

## گسترش پهنای پرتو آنتن آرایه‌ای میکرواستریپ به کمک لایه‌های تطبیق امپدانس زاویه گسترده

محبوبه صفری دهنوی<sup>۱</sup>، سید محمد جواد رضوی<sup>۲\*</sup>، سید حسین محسنی ارمکی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲ و ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۷/۰۶/۲۱، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۱)

**چکیده:** در این مقاله یک روش جدید برای محاسبه ضریب انعکاس فعال آنتن‌های آرایه‌ای ارائه شده است و به کمک آن، لایه تطبیق امپدانس ناهمسانگرد جهت انتقال نقاط کور طراحی شده است. آنتن طراحی شده شامل یک آرایه میکرواستریپ با چیدمان مستطیلی بوده که فاصله بین عناصر آن برابر  $0.6\lambda$  طول موج در باند فرکانسی X می‌باشد. جهت جبران عدم تطبیق امپدانس بین آنتن و فضای آزاد بالای دریچه در نزدیکی نقاط کور و همچنین افزایش بازه پویش آنتن، با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مشخصات لایه تطبیق ناهمسانگرد استخراج می‌شود. سپس در نرم‌افزارهای CST MICROWAVE STUDIO@2016 و HFSS کارآمدی آن بررسی می‌گردد. از مزایای روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به سادگی، سرعت بالاتر، عدم نیاز به ساخت و اندازه‌گیری ضرایب تزویج آنتن اشاره کرد. این روش، یک ابزار قوی برای محاسبه ضریب انعکاس فعال آنتن‌های آرایه‌ای میکرواستریپ، که استخراج معادلات تحلیلی برای آن‌ها دشوار است، به حساب می‌آید. لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده طراحی شده با انتقال نقاط کور سبب افزایش بازه پویش آنتن از  $34^\circ \pm$  به  $42^\circ \pm$  شده است.

**کلیدواژه‌ها:** آنتن آرایه‌ای میکرواستریپ، نقاط کور، باند X، بهینه‌سازی، لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده

### ۱- مقدمه

فناوری تطبیق امپدانس زاویه گسترده برای اولین بار توسط ماگیل به صورت یک لایه دی‌الکتریک در دریچه آنتن برای تطبیق امپدانس بیان شد [۱۲]. لایه دی‌الکتریک به صورت سوسپتانس موازی عمل کرده و با تغییر ارتفاع، مقدار آن تغییر می‌کند. این روش فقط برای تک‌فرکانس یا باند فرکانسی باریک عمل خواهد کرد. با افزایش تعداد لایه‌های دی‌الکتریک، تطبیق در باند وسیع‌تری اتفاق می‌افتد که البته حضور لایه‌های دی‌الکتریک، حجم آنتن را افزایش می‌دهد. همچنین تطبیق آنتن در یک باند وسیع با مواد طبیعی امکان‌پذیر نمی‌باشد. استفاده از صفحات فرامادی، باعث افزایش درجه آزادی در طراحی لایه‌های تطبیق امپدانس زاویه گسترده می‌شود [۶].

در تحقیقات انجام شده جهت طراحی تطبیق امپدانس زاویه گسترده در آنتن‌های آرایه موجبری، ضریب انعکاس فعال با استفاده از روش چند مدی محاسبه و جهت تطبیق از لایه‌های ناهمسانگرد کمک گرفته شده است [۱۳]. همچنین در آنتن‌های آرایه دو قطبی به کمک معادلات تحلیلی حاکم بر آنتن، این‌گونه ساختارها طراحی شده است [۱۴]. در آنتن‌های آرایه‌ای میکرواستریپ امکان استنتاج معادلات تحلیلی حاکم بر آنتن نبوده و نیاز به تحلیل تمام موج با استفاده از روش‌های عددی مانند ممان، المان محدود و غیره می‌باشد. در [۱۵-۱۶] به کمک ساخت آنتن و اندازه‌گیری ضرایب تزویج بین عنصر مرکزی و بقیه عناصر،

آنتن‌های آرایه فازی کاربرد گسترده‌ای در رادار، ارتباطات ماهواره‌ای و سیستم‌های تلفن همراه دارند. ویژگی منحصر به فرد این‌گونه آنتن‌ها، پویش الکترونیکی پرتو آنتن و توانایی انتشار موج در جهات مختلف می‌باشد [۱]. با این وجود مشکل اصلی آنتن‌های آرایه فازی، تزویج متقابل بین عناصر و در نتیجه آن، تغییر امپدانس پویش آنتن با چرخش پرتو و کاهش بازده تشعشعی می‌باشد. پدیده‌ای به نام نقاط کور در الگوی تشعشعی آنتن، محدوده پویش را مشخص می‌کند. در آنتن‌های آرایه‌ای چاپی، انتشار موج‌های تشعشعی در فضای آزاد و غیرتشعشعی در زیرلایه و تزویج همزمان بین این امواج، سبب ایجاد انرژی راکتیو بازگشتی به مولد می‌شود. انرژی ایجاد شده توانایی تشعشع نداشته و لذا بازده تشعشعی در نزدیکی زوایای کور به صفر میل کرده و به صورت عدم تطبیق شدید بین آنتن و فضای آزاد نمود می‌یابد. برای حل این مشکل، روش‌های مختلفی از جمله زیرآرایه‌کردن عناصر جهت انحراف تزویج [۲]، زیرلایه‌هایی با ادوات فعال و اتصال کوتاه [۳]، زیرلایه‌های ناهمگن [۴]، کاهش موج سطحی عناصر آنتن [۵]، فراموادها [۶-۷]، ساختارهای زمین شکافدار [۸]، مواد با باند ممنوعه [۹-۱۰]، تطبیق امپدانس زاویه گسترده [۱۱] و غیره ارائه شده است.

صرف نظر از این که مدهای فلوکه در فضای آزاد بالای آنتن یا سطح آرایه منتشر می‌شوند یا خیر، مولفه‌های عدد موج با فازهای تحریک عناصر آرایه، مطابق معادله (۱) تغییر می‌کنند [۱۷]:

$$K_{pq} = \sqrt{K_{xpq}^2 + K_{ypq}^2} \quad (1)$$

که در آن:

$$K_{xpq} = K_0 \sin \theta \cos \varphi + \frac{2\pi p}{d_x} \quad (2)$$

$$K_{ypq} = K_0 \sin \theta \sin \varphi + \frac{2\pi q}{d_y} \quad (3)$$

در روابط بالا، هر مد فلوکه با اندیس‌های  $p$  و  $q$  مشخص شده و  $d_x$  و  $d_y$  فاصله بین عناصر آنتن به ترتیب در جهات  $x$  و  $y$  را نشان می‌دهد.  $(\theta, \varphi)$  جهت پرتو اصلی یا به عبارتی جهت مد فلوکه مرتبه  $(0,0)$  می‌باشد.

نوع دیگری از مدهای ایجاد شده به وسیله آنