays. These findings confirm that this metasurface cloak design successfully restores radiation characteristics of tightly coupled arrays similar to those of isolated arrays.

#### Keywords

Decoupling of antennas, anisotropic mantle cloaking, metasurface elliptical cloak, beam steering, polarization isolation.

#### 1- Short Introduction

Previous methods for achieving isolation between antenna elements have limitations such as large size, multilayer structure, complexity, and high manufacturing cost. Furthermore, most of these techniques are only applicable to antennas operating at different frequencies. Our paper presents a novel approach to isolating two co-frequency patch antenna arrays with orthogonal polarizations. We extended the idea of the mantle cloaking method to eliminate the cross-coupling between two closely spaced small patch antennas with the capability of beam steering. The interleaved antenna arrays can reduce the occupied space by 50% compared to two separate arrays, which is essential considering the growing demand to increase wireless communications capacity.

## 2- Proposed Work and Methodology

The aim of this study is to use a proposed cloak design for active devices, specifically antennas, to restore their radiation characteristics to those of the isolated case. The performance of the cloaking structure is evaluated by comparing the uncloaked, cloaked, and isolated arrays in terms of radiation characteristics and scattering parameters. The return loss, radiation patterns, gain, and efficiency of the cloaked antenna confirm the success of the proposed method. The edge-to-edge spacing of  $0.014\lambda_0$  between adjacent elements in the proposed configuration is much smaller than previously published works. This spacing is used to prevent the patches from connecting to each other, taking into account the manufacturing constraints, but it can theoretically be reduced to almost zero. The innovation of this research is the use of anisotropic cloaks to bypass the inherent limitations of passive cloaks. Furthermore, the cloak design is extended to a one-dimensional interleaved patch array configuration, allowing for two different phased arrays to be accommodated in the same array size.

#### 3- Conclusion

In this work, the concept of mantle cloaking using elliptical metasurfaces is proposed to isolate the polarization of two co-frequency interleaved linear patch antenna arrays. The various simulation results presented in the paper demonstrate that the specifically designed metasurfaces effectively mitigate the mutual coupling effect between closely spaced patches. The resulting cloaked antennas exhibit similar matching and radiation characteristics as isolated arrays, making them suitable for dense phased antenna arrays in dual-polarization communication applications, particularly for polarization diversity in 5G and 6G systems to prevent multipath fading. The utilization of two arrays operating at the same frequency and with orthogonal polarization enables the implementation of full-duplex communication. This configuration effectively overcomes the challenges posed by multipath fading. Furthermore, it facilitates the application of imaging sensors in the field of medicine and enables their usage in multiple input-multiple output (MIMO) systems. In complex urban environments, these arrays enhance the channel capacity, thus providing improved communication capabilities.

## 4- References

- H. M. Bernety and A. B. Yakovlev, "Cloaking of single and multiple elliptical cylinders and strips with confocal elliptical nanostructured graphene metasurface," Journal of Physics: Condensed Matter, vol. 27, no. 18, pp. 185304, 2015.
- [2] H. M. Bernety and A. B. Yakovlev, "Reduction of mutual coupling between neighboring strip dipole antennas using confocal elliptical metasurface cloaks," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 63, no. 4, pp. 1554-1563, 2015.
- [3] S. Vellucci, A. Monti, M. Barbuto, A. Toscano, and F. Bilotti, "Progress and perspective on advanced cloaking metasurfaces: from invisibility to intelligent antennas," EPJ Applied Metamaterials, vol. 8, pp. 7, 2021.

# حذف تزویج متقابل دو آرایه آنتن پچ همفرکانس با استفاده از پوشش فراسطحی برای کاربردهای چرخش پرتو

## رضا معصومى

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

## رباب كاظمى

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

# چکیدہ

در این مقاله، روش پوشش صفحهای برای حذف تزویج متقابل دو آرایه آنتن پچ فشرده همفرکانس و با قطبشهای متعامد به کار رفتهاست. ابعاد پچها با قرار دادن دو شکاف در لبههای رزونانسی نسبت به پچ معمولی ۳۳٪ کاهش یافته تا فاصله بین المانها کمتر شده و امکان چرخش پرتو فراهم شود. برای کاهش تزویج متقابل قوی بین المانها، یک پوشش فراسطح نازک روی سطوح بالا و پایین پچها قرار میگیرند. پوشش فراسطحی در فرکانس کار موردنظر راکتانس خازنی از خود نشان داده و راکتانس سلفی ناشی از جریانهای القایی از پچهای مجاور را حذف میکند، در نتیجه المانهای دو آرایه نسبت به هم نامرئی میشوند. عملکرد ساختار پوشش پیشنهادی با شبیهسازی تمامموج از نظر مشخصات تشعشعی آرایهها ارزیابی شده است. بازده آرایهها بعد از افزودن پوشش نسبت به حالت بدون پوشش ۲۵٪ پیشنهادی با شبیهسازی تمامموج از نظر مشخصات تشعشعی آرایهها ارزیابی شده است. بازده آرایهها بعد از افزودن پوشش نسبت به حالت بدون پوشش ۲۵٪ افزایش یافته و ایزولاسیون بین عناصر بیش از ط4 ۲۴ در فرکانس کار بهبود یافتهاست. الگوهای تشعشعی نیز در حالت پوششدار ۲۵/۵٪ نسبت به آرایههای مجزا افزایش یافته و ایزولاسیون بین عناصر بیش از ط5 ۴۸ در فرکانس کار بهبود یافتهاست. الگوهای تشعشعی نیز در حالت پوششدار ۲۵/۵٪ نسبت به آرایههای مجزا افزایش یافته و ایزولاسیون بین عناصر بیش از ط5 ۴۴ در فرکانس کار بهبود یافتهاست. الگوهای تشعشعی نیز در حالت پوششدار ۳۵/۵ سرد مرابه در طلای میدرا و طح لوبهای فرعی نیز به ترتیب تنها ط5 ۲/۱ و ط5 ۲/۰ کاهش و سطح لوبهای فرعی نیز به ترتیب ط5 ۵/۰ و ط5 ۲/۰ نسبت به حالت مجزا از هم افزایش نشان می دهد. نتایج حاصل، موفقیت طرح پوشش پیشنهادی در بازیابی ویژگیهای تشعشعی آرایههای درهم تنیده مشابه آرایههای مجزا از هم را تایید.

## كلمات كليدي

جداسازی آنتنها، پوشش صفحهای ناهمسانگرد، پوششهای فراسطحی بیضوی، چرخش پرتو، جداسازی قطبش

نام نویسنده مسئول: رباب کاظمی ایمیل نویسنده مسئول: r.kazemi@tabrizu.ac.ir

> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳

## ۱– مقدمه

برای جداسازی و حذف تزویج متقابل بین المانهای آنتنها از روشهای مختلفی از جمله ساختار زمین معیوب ('DGS) [(، ۲]، المانهای پارازیتی [۳، ۴]، ساختارهای باند شکاف الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> [۵]، جداکنندههای تبدیل قطبش<sup>۳</sup> [۶]، DGS های مبتنی بر فراماده [۷]، طراحی سطوح در میدان نزدیک آنتنها [۸] و بهره گیری از تعامد مدها [۹] استفاده شده است. با این حال، این روشها محدودیتهایی مانند اندازه بزرگ، ساختار چندلایه، پیچیدگی و هزینه ساخت بالا دارند. علاوه بر این، بیشتر این روشها برای آنتنهایی که در فرکانسهای متفاوت کار میکنند، قابل اجرا هستند و حذف تزویج متقابل در آنها با استفاده از فیلترهای حساس به فرکانس به دست میآید. بنابراین، این روشها برای جداسازی آنتنهای همفرکانس کاربردی نیستند.

از سوی دیگر، استفاده از پوشش<sup>۴</sup> الکترومغناطیسی برای نامرئیسازی اولین بار توسط پندری [۱۰] ارائه شد. بعدها، روشهای پنهانسازی دیگری مانند

پوشش خط انتقالی [۱۱–۱۳] و پوشش پلاسمونیکی [۱۴–۱۶] برای ساختارهای مختلف معرفی و توسعه یافتند. یک اشکال رایج چنین تکنیکهای پوشاندن، استفاده از ساختارهای فراموادی سهبعدی و حجیم است که ساخت آنها را چالش برانگیز میکند؛ همچنین ضخامت آنها اغلب بزرگتر یا قابل مقایسه با اندازه ناحیه تحت پوشش است. از طرف دیگر، پوشش صفحهای<sup>۵</sup>، یعنی پوشاندن شیء توسط یک فراسطح، در [۱۷] توسعه یافت و به دلیل وزن سبک، سهولت ساخت، هزینه کم و ساختار منعطف، جایگزین پوششهای فراماده حجیم قبلی شد. استفاده اولیه از پوشش صفحهای برای مخفی کردن اجسام غیرفعال از دستگاههای تشعشعکننده، به عنوان مثال رادارها، از طریق کاهش یا حذف پراکندگی انرژی از سطح آنها بود [۱۸].

این طرح برای پنهان کردن اجسام بزرگتر با ساختارهای پیچیده و با استفاده از پوششهای چندلایه گسترش یافت [۱۹، ۲۰]. همچنین، سطوح TM و TT دساس به قطبش برای پنهانسازی اجسامی که برای امواج تابشی TE و

<sup>&#</sup>x27; Defected ground structure

<sup>&</sup>lt;sup>r</sup> Electromagnetic band-gap structures

Polarization conversion isolators

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Cloak

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Mantle cloak

رفتار متفاوتی داشتند، استفاده شدند [۲۱، ۲۲]. اما پوشاندن آنتنها یا دستگاههای فعال با این روش نسبت به اجسام غیرفعال چالش برانگیزتر است، زیرا این پوششها بر تطبیق امپدانسی و ویژگیهای تشعشعی آنها تأثیر میگذارد. ساختار پوشش اطراف آنتن نه تنها باید امپدانس ورودی و ویژگیهای تشعشعی آن را حفظ کند، بلکه باید آن را از تشعشع کنندههای مجاور هم جدا کند. تاکنون، موفقیت در پوشاندن آنتنهای تکقطبی سیمی و چاپی [۲۳، ۲۴] و یاگی-اودا [۲۵] گزارش شده است. این آنتنها ساختار نسبتاً ساده و بهره پایینی دارند که در نتیجه گزینه خوبی برای سیستمهای ارتباطی نسل جدید مانند شبکههای موبایل ۵۵ و ۶۵ نیستند.

علاوه بر پوششهای خطی، پوششهای غیرخطی ساخته شده از فراسطوح بارگذاری شده<sup>9</sup> با عناصر غیرخطی مانند دیودها و قطعات فعال معرفی شدهاند که با توجه به توان ورودی [۲۶–۲۸] یا شکل موج تابشی [۲۹] در حالت روشن/خاموش عمل میکنند. تاکنون تنها آنتنهای تکقطبی ساده توسط پوششهای غیرخطی پوشانده شدهاند. هرچه ساختار آنتن پیچیدهتر میشود، مودهای مراتب بالاتر تحریک شده و بر پراکندگی کلی ساختار تأثیر میگذارند و در نتیجه پنهان کردن آن توسط پوششهای تکلایه امکان پذیر نیست [۳۰]. علاوه بر این، قطعات فعال بارگذاری شده و دیودها پهنای باند فرکانسی محدودی دارند. این چالشها باید حل شوند تا پوششهای غیرخطی کاربردی تر شوند. در این پژوهش، تمرکز بر روی طراحی پوشش خطی بوده و به علت مشکلات ذکر شده، از پوششهای غیرخطی استفاده نشدهاست.

در این مقاله، جداسازی الکترومغناطیسی دو آرایه آنتن پچ با فرکانس کاری یکسان و قطبش های متعامد که المانهای آنها با فاصله خیلی کم از هم قرار دارند، را بررسی کرده و ایده پوشش صفحهای و مفهوم حذف پراکندگی را برای جداسازی و حذف تزویج متقابل بین آنتن های پچ با فاصله بسیار کم، گسترش می دهیم. در روش پوشش صفحهای، بیشتر نامرئی سازی آنتن ها نسبت به همدیگر با حذف حداکثری تزویج بین آنها مدنظر است و با استفاده از این روش دو آرایه آنتن از نظر تشعشعی همدیگر را نمی بیند.

با توجه به اینکه تقاضای روزافزونی برای افزایش ظرفیت ارتباطات بی سیم وجود دارد که مستلزم قرار دادن آنتنهای آرایهای فشرده در سیستمهای با ابعاد بسیار کوچک مانند سیستمهای چند ورودی- چند خروجی (MIMO) رادارهای تشخیص، ارتباطات سیار و ... هستند، استفاده از آرایههای آنتن درهمتنیده میتواند باعث کاهش ۵۰ درصدی فضای اشغال شده نسبت به دو آرایه مجزا شود. در این پژوهش، فاصله لبه تا لبه بین عناصر دو آرایه به میزان قابل توجهی کاهش یافته و به کمتر از ۲۰۱۵ (۲۰۱۳ سال ۲۰/۵۰) رسیده که بسیار مراز آرایههای طراحی شده قبلی است. تلفات بازگشتی و حذف تزویج متقابل بین عناصر آرایهها با استفاده از ساختار پوشش پیشنهادی به طور قابل توجهی بهبود یافته است و عملا دو آرایه آنتن مستقل از هم کار میکنند. ویژگیهای تشعشعی آرایهها تقریباً مشابه دو آرایه مجزا از هم بوده و عملکرد چرخش پرتو در این دو آرایه آنتن فازی بعد از افزودن ساختار پوشش حفظ شده است. چنین طرحی گزینه مناسبی برای پیادهسازی ساختارهای ارتباطی فشرده است.

# ۲- روش طراحی

ابتدا دو آرایه آنتن پچ با قطبش متعامد به طور مستقل بر روی زیرلایه رزین با F = f مطابق شکل ۱(الف) و (ب) طراحی شده f = r mm است. ابعاد آنتنهای پچ مستطیلی با تغذیه کابل کواکسیال برای کار در مود Sub-Sub- ارمان در  $f_0 = 0/V0$  GHz در  $TM_{01}$  در  $f_0 = 0/V0$  GHz راده موایلی GHz و GHz و GHz و GHz

' Loaded metasurface

همچنین Wi-Fi استفاده می شود. مزیت اصلی فرکانس های باند Sub-6GHz در مخابرات ۵G این است که می تواند حجم داده های بیشتری را نسبت به سیگنال های ۴G در محدوده ۲/۴ GHz حمل کند. برای کاهش ابعاد آنتن، دو شکاف در لبه های رزونانسی پچها ایجاد می شود که باعث افزایش مسیر جریانهای سطحی شده و فرکانس آنتن را به سمت فرکانس های پایین منتقل می کند. در نتیجه، ابعاد پچها نسبت به پچ مستطیلی ساده، ۳۳٪ کاهش می یابد. این کاهش اندازه باعث می شود فاصله مرکز تا مرکز عناصر هر دو آرایه به کمتر از نصف طول موج رسیده و آنتن برای ساختارهای آرایه فازی که مستلزم چرخش پرتو در فضا هستند، مناسب باشد.

عناصر آرایه اول در صفحه H و عناصر آرایه دوم در صفحه E چیده شدهاند تا قطبش های متعامد نسبت به هم داشته باشند. برای کاهش امواج سطحی، از یک زیرلایه نازک با برقراری شرط  $\sqrt{\epsilon_r} / \sqrt{\epsilon_r}$  استفاده شده است [۳۱]. در این چیدمان، الگوی تشعشعی آرایه I (عناصر ۱ تا ۴) در صفحه  $^0 = \varphi$ و برای آرایه II (عناصر ۵ تا ۸) در صفحه  $^9 90 = \varphi$  است. در پیکربندی درهم تنیده، مطابق شکل ۱(پ)، فاصله لبه تا لبه بین عناصر مجاور ۰/۰۱۴۸ (ساله ۲۷۵

جدول ۱- ابعاد دو آرایه آنتن پچ با قطبش متعامد

پارامتر	$W_p$	$L_p$	$W_s$	Ls	S	$l_1$	$l_2$	$l_3$
اندازه (mm)	1./40	۸/۵۴	93/77	22/40	٠/٧۵	۴/۷۰	۳/۳۶	۳/۰۲



شکل ۱- پیکربندی دو آرایه پچ. (الف) آرایه I در چیدمان صفحه H، (ب) آرایه II در چیدمان صفحه E، (پ) دو آرایه در هم تنیده بدون پوشش

با توجه به فاصله نزدیک بین آنتنهای پچ، هر عنصر تغذیه شده، جریان سطحی قابل توجهی را بر روی عناصر مجاور القا میکند که این جریان به عنوان یک منبع ثانویه عمل میکند. تابش (پراکندگی) ناشی از این منبع ثانویه بر روی تطبیق امپدانسی و ویژگیهای تشعشعی آنتن پچ اولیه تأثیر میگذارد. از این رو، به منظور از بین بردن تزویج متقابلِ نامطلوبِ قوی بین دو آرایه درهم، یک پوشش صفحهای بیضوی (فراسطح) بر روی همه عناصر استفاده میشود تا

این پراکندگی ناخواسته را حذف کند. جهت قرارگیری پوشش احاطه کننده روی هر آنتن پچ نه تنها امکان حذف پراکندگی ناخواسته را فراهم میکند، بلکه مشخصات تشعشعی آنتنهای پوشش دار را نیز تخریب نمی کند.

به عنوان مثال، وقتی پچ *ن*ام با کابل کواکسیال تغذیه و تشعشع می کند، بخشی از این تشعشع به پچ *ن*ام کناری تزویج می شود. لذا یک پوشش بیضوی فراسطح که به طور خاص برای عنصر *ن*ام طراحی شده است، روی آن قرار می گیرد تا پراکندگی ناشی از این جریان سطحی القایی ناشی از تشعشع عنصر *ن*ام در فرکانس کاری عنصر *ن*ام را، که در این مورد هر دو آنتن دارای فرکانس کاری یکسان هستند، خنثی کند. پوشش فراسطحی بسیار نازک که پچ *ن*ام را احاطه می کند، یک جریان سطحی در فاز مخالف با جریان سطحی القا شدهٔ ناخواسته ایجاد می کند. این جریان، منجر به سرکوب جریان القا شده ناشی از تزویج متقابل در "آنتن پوشانده شده" می شود. بنابراین، تزویج بین پچهای مجاور حذف شده و بر امپدانس ورودی و تشعشع عناصر تأثیر نمی گذارد. در این حالت، تنها جریان های تولید شده توسط منبع تغذیه در تابش میدان دور آنتنها نقش دارند.

## ۲-۱- محاسبه فرم بسته روابط پراکندگی آنتنهای پچ

چون در تابش عمودی میدان الکتریکی به پچ، غالبا مدهای TM تشعشع/پراکنده می شوند، لذا در این کار از روابط مربوط به مود TM برای محاسبه پارامترهای ساختار پوشش صفحهای استفاده می شود. زمانی که میدان الکتریکی بر آنتن پچ تابیده میشود، جریانهای سطحی بر روی آن القا میشود و این جریانهای القایی مثل یک منبع ثانویه، ایجاد پراکندگی میکنند. جریانهای القایی و پراکندگی ناشی از آنها را با راکتانس سطحی معادل آنتن پچ، X ، مدل می کنیم. اگر میدان الکتریکی تابشی عمود بر سطح آنتن و پهنای باند آنتن نسبتا باریک باشد، ابعاد اولیه ساختار پوشش که از فرمول های تحلیلی مربوط به پوشش یک استوانه فلزی بینهایت بدست میآیند، برای کاهش پراکندگی استوانه فلزی با طول محدود نیز مناسب است و نیاز به تحلیلهای عددی گسترده و زمانبر نیست [۳۲]. بهینهسازی جزئی با تغییر پارامترها به ميزان ۵٪± حول مقادير اوليه آنها، منجر به حذف كامل تزويج متقابل بين پچ های مجاور و همچنین بازیابی مشخصات تشعشعی آنها مشابه پچ منفرد می شود. بنابراین، کل روش طراحی عملی و سادهتر می شود و از محاسبات پیچیده برای به دست آوردن مقدار بهینه برای  $X_s$  استوانه محدود، که نیاز به حل مسئله پراکندگی با روشهای عددی تکرارشونده دارد، اجتناب میشود.

برای طراحی ساختار پوشش جهت حذف پراکندگی آنتن پچ iم، ابتدا پچ مسطح را به صورت یک استوانه بیضوی فلزی در نظر می گیریم به طوری که قطر کوچک آن به صفر میل می کند (معادل ضخامت پچ). این استوانه فلزی به صورت هممرکز با یک استوانه بیضوی دی الکتریک نازک با گذردهی نسبی  $F_{r1}$ پوشانده می شود. این پوشش نازک دی الکتریک به عنوان یک فاصله بین آنتن پچ و نوارهای فراسطحی فلزی پوشش عمل می کند که در ادامه موردبحث قرار خواهد گرفت. با تقریب شبه استاتیکی و در فرکانس  $\omega$ ، راکتانس خازنی بهینه موردنیاز برای خنثی کردن جریانهای سطحی القا شده روی استوانه بیضوی فلزی با پوشش دی الکتریک از رابطه زیر بدست می آید [۳]:

$$X_{opt} = -\omega\mu F \frac{(u_0 - u_1)\cosh u_0}{1 + \left(q_0(u_0 - u_1) + q_1\left(u_1 + \frac{1}{2}Ln(q_1)\right)\right)\sinh 2u_0}$$
(1)

که در آن  $k_1 = k_0 + k_1 +$ 

 $u_0 = \tanh^{-1}\left(\frac{b_0}{a_0}\right)$  مرکز،  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی ماده دیالکتریک،  $\left(\frac{b_0}{a_0}\right)$  نفوذپذیری مغناطیسی ماده دیالکتریک، و کوچک استوانه بیضوی دی دیالکتریک، و  $a_0$  ،  $u_1 = \tanh^{-1}\left(\frac{b_1}{a_1}\right)$  دیالکتریک، و  $a_1$  و  $a_1$  به ترتیب قطرهای بزرگ و کوچک استوانه بیضوی فلزی فلزی هستند. بیشترین کاهش پراکندگی ناشی از استوانه بیضوی فلزی پوشیده با دیالکتریک زمانی بدست میآید که نقاط کانونی پوشش بیضوی فراستا فراسطح در لبههای پچ مسطح قرار گیرد [۲۲]. در این صورت خواهیم داشت:  $a_0^2 = b_0^2 + a_1^2$ 

در اینجا  $P_1$  برابر با عرض پچ ( $W_1$ ) و  $W_1$  خخامت پچ است که به سمت صفر میل می کند (سطح نازک فلزی). چون X ناشی از جریانهای القایی روی پچ، دارای راکتانس سلفی است، لذا  $X_{opt}$  لازم برای حذف آن همانطور که در رابطه (۱) دیده می شود، باید دارای راکتانس سطحی منفی باشد، لذا برای تحقق آن باید فراسطحهای خازنی برای طراحی پوشش در نظر بگیریم. بدین منظور، از عناصر فراسطحی فلزی زیر – طول موج<sup>۷</sup> با ساختار خمیده و تک بعدی، مانند نوارهای موازی نشان داده شده در شکل ۲ استفاده می کنیم.

فراسطح انتخابی، سادهترین ساختاری است که قابلیت ایجاد راکتانس خازنی موردنیاز برای حذف تزویج القایی (معادل راکتانس سلفی) بین المانهای آرایه را داراست. پیچیدگی ساختار به نحوی در نظر گرفته شده که به راحتی قابل پیادهسازی است. در ادامه روابط مربوط به محاسبات میدانهای ناشی از جریانهای القایی روی المانهای مجاور و میدانهای خازنی جبرانساز ناشی از استفاده از پوشش روی آنتنها ارائه می شود.

چون آنتن پچ معادل یک استوانه بیضوی در نظر گرفته شده که قطر کوچک سطح مقطع آن تقریبا صفر است (ضخامت پچ)، تحلیل مسئله با روش جداسازی متغیرها و معادلات زاویهای و شعاعی معروف ماتیو (Mathieu) انجام میشود [۳۰]. میدانهای الکتریکی تابشی (incident E-field) و پراکنده شده ( E-field) بر حسب توابع فرد و زوج متیو در مختصات بیضوی به ترتیب طبق روابط (۳) و (۴) بیان می شوند [۳۰]:

$$\begin{split} E_{z}^{i} &= \sqrt{8\pi} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} \frac{J_{pm}(q_{0}, u, n)}{N_{pm}(q_{0}, n)} \\ &\times S_{pm}(q_{0}, v, n) S_{pm}(q_{0}, \varphi, n) \end{split} \tag{(7)}$$

$$E_{z}^{s} = \sqrt{8\pi} \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} \alpha_{pm}^{(n)} H_{pm}^{(1)}(q_{0}, u, n)(q_{0}, u, n) \times S_{pm}(q_{0}, v, n) S_{pm}(q_{0}, \varphi, n)$$
(\*)

که در آن  $S_{pm}(q_0,u,n)$  تابع ماتیو شعاعی نوع اول،  $S_{pm}(q_0,v,n)$  تابع متیو زاویه ای،  $N_{pm}(q_0,n)$  ثابت نرمالیزه کردن، u فاصله شعاعی، v مختصات زاویه ای و F فاصله کانونی استوانه بیضوی است.  $F^2 \frac{F^2}{4}$ ،  $q_0 = k_0^2 \frac{F^2}{4}$  است. استوانه بیضوی است.  $H_{pm}^{(1)}(q_0,u,n)$ زاویه محمود ( $H_{pm}^{(1)}(q_0,u,n)$  مناخده موج پراکنده شده (دور شونده) از سطح جسم است و  $\alpha_{pm}^{(n)}$  ضرایب مجهول پراکندگی هستند. بعد از بدست آوردن میدانهای الکتریکی، میدانهای مغناطیسی تابشی

ببت از بعشت اوری میداریدی اعظریتی، میداریدی معاقبیتی تبسی (incident H-field) و پراکنده شده (scattered H-field) با استفاده از معادلات ماکسول محاسبه میشوند. با اعمال شرایط مرزی در فصل مشترک استوانه فلزی و پوشش، ضرایب مجهول  $\alpha_{pm}^{(n)}$  بدست آمده و سطح مقطع پراکندگی کل (SCS) از روابط زیر تعیین میشود [۳۰]:

$$\sigma_{total} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \sigma_{2D} \left( v \right) dv \tag{\Delta}$$

$$\frac{\sigma_{2D}}{\lambda} = |\sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{8\pi} j^{-2n} \alpha_{pm}^{(n)} S_{pm}(q_0, \nu, n) S_{pm}(q_0, \varphi, n)|^2$$
(\$

طبق رابطه (۶) برای حذف پراکندگی کل، ضریب پراکندگی هر مود ( $\alpha_{pm}^{(n)}$ )، صفر در نظر گرفته شده و سپس راکتانس سطحی موردنیاز برای حذف پراکندگی هر مود محاسبه میشود. در تقریب شبهاستاتیک، راکتانس سطحی موردنیاز برای حذف پراکندگی مود اول، که عامل غالب در پراکندگی استوانه بیضوی است، به صورت یک فرمول مشخص و بسته به دست میآید. در تابش مود TM که مود غالب تشعشعی در آنتنهای پچ است، SCS یک استوانه با طول محدود L (3D) به SCS یک استوانه با طول بینهایت (2D) طبق رابطه (۷) مرتبط میشود [۳۳]:

$$\sigma_{total} = \frac{1}{4\pi} \int \sigma_{3D} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_{\varphi=0}^{\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} \sigma_{3D} \sin\theta d\theta d\varphi \tag{(Y)}$$

$$\sigma_{3D} = \sigma_{2D} \frac{2L^2}{\lambda} \sin^2(\theta_s) \operatorname{sinc}(\frac{k_0 L}{2} (\cos(\theta_i) + \cos(\theta_s))$$
(A)

که در آن i زاویه برخورد (تابش) و  $s^{0}$  زاویه پراکندگی است. در تحلیل ما، زاویه برخورد ۹۰ درجه (تابش عمود) در نظر گرفته شده است. همانطور که در رابطه (۶) مشاهده می شود، SCS استوانههای متناهی و نامتناهی یکسان نبوده، اما متناسب هستند. در نتیجه، با کاهش SCS استوانه نامتناهی (مورد ۲ بعدی)، SCS استوانه محدود (مورد ۳ بعدی) نیز کاهش می یابد. لذا می توان s X لازم برای حذف اولین مود پراکندگی حالت نامتناهی را با تقریب برای حالت محدود نیز استفاده کرد. مقدار s X بهینه تحلیلی که "به طور کامل" موجب حذف پراکندگی مود اول در حالت ۲ بعدی (بی نهایت) می شود، باعث کاهش "بخشی" از پراکندگی در حالت ۳ بعدی (متناهی) می شود. سپس با بهینه سازی کامپیوتری، مقدار نهایی s X لازم برای حذف کامل پراکندگی استوانه متناهی

راکتانس سطحی این عناصر فراسطحی در فرکانس ۵۵ با استفاده از امپدانس شبکهای<sup>۸</sup> تحلیلی ارائه شده در [۳۵، ۳۵] بهصورت زیر به دست می آید:

$$X_{s} = -\frac{\eta_{0} c \pi}{\omega(\varepsilon_{r1} + 1)D} \cdot \frac{1}{Ln \csc\left(\frac{\pi g}{2D}\right)}$$
(9)

که در آن  $\eta_0$  امپدانس فضای آزاد، r سرعت نور در فضای آزاد،  $r_{r1}$  گذردهی نسبی ماده دی الکتریک و g فاصله بین نوارهاست. D و w مطابق شکل ۲ (الف) به تر تیب دوره تناوب و عرض نوارهای پوشش را نشان می دهند و به عنوان پارامترهای شبکه شناخته می شوند. نوارها ناهمسانگرد هستند و در نتیجه ساختار پوشش، x های متفاوتی برای امواج تابشی با قطبشهای متعامد و (ابطه (۹) ساختار پوشش، x معادل از رابطه (۹) بدست می آید، در حالی که برای پلاریز اسیون کاری آنتن، یعنی وقتی میدانهای را بدست می آید، در حالی که برای پوشش با شد، x معادل از رابطه (۹) مطابق متفاوتی را اکتریکی تابشی در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادل از رابطه (۹) مطابق می معاوتی را بطه را ای بدست می آید، در حالی که برای پوشش باشد، x معادل از مالاً منهاوتی را الکتریکی تابشی در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً متفاوتی را الکتریکی تابشی در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً متفاوتی را الکتریکی تابشی در امتداد نوارهای می می (ای می دو ای ای الکتریکی تابش در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً متفاوتی را الکتریکی تابش در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً متفاوتی را الکتریکی تابش در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً معلواتی را الکتریکی تابش در امتداد نوارهای پوشش باشد، x معادار کاملاً منه او می را

$$X_{s} = \frac{\omega \eta_{0} D}{2c \pi} \ln \csc(\frac{\pi w}{2D}) \tag{(1)}$$

پلاریزاسیون کاری پچ پوشانده شده و جهت میدان E بر روی نوارهای

پوشش در شکل ۲- (ث) و (ج) نشان داده شده است. به عنوان مثال،  $E_{ii}$  میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*ام است،  $E_{ii}$  میدان الکتریکی تزویج شده از عنصر *i*ام به عنصر *i*ام میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*ام است،  $E_{ii}$  میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*ام ماست. هنگامی که پچ *i*ام در حال تابش است، میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*رام است. هنگامی که پچ *i*ام در حال تابش است، میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*رام است. هنگامی که پچ *i*ام در حال تابش است، میدان الکتریکی خودیِ عنصر *i*رام است. منگامی که پچ *i*ام در حال تابش است، میدان الکتریکی آن ( $E_{ij}$ ) عمود بر نوارهای پوشش مربوط به پچ *i*رام است و مقدار X مطلوب (برای قطبش متعامد) به دست میآید. اما وقتی پچ *i*رام در حال تابش است، میدان میدان الکتریکی آن ( $E_{ij}$ ) موازی با نوارهای پوشش خود است و مقدار S مطلوب (برای قطبش متعامد) به دست میآید. اما وقتی پچ *i*رام در حال تابش است، است، است، است، است، میدان الکتریکی آن ( $E_{ij}$ ) موازی با نوارهای پوشش خود است و مقدار معدار S منظوتی (برای قطبش کاری) به دست میآید. با تنظیم پارامترهای پوشش (D، S منه در D، S و دامت آورد. شایان ذکر مندان ای میدان الکتریکی آن ( $E_{ij}$ ) موازی با نوارهای پوشش خود است و مقدار معدار معنوبی ( $E_{ij}$ ) موازی از معیط موردنیاز را بدست آورد. شایان ذکر مناور D، S و  $E_{ij}$ ، میتوان راکتانس سطح موردنیاز را بدست آورد. شایان ذکر است که D باید به عنوان کسری از محیط بیضی انتخاب شود تا تعداد نوارها معدد صحیحی به دست آید. به عنوان نمونه، با انتخاب تعداد A، ورار، مقادیر مناس B و  $E_{ij}$  از روابط ذکر شده بدست میآید.



شکل ۲- (الف) نمای بالا و (ب) نمای جانبی پوشش و نوارهای فراسطحی روی پچ آرایه I؛ (پ) نمای بالا و (ت) نمای جانبی پوشش و نوارهای فراسطحی روی پچ آرایه II؛

قطبشهای کاری و متعامد و جهت میدانهای الکتریکی (ث) پچ نام و نوارهای پوشش خودی ، (ج) پچ نِام مجاور و نوارهای پوشش خودی

با توجه به رابطه (۹)، ساختار پوشش به صورت یک خازن عمل میکند و ظرفیت آن با افزایش  $F_1$  و کاهش g، افزایش مییابد. برای ساختار پیشنهادی فوق، در قطبش متعامد، مقدار  $X_s$  برابر با ۴۵۱۵- بدست میآید، در حالی که برای قطبش کاری آنتن، برابر با ۱۳/۸۴۵+ است که معادل اندوکتانس بسیار

<sup>&</sup>lt;sup>^</sup> Grid-impedance

پایین nH است. در نتیجه، پوشش زمانی که خود آنتن در حال تشعشع است، از دید آنتن تقریباً نامرئی است، ولی در قطبش متعامد و هنگام تشعشع آنتن مجاور، عملکرد خازنی از خود نشان میدهد. در هنگام تغذیه آنتن نام، نوارهای پوشانندهٔ پچ *ز*ام مستقیماً تغذیه نمیشوند، اما تشعشع از پچ *ن*ام مجاور، یک جریان سطحی را هم بر روی آن نوارها و هم بر روی خود پچ *ز*ام القا می کند. جریان القایی روی نوارهای پوشش با جریان ناخواسته القایی روی پچ دارای اندازه یکسان ولی با فاز مخالف هستند، به این صورت که فاز یکی از جریانها اندازه یکسان ولی با فاز مخالف هستند، به این صورت که فاز یکی از جریانها  $\phi$ + و دیگری  $\phi$ - است. بنابراین، این جریانها اثر همدیگر را خنثی کرده، لذا پراکندگی نامطلوب حذف شده و اثر تزویج بین پچهای *ن*ام و *ز*ام مجاور کاهش می یابد.

نوارهای پوشش فقط باید جریان با فاز مخالف<sup>۹</sup> فوقالذکر را ایجاد کنند و نباید در فرکانس کاری آنتنها رزونانس کنند. اگر طول نوارها برابر با طول پچ (نزدیک 2/*۸*) باشد، آنها نیز شروع به رزونانس کرده و عملکرد تشعشعی آنتن را مختل می کنند. برای جلوگیری از این رزونانسهای مخرب، طول نوارها کمی کوچکتر از طول پچ انتخاب می شود. این اختلاف طول با پارامتر "*R*" در شکل ۲- (الف) نشان داده شدهاست.

در این کار، چون پوشش در قطبش کاری خود آنتن تقریباً نامرئی است، آنتن پچ پوشش خودی را "نمی بیند" و مانند یک پچ ساده که روی یک زیرلایه زمین شده چاپ شده است، عمل می کند. بنابراین، لازم است که تنها پچ فلزی با پوشش مناسب پوشانده شود، نه کل ساختار شامل زیرلایه و صفحه زمین و این موضوع در [۳۶] برای آنتن های تکقطبی چاپی که دارای صفحه زمین و زیرلایه نیز هستند، نشان داده و اثبات شده است. شایان ذکر است که با قرار دادن نصف پوشش در داخل زیرلایه، ضخامت سازه پوشش به حداقل می رسد. روند کلی طراحی در زیر به صورت خلاصه آمده است. در تعیین قطر استوانه بیضوی، نوع ماده دی الکتریک ( $\mathcal{E}_{r1}$ )، فاصله و دوره تناوب نوارها، محدودیت های چاپ سهبعدی نیز در نظر گرفته می شود. این ابعاد برای به حداکثر رساندن حذف میدانهای تزویج، ترکیب می شوند:

- ا.  $a_1 = w_1 = b_1 = 0$  طول رزونانسی آنتن پچ در فرکانس کاری آن و  $b_1 = 0$  ضخامت پچ است.
- h=7 mm برای  $b_0/2$  توسط ضخامت زیر لایه که در اینجا  $b_0$  مقدار برای  $b_0/2$  توسط ضخامت زیر لایه که در اینجا  $a_0$  است، محدود می شود. از سوی دیگر، اگر  $b_0 = t/A$  mm رابطه (۲) بسیار بزرگ خواهد شد. بنابراین  $b_0 = t/A$  mm رابطه (۲) بسیار بزرگ خواهد شد. بنابراین مقادیر در رابطه (۱)،  $\Omega$  از رابطه (۲) محاسبه می شود. با جایگذاری این مقادیر در رابطه (۱)،  $\Omega$  از رابطه (۲) محاسبه می آید. امپدانس شبکهای تحلیلی ( $x_s$ ) رابطه (۹) برابر ( $Y_s$  قرار داده می شود.
- ۳. با انتخاب تعداد ۸ عدد برای نوارهای پوشش، تناوب نوارها (D) از تقسیم محیط بیضی به این عدد بدست میآید.  $\mathcal{E}_{r_1}$  نیز با توجه به مواد در دسترس برای دستگاه چاپ سهبعدی، ۲/۲ است. با داشتن D و  $\mathcal{E}_{r_1}$ ، پارامتر باقیمانده رابطه (۹) یعنی g، برای به دستیابی به  $\mathcal{E}_{s}$  = -۴۵۱۵ رابطه (۹) یعنی g، برای به دستیابی به
- ۴. R به گونهای انتخاب می شود که فرکانس رزونانس نوارهای فراسطح با فرکانس رزونانس آنتنهای پچ همپوشانی نداشته باشد و مقدار مناسب آن با بهینه سازی به دست می آید.

شکل ۳- (الف)، لایههای مختلف آنتن پچ پوشیدهشده و شکل ۳- (ب)، دو آرایه پوشیدهشده با فرکانس کاری یکسان و پلاریزاسیون متعامد را نشان میدهد. ساختار پوشش دارای نوارهای فلزی است که بر روی لایههای نازک دیالکتریک (قرمز رنگ) چاپ شده و پچ فلزی بین لایههای بالا و پایین یکسانِ پوشش قرار گرفتهاست. سپس، پچ به همراه پوشش داخل زیرلایه زمین شده

(سبز رنگ) قرار میگیرند. برای تغذیه آنتن نیز از یک کابل کواکسیال که به صفحه زمین متصل است، استفاده میشود. ابعاد بهینه پچهای پوشیده شده در جدول ۲ خلاصه شدهاست.





جدول ۲- پارامترهای طراحی آنتن پچ پوشیده شده

پارامتر	$\varepsilon_{r1}$	g	D	<i>a</i> <sub>0</sub>	$b_0$	$a_1$	$b_1$	R
مقدار (mm)	۲/۲	١/٩١	۲/۹۱	۱۰/۸۲	۲/۸	۱۰/۴۵	0	•/۵

۳– نتايج

# ۳–۱– تطبیق امپدانس آنتن و تلفات بازگشتی

دو آرایه آنتن پچ با فرکانس کاری مشتر ک در حالت مجزا از هم (شکل ۱-(الف) و (ب))، آرایههای درهم تنیده بدون پوشش (شکل ۱- (پ)) و آرایه های درهم تنیده پوششدار (شکل ۳- (ب)) شبیهسازی شدهاند. با استفاده از نرم افزار CST Microwave Studio، ضرایب بازگشتی عناصر دو آرایه مجزا و آرایه های بدون پوشش درهم تنیده به ترتیب در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده میشود، به دلیل تزویج قوی بین عناصر دو آرایه که با فاصله بسیار نزدیک نسبت به هم چیده شدهاند، امپدانسهای ورودی آنتنها در پیکربندی بدون پوشش تغییر کرده و ضرایب بازگشتی آنها نسبت به حالت ایزوله آرایهها به طور کامل تخریب میشود.



<sup>9</sup> Anti-phase



شکل ۴- ضرایب بازگشتی شبیهسازی شده عناصر (الف) آرایه I و (ب) آرایه II در حالت مجزا از هم



شکل ۵- ضرایب بازگشتی شبیهسازی شده عناصر (الف) آرایه I و (ب) آرایه II در حالت درهم تنیده بدون پوشش

ضرایب بازگشتی عناصر دو آرایه پوششدار درهم تنیده (شکل ۳- (ب)) در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان میدهد که تطبیق امپدانس برای هر دو آرایه بازیابی شده، یعنی در این حالت امپدانس ورودی عناصر آرایهها مشابه حالت مجزا از هم است. زیرا نتایج آرایههای پوششدار مشابه نتایج حالت مجزا از هم نشان داده شده در شکل ۴ هستند.





شکل ۶- ضرایب بازگشتی شبیهسازی شده عناصر (الف) آرایه I و (ب) آرایه II در حالت درهم تنیده پوششدار

# **۲-۳** تزویج متقابل بین عناصر آرایهها

شکل ۷ جریان سطحی عناصر دو آرایه را در حالتهای مختلف زمانی که فقط عناصر آرایه I (شماره ۱ تا ۴) تغذیه شده و عناصر آرایه II تطبیق هستند، نشان میدهد. تشعشع این عناصر، مقداری جریان سطحی بر روی عناصر آرایه II (۵ تا ۸) القا میکند. این جریانهای سطحی القایی ناخواسته بر روی عناصر آرایه II را میتوان با جریان سطحی با مخالف فاز تولید شده توسط ساختار پوشش خنثی کرد. شکل ۷- (الف) جریان سطحی آرایه تغذیه شده I را در حالت تکآرایهای نشان میدهد. شکل ۷- (ب) و (پ) نیز به ترتیب جریان سطحی دو آرایه درهم تنیدهٔ بدون پوشش و پوششدار را نشان میدهند.



شکل ۷- جریانهای سطحی عناصر الف) آرایه I وقتی در حالت مجزا است، ب) دو آرایه بدون پوشش درهم تنیده زمانی که فقط آرایه I تغذیه میشود و آرایه II در تطبیق امپدانسی است، ج) دو آرایه پوششدار درهم تنیده زمانی که فقط آرایه I تحریک میشود و آرایه II در تطبیق امپدانسی است

همانطور که در شکل ۲- (پ) مشاهده می شود، جریان با فاز مخالف پوشش باعث تضعیف تزویج بین دو آرایه شده و جریان سطحی القایی ناخواسته بر روی عناصر آرایه II ناشی از تشعشع عناصر آرایه I را خنثی می کند. در حالت دیگر، زمانی که آرایه II تغذیه شده و آرایه I تطبیق است، نیز رفتار مشابهی مشاهده می شود که در اینجا برای اختصار نشان داده نشدهاست. هنگامی که دو آرایه به طور همزمان تغذیه می شوند، هم جریانهای خودی (یعنی جریانهایی که از منبع تغذیه می آیند) و هم جریانهای القایی روی عناصر وجود دارد. چون که جریانهای خودی بسیار قوی تر از جریانهای القایی هستند، کاهش جریانهای القایی به دلیل وجود پوشش به صورت چشمی قابل تشخیص نیست. اما زمانی

كه تنها يك آرايه تغذيه مي شود، كاهش جريان القايي واضحتر است.

تزویج متقابل بین عناصر مرکزی دو آرایه در پیکربندیهای مجزا از هم، بدون پوشش و پوششدار در شکل ۸ مقایسه شدهاست. همانطور که در شکل ۵ نیز دیده میشود، در آرایههای بدون پوشش با فاصله کم، وجود تزویج متقابل قوی بین عناصر، بر امپدانس ورودی آنتنها تأثیر میگذارد و باعث کاهش تطبیق امپدانسی قابل توجهی (افت dB ۱۵) میشود. در شکل ۸- (الف) و (ب)، بر روی آرایههای پوشیده شده I و II، بهبود قابل توجهی در حذف تداخل بین عناصر همان آرایه مشاهده میشود. در شکل ۸- (پ)، تزویج متقابل بین عناصر کنارهم از آرایههای I و II قبل و بعد از پوشانده شدن مقایسه شده است.



شکل ۸- تزویج متقابل شبیهسازی شده بین عناصر مرکزی دو آرایه در پیکربندیهای مجزا از هم و با/ بدون پوشش. (الف) تزویج بین عناصر مرکزی آرایه I (S23)، (ب) تزویج بین عناصر مرکزی آرایه II عناصر مرکزی دو آرایه درهم (S40)، ج) تزویج متقابل بین عناصر مجاور و مرکزی دو آرایه درهم تنیده (S40)

برای اختصار، فقط تزویج بین نزدیکترین عناصر، و در نتیجه با بالاترین میزان تزویج مقایسه شده است. در پیکربندی پوششدار، حذف تداخل بین نزدیکترین عناصر در مقایسه با حالت بدون پوشش، حداقل Ho dB بهبود یافته است. در فرکانس کار GHz GHz–*و* مقدار تزویج با قرار دادن پوشش حتی بهتر از ساختار مجزا از هم آرایهها بوده و به کمترین مقدار خود رسیده است.

# ۳-۳- مشخصات تشعشعی

در این بخش، اثر تزویج متقابل و ساختار پوشش روی مشخصات تشعشعی آرایهها را بررسی میکنیم. الگوهای تشعشعی بهره برای هر دو آرایه در سه

حالت مجزا از هم، بدون پوشش و پوشش دار در شکل ۹- (الف) و (ب) مقایسه شده است.

مولفه های پلاریزاسیون اصلی (Co-pol) و پلاریزاسیون متقاطع (-Cross pol) الگوی تشعشعی هر دو آرایه که دارای قطبش متعامد هستند، در حالت مجزا از هم و پوشش دار در شکل ۹ و ۱۰ مقایسه شدهاند. در شکل ۹ مشاهده می شود که شکل پرتو هر دو آرایه پوشش دار در قطبش کاری خود دقیقا مشابه حالت مجزا از هم می باشد. در نتیجه حذف کامل تزویج بین دو آرایه توسط پوشش صفحهای پیشنهادی صورت گرفته و حضور دو آرایه در مجاورت بسیار نزدیک یکدیگر، اثر مخرب بر شکل پرتو و در نتیجه خلوص قطبش دو آرایه نداشتهاست. یعنی بعد از افزودن لایه پوشش، دو آرایه از نظر تشعشعی نسبت به هم نامرئي هستند. تعامد فيزيكي دو آرايه منجر به افزايش شديد سطح مولفه پلاریزاسیون متقاطع (Cross-pol) در حالت بدون پوشش می شود. مولفه پلاریزاسیون متقاطع برای هر دو آرایه در هر سه حالت در شکل ۱۰ مقایسه شده است. سطح مولفه پلاریزاسیون متقاطع برای هر دو آرایه در آرایههای مجزا و یوششدار، حدود ۴۰dB پایین تر از قطبش اصلی است که در حالت بدون پوشش، این مولفه برای هر دو آرایه حدود dB ۲۰ افزایش یافته است. این تزویج قوی بین دو آرایه موجب ایجاد اثر مخرب بر روی الگوی تشعشعی اصلی هر دو آرایه میشود.



شکل ۹- مقایسه بین الگوی تشعشعی co-pol آنتن در حالتهای مجزا از هم، با پوشش و بدون پوشش. (الف) آرایه I، (ب) آرایه II.







شکل ۱۰- مقایسه بین الگوی تشعشعی cross-pol آنتن در حالتهای مجزا از هم، با پوشش و بدون پوشش. (الف) آرایه I، (ب) آرایه II.

در آرایههای فازی و برای کاربردهای چرخش پرتو نیاز است که فاصله بین عناصر در آرایه از 2/ ۸ بیشتر نباشد که این امر در این آنتن با قرار دادن شکافها در کناره پچها و فشردهسازی ابعاد آنها محقق شدهاست. با اعمال جریان تغذیه با دامنههای یکسان و فازهای متفاوت برای عناصر آرایهها، امکان چرخش پرتو در حالت پوششدار نیز وجود دارد و افزودن پوشش مانعی برای چرخش پرتو آرایهها ایجاد نکردهاست. الگوی تشعشعی هر دو آرایه در حالت چرخش پرتوی آنها در محدوده ۳۰± درجه در شکل ۱۱– (الف) و (ب) نشان دادهشده است. برای وضوح بهتر و مشخص شدن دقیق زاویه چرخش پرتو، این الگوها در مقیاس خطی رسم شدهاند. در این محدوده چرخش، میزان LL همچنان بهتر از طB ۱۰ بوده و بهره آنتن نسبت به حالت بدون چرخش (جهت برادساید و زاویه °0) حداکثر طB ۱/۱ کاهش یافتهاست.



شکل ۱۱– (الف) الگوی بهره (الف) آرایه I، (ب) الگوی بهره آرایه II در زوایای چرخش پرتو ۳۰± درجه

در پیکربندی آرایه درهمتنیده، عناصر دو آرایه بسیار نزدیک به یکدیگر قرار می گیرند، بنابراین انتظار می رود که بازده کل هر دو آرایه به دلیل تزویج قوی بین عناصر در پیکربندی بدون پوشش تنزل یابد. بازده کل آرایهها در پیکربندیهای مجزا از هم، بدون پوشش و پوشش دار در شکل ۱۲ باهم مقایسه شدهاست. بازده ارائه شده برای حالات با/ بدون پوشش، نسبت به حالت ایده آل که در آن هر دو آرایه به صورت مستقل و مجزا از هم کار می کنند، نرمالیزه شده است. بازده کل، نسبت توان تشعشعی (Pradiance) به توان ورودی (Pin) آنتن را نشان می دهد و در نتیجه خواهیم داشت:

$$Total \ Efficiency \ (e_T) = \frac{P_{radiated}}{P_{in}}$$
(11)

$$P_{in} = P_{nadiated} + P_{ohmic} + P_{dielectric} + P_{surface waves} + P_{reflected}$$
(117)

Preflected متناسب با ضریب بازگشتی ورودی آنتن (S<sub>11</sub>) است:

$$P_{\text{reflected}} \propto \left|S_{11}\right|^2 = \left|\frac{Z_{\text{in}} - Z_0}{Z_{\text{in}} + Z_0}\right|^2 \tag{17}$$

تلفات اهمی (Pohmic)، دی الکتریک (Pdielectric) و امواج سطحی (Pohmic)، دی الکتریک (Pdielectric) برای حالتهای پوشش دار و بدون پوشش تقریباً یکسان است، ولی چون تلفات برگشتی آنتن در حالت بدون پوشش به علت تغییر امپدانس آنتن در اثر تزویج متقابل افزایش می ابد، بازدهی کل را به طور قابل توجهی در مقایسه با حالت های پوشش دار و مجزا از هم کاهش می دهد. از آنجا که عناصر آرایه II در صفحه B یعنی در امتداد لبههای تشعشعی چیده شده اند، تزویج متقابل بین عناصر I ین چیدمان آرایه II در صفحه این چیدمان آرایه ناصر آرایه II در صفحه این چیدمان در امتداد لبههای تشعشعی چیده شده اند، تزویج متقابل بین عناصر این چیدمان آرایه نسبت به آرایه I (چیدمان در صفحه H) بیشتر بوده و اثر این چیدمان آرایه نسبت به آرایه I (چیدمان در صفحه این بیشتر بوده و اثر این چیدمان آرایه ناسبت به آرایه I (خیدمان در صفحه این پوشش دارد.



شکل ۱۲– بازدهی کل آرایه های I و II برای سه حالت بررسی شده حداکثر مقدار میدان الکتریکی تولیدشده در آنتن پوششدار با توان ورودی ۱وات نیز طبق نتایج بدست آمده از شبیه سازی، برابر ۴/۴۵ V/mil است. باتوجه به اینکه توان قابل تحمل (مقاومت شکست) ماده دی الکتریک رزین تقریباً ۱۳/۶۲ است، لذا حداکثر توان قابل تحمل هر المان آرایه تقریباً ۲/۶۲

# ۴- مقایسه و بحث

در پوشش ساختارهای غیرفعال، اثربخش بودن پوشش استفادهشده برای کاهش پراکندگی با مقایسه حالتهای پوشش دار و بدون پوشش نشان داده شده و اطمینان حاصل میشود که در حالت دارای پوشش، میدانهای تشعشعی مختل نشوند. در این پژوهش، از آنجا که پوشش موردنظر برای یک ساختار فعال (آنتن) طراحی شدهاست، هدف نهایی بازیابی مشخصات تشعشعی آنتن مشابه حالت مجزا از هم است. بنابراین ملاک ارزیابی عملکرد پوشش، مقایسه حالتهای پوشش دار و مجزا از هم از نظر مشخصات تشعشعی و پارامترهای پراکندگی است. در پژوهش حاضر، تلفات برگشتی، الگوهای تابش، بهره و شماره پیاپی ۱۰۶

بازدهی حالتهای مجزا از هم، پوششدار و بدون پوشش در شکلهای ۴–۱۲ مقایسه شدهاست که موفقیت روش پیشنهادی را تأیید میکند.

جداسازی بین آنتنها در گذشته عمدتاً با استفاده از فیلترهای فرکانس گزین انجام شدهاست. در ساختار پیشنهادی، چون دو آرایه آنتن در فرکانس یکسانی کار میکنند، جداسازی آنها با استفاده از این فیلترها امکان پذیر نیست. در مطالعات قبلی، جداسازی دو آرایه آنتن هم فرکانس و با قطبش متعامد با افزودن فضای اضافی بین آنها و با استفاده از تکنیکهای مختلف انجام شدهاست و استفاده از پوشش برای جداسازی آنتنهای پچ قبلا مورد مطالعه قرار نگرفتهاست. در جدول ۳، مقایسهای بین روشهای استفاده شده قبلی و کار حاضر در مورد جداسازی عناصر آرایه از نظر فاصله بین عناصر،

فاصله ۰/۰۱۴۵ (mm) بین عناصر در پیکربندی پیشنهادی بسیار کمتر از آرایههای طراحی شده قبلی است. با این حال، این فاصله برای جلوگیری از اتصال کوتاهشدن بین پچها و در نظر گرفتن محدودیتهای ساخت استفاده میشود و از نظر تئوری، این فاصله را می توان تقریباً به صفر کاهش داد، زیرا دو پچ مجاور عملا یکدیگر را "نمی بینند" و کاملاً از یکدیگر جدا هستند [۴۴].

با توجه به شکلهای ۴-۶، در حالت بدون پوشش، فرکانس تشدید عناصر پچ از فرکانس مدنظر (۵/۷۵ گیگاهرتز) جابجا می شود و ضرایب بازگشتی برخی از عناصر به دلیل تزویج قوی و در نتیجه تغییر امپدانس ورودی، به طور قابل توجهی کاهش می یابد. فرکانسهای تشدید در حالت پوشش دار به طور کامل بازیابی شدهاند و آنتنهای پوشیده شده عملکردی مشابه با حالت مجزا از هم دارند. شکل ۸ مقدار تزویج مشابهی را در حالتهای پوشش دار و مجزا از هم نشان می دهد، که در آنها حداقل ۲۵ طال ۲۰ کاهش تزویج در مقایسه با حالت بدون پوشش در فرکانس تشدید مشاهده می شود.

با توجه به شکل ۹، در حالت بدون پوشش، تزویج قوی بین عناصر مجاور آرایهها، تجمیع میدان راه دور سازنده (بهره آنتن) را مختل میکند، بنابراین بهره آنتن کاهش یافته و سطح لوبهای فرعی (SLL) افزایش مییابد.

با توجه به شکل ۱۰، سطح مولفه پلاریزاسیون متقاطع برای هر دو آرایه در آرایههای مجزا و پوششدار، حدود ۴۰dB پایین تر از قطبش اصلی است که در حالت بدون پوشش، این مولفه برای هر دو آرایه حدود dB ۲۰ افزایش یافته است. این تزویج قوی بین دو آرایه موجب ایجاد اثر مخرب بر روی الگوی تشعشعی اصلی هر دو آرایه میشود. الگوهای تشعشعی هر دو آرایه در حالت پوشیده مانند حالت مجزا از هم است و انحراف قابل توجهی مشاهده نمی شود. بهره، LLL و بازده دو آرایه در سه حالت بررسی شده در جدول ۴ خلاصه شدهاست.

همانطور که مشاهده میشود، با پوشاندن دو آرایه پچ با فاصله بسیار نزدیک با پوششهای بیضوی که شامل نوارهای فراسطحی عمودی بر روی یک زیرلایه بیضوی دیالکتریک هستند، امپدانس ورودی، مقدار تزویج و مشخصات تشعشعی آنها مشابه حالت مجزا از هم بازیابی میشود.

فاصله لبه به لبه به میزان ۰/۰۱۴۵۵ بین پچها و جداسازی آرایههای هم فرکانس با استفاده از روش حذف پراکندگی و پوششهای فراسطحی بیضی شکل حاصل شدهاست که این امر با فیلترهای فرکانس گزین قابل پیادهسازی نیست.

نوآوری پژوهش حاضر، غلبه بر محدودیتهای ذاتی پوششهای غیرفعال با استفاده از دو آنتن با قطبش متعامد و پوششهای ناهمسانگرد است. تقریباً همان اندازه فضا را که فقط برای یک آرایه آنتن استفاده میشد، اکنون میتوان با کنار هم قرار دادن دو آرایه با قطبشهای متعامد استفاده کرد. در نتیجه این امر منجر به صرفهجویی در فضا، به میزان ۵۰٪ در کاربردهایی که محدودیتهای فضای اشغالی دارند، میشود.

جدول ۳- مقایسه بین روش پوشش صفحهای با سایر روشهای مورد استفاده برای جداسازی آنتنها

ویژ گی مرجع	روش جداسازی	فاصله لبه تا لبه	پیچیدگی روش	کاهش تزویج (dB)	فركانس (GHz)	نوع آنتن
[٨]	طراحی سطوح در میدان نزدیک	•/• <del>۴</del> λ0	متوسط ساختار ۳بعدی	۲۱	۲/۳۷	پچ
[٩]	بهرهگیری از تعامد مدها	•/١٣λο	متوسط مراحل طراحی نسبتا پیچیدہ	۲.	۴	شيپورى
[٣٧]	ساختار زمین معیوب (DGS)	•/٣ <b>۴</b> λο	زیاد ساختار ۳بعدی مراحل طراحی پیچیدہ	75	٣/٧	ĕ.
[٣٨]	فرالایه سرامیکی	<ul> <li>/٢٨λ₀</li> </ul>	متوسط ساختار ۳بعدی	۲۵	٣/۵	دو قطبی
[٣٩]	تقارن مرکزی	<ul> <li>/ \ \λ<sub>0</sub></li> </ul>	كم	77	۲/۵	ټچ
[۴۰]	مودهای تشعشعی ترکیبی	<ul> <li>/ \ \ λ<sub>0</sub></li> </ul>	متوسط ساختار ۳بعدی	۲۳	۲/۵	پچ
[41]	نوارهای عایق	<ul> <li>/ΥΥλ<sub>0</sub></li> </ul>	متوسط ساختار ۳بعدی	٢٠	۴/۷۵	ټې
[47]	سطوح افر کانس گزین	<ul> <li>/ΥΥλο</li> </ul>	متوسط ساختار ۳بعدی	۱۸	۴	ټې
[47]	جداسازی آرایهای	•/•٩λ0	زیاد ساختار ۳بعدی پیچیدہ	١٢	۲/۴۵	پچ
پژوهش حاضر	پوشش صفحهای	•/•1F20	کم ساختار تقریبا صفحهای	24	۵/۷۵	پچ

جدول ۴- مقایسه بین مشخصات تشعشعی آرایهها در حالتهای مجزا از هم، بدون پوشش و پوششدار

حالت		مجزا از هم	بدون پوشش	پوششدار	
	بهره بیشینه (dB)	۱۰/۲	٧/٧	۱۰/۱	
ارايه I	(dB) SLL	۱۳/۲	۱۰/۲	١٢/٧	
	بازده (./)	<b>१</b> ९/१	۶۳	٩٨/٢	
آرایه II	بهره بیشینه (dB)	۱۰/۱	تقريبا صفر	٩/٩	
	(dB) SLL	۱۳/۳	९/९	۱۳/۱	
	بازده (٪)	९९/९	۵۶	٩٧/١	

# ۵- نتیجهگیری

در این کار، مفهوم پوشش صفحهای با استفاده از فراسطوح بیضوی مناسب، برای جداسازی دو آرایه پچ خطی درهم تنیده با فرکانس کار یکسان، پیشنهاد شدهاست. نتایج تحلیل و شبیهسازی نشان میدهد که با پوشاندن عناصر دو pp. 830-834, 2012.

no. 6, pp. 663-668, 2012.

[12] P. Alitalo, A. E. Culhaoglu, A. V. Osipov, S. Thurner, E. Kemptner, S. A. Tretyakov, "Experimental characterization of a broadband transmission-line cloak in free space," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 10, pp. 4963-4968, 2012.
[13] M. Danaeifar, M. Kamyab, A. Jafargholi, "Broadband cloaking with transmission-line networks and metamaterial," International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, vol. 22,

[14] D. Rainwater, A. Kerkhoff, K. Melin, J. Soric, G. Moreno, A. Alù, "Experimental verification of three-dimensional plasmonic cloaking in free-space," New Journal of Physics, vol. 14, no. 1, p. 013054, 2012.

[15] C. Argyropoulos, P.-Y. Chen, F. Monticone, G. D'Aguanno, A. Alu, "Nonlinear plasmonic cloaks to realize giant all-optical scattering switching," Physical Review Letters, vol. 108, no. 26, p. 263905, 2012.

[16] D. S. Filonov, A. P. Slobozhanyuk, P. A. Belov, Y. S. Kivshar, "Double-shell metamaterial coatings for plasmonic cloaking," Physica Status Solidi (RRL)–Rapid Research Letters, vol. 6, no. 1, pp. 46-48, 2012.

[17] A. Alù, "Mantle cloak: Invisibility induced by a surface," Physical Review B, vol. 80, no. 24, p. 245115, 2009.

[18] P. Su, Y. Zhao, S. Jia, W. Shi, H. Wang, "An ultra-wideband and polarization-independent metasurface for RCS reduction," Scientific Reports, vol. 6, no. 1, p. 20387, 2016.

[19] A. Serna, L. J. Molina, J. Rivero, L. Landesa, J. M. Taboada, "Multilayer homogeneous dielectric filler for electromagnetic invisibility," Scientific Reports, vol. 8, no. 1, p. 13923, 2018.

[20] H. Younesiraad, M. Bemani, S. Nikmehr, "Scattering suppression and cloak for electrically large objects using cylindrical metasurface based on monolayer and multilayer mantle cloak approach," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 13, no. 3, pp. 278-285, 2019.

[21] A. Monti, J. C. Soric, A. Alù, A. Toscano, F. Bilotti, "Anisotropic mantle cloaks for TM and TE scattering reduction," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 4, pp. 1775-1788, 2015.

[22] J. C. Soric, A. Monti, A. Toscano, F. Bilotti, A. Alù, "Dualpolarized reduction of dipole antenna blockage using mantle cloaks," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 11, pp. 4827-4834, 2015.

[23] A. Monti et al., "Mantle cloaking for co-site radio-frequency antennas," Applied Physics Letters, vol. 108, no. 11, p. 113502, 2016.

[24] G. Moreno et al., "Wideband elliptical metasurface cloaks in printed antenna technology," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 7, pp. 3512-3525, 2018.

[25] A. Monti, J. Soric, A. Alù, A. Toscano, F. Bilotti, "Design of cloaked Yagi-Uda antennas," EPJ Applied Metamaterials, vol. 3, p. 10, 2016.

[26] S. Vellucci et al., "Non-linear mantle cloaks for selfconfigurable power-dependent phased arrays," in 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 2020: IEEE, pp. 1-3.

[27] S. Vellucci et al., "Overcoming mantle cloaking limits in antenna applications through non-linear metasurfaces," in 2020 Fourteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), 2020: IEEE, pp. 355-357.

[28] S. Vellucci et al., "On the use of nonlinear metasurfaces for circumventing fundamental limits of mantle cloaking for antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 8, pp. 5048-5053, 2021.

[29] S. Vellucci, A. Monti, M. Barbuto, A. Toscano, F. Bilotti, "Progress and perspective on advanced cloaking metasurfaces: from invisibility to intelligent antennas," EPJ Applied Metamaterials, vol. 8, p. 7, 2021.

[30] P.-Y. Chen, A. Alu, "Mantle cloaking using thin patterned metasurfaces," Physical Review B, vol. 84, no. 20, p. 205110, 2011.

[31] H. M. Bernety, A. B. Yakovlev, "Decoupling antennas in printed technology using elliptical metasurface cloaks," Journal of Applied Physics, vol. 119, no. 1, p. 014904, 2016.

آرایه فشرده با پوشش های مناسب، نه تنها اثرات تزویج متقابل نامطلوب حذف می،شود، بلکه مشخصات تشعشعی آنتنها نیز مشابه آرایههای مجزا از هم بازسازی می شود. بازده آرایه ها بعد از افزودن پوشش نسبت به حالت بدون پوشش ۳۵٪ افزایش یافتهاست. الگوهای تشعشعی نیز در حالت پوششدار ۹۸/۵٪ و در حالت بدون پوشش ۴۰٪ نسبت به آرایه های مجزا از هم مشابهت نشان میدهد. همچنین ایزولاسیون بین عناصر در حالت پوششدار بیش از dB ۲۴ در فرکانس کار بهبود یافتهاست. مقادیر بهره آنتنها در حالت پوشش دار، در آرایه I و II به ترتیب B ۰/۱ dB ۰/۱ و V/۵ و برای حالت بدون پوشش، ۲/۵ dB و ۱۰/۱ dB نسبت به آرایههای مجزا از هم تفاوت دارند. سطح لوبهای فرعی نیز در حالت پوششدار در آرایه I و II به ترتیب dB ۰/۵ و dB ۰/۲ و در حالت بدون پوشش، dB ۳ و ۳/۴ dB نسبت به حالت مجزا از هم تفاوت دارند. این طرح برای ساخت آرایه آنتنها با فاصله خیلی کم در کاربردهای ارتباطاتی با قطبش دوگانه، بهویژه برای تلفنهای همراه نسل ۵G و ۶G مناسب است. استفاده از دو آرایه با فرکانس کاری یکسان و قطبش متعامد، برای بهبود عملکرد سیستم و افزایش یهنای باند در ارتباطات دوطرفه کامل (full-duplex)، غلبه بر محوشدگی چندمسیره (multipath fading) در مخابرات رادیویی، سنسورهای تصویربرداری پزشکی برای تشخیص جهت شکستگی استخوان و همچنین سیستمهای چندورودی- چندخروجی (MIMO) برای افزایش ظرفیت کانال در محیطهای شهری پیچیده استفاده می شود..

## مراجع

[1] B. Qian, X. Chen, A. A. Kishk, "Decoupling of microstrip antennas with defected ground structure using the common/differential mode theory," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 20, no. 5, pp. 828-832, 2021.

[2] K. V. Babu, B. Anuradha, "Design of UWB MIMO antenna to reduce the mutual coupling using defected ground structure," Wireless Personal Communications, vol. 118, no. 4, pp. 3469-3484, 2021.

[3] M. Li, L. Jiang, K. L. Yeung, "Novel and efficient parasitic decoupling network for closely coupled antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 6, pp. 3574-3585, 2019.

[4] M. Li, S. Cheung, "A novel calculation-based parasitic decoupling technique for increasing isolation in multiple-element MIMO antenna arrays," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 1, pp. 446-458, 2020.

[5] Q. Li, A. P. Feresidis, M. Mavridou, P. S. Hall, "Miniaturized double-layer EBG structures for broadband mutual coupling reduction between UWB monopoles," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 3, pp. 1168-1171, 2015.

[6] M. Alibakhshikenari, M. Khalily, B. S. Virdee, C. H. See, R. A. Abd-Alhameed, E. Limiti, "Mutual-coupling isolation using embedded metamaterial EM bandgap decoupling slab for densely packed array antennas," IEEE Access, vol. 7, pp. 51827-51840, 2019.

[7] J. Singh, F. L. Lohar, "Metamaterial-Based Miniaturized DGS Antenna for wireless Applications," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, vol. 1225, no. 1: IOP Publishing, p. 012035.

[8] A. Omidvar, P. Rezaei, E. Atashpanjeh "Mutual coupling reduction with Peyton Turtle pattern nearfield surface for MIMO patch antenna," Frequenz, 2023.

[9] A. Habibi Daronkola, et al., "Mutual coupling reduction using plane spiral orbital angular momentum electromagnetic wave," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 36, no. 3, pp. 346-355, 2022.

[10] D. Schurig et al., "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," Science, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, 2006.

[11] J. Vehmas, P. Alitalo, S. Tretyakov, "Experimental demonstration of antenna blockage reduction with a transmission-line cloak," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 6, no. 7,

antennas with cross-polarization suppression," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 3, pp. 1751-1756, 2020.

[39] K. L. Chung, A. Cui, M. Ma, B. Feng, Y. Li, "Central-Symmetry Decoupling Technique for Circularly-Polarized MIMO System of Tightly Packed Chinese-character Shaped Patch Antennas," The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), pp. 1125-1131, 2021.

[40] Y.-F. Cheng, K. K. M. Cheng, "Decoupling of  $2 \times 2$  MIMO antenna by using mixed radiation modes and novel patch element design," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 12, pp. 8204-8213, 2021.

[41] P. Mei, Y. M. Zhang, S. Zhang, "Decoupling of a wideband dual-polarized large-scale antenna array with dielectric stubs," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 8, pp. 7363-7374, 2021.

[42] R. Qi, D. Yang, H. Zhai, Y. Zeng, Z. Wang, "Patch Antenna Array Decoupling Based on Polarization Conversion Frequency Selective Surface," in 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2020: IEEE, pp. 1-3.

[43] K.-L. Wu, C. Wei, X. Mei, Z.-Y. Zhang, "Array-antenna decoupling surface," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6728-6738, 2017.

[44] R. Masoumi, R. Kazemi, A. E. Fathy, "Design and implementation of elliptical mantle cloaks for polarization decoupling of two tightly spaced interleaved co-frequency patch array antennas," Scientific Reports, vol. 13, no. 1, pp. 1-16, 2023.

[32] H. M. Bernety, A. B. Yakovlev, "Cloaking of single and multiple elliptical cylinders and strips with confocal elliptical nanostructured graphene metasurface," Journal of Physics: Condensed Matter, vol. 27, no. 18, p. 185304, 2015.

[33] A. Moosaei, M. H. Neshati, "Design investigation of mantlecloak for a PEC cylindrical object under oblique incidence of TM and TE waves," AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 137, pp. 153801, 2021.

[34] Y. R. Padooru, A. B. Yakovlev, P.-Y. Chen, A. Alu, "Analytical modeling of conformal mantle cloaks for cylindrical objects using sub-wavelength printed and slotted arrays," Journal of Applied Physics, vol. 112, no. 3, p. 034907, 2012.

[35] H. M. Bernety, A. B. Yakovlev, "Reduction of mutual coupling between neighboring strip dipole antennas using confocal elliptical metasurface cloaks," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 4, pp. 1554-1563, 2015.

[36] S. Pawar, H. M. Bernety, H. G. Skinner, S.-Y. Suh, A. Alù, A. B. Yakovlev, "Mantle cloaking for decoupling of interleaved phased antenna arrays in 5G applications," in AIP Conference Proceedings, 2020, vol. 2300, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 020095.

[37] Z. Niu, H. Zhang, Q. Chen, T. Zhong, "Isolation enhancement in closely coupled dual-band MIMO patch antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 8, pp. 1686-1690, 2019.

[38] F. Liu, J. Guo, L. Zhao, G.-L. Huang, Y. Li, Y. Yin, "Ceramic superstrate-based decoupling method for two closely packed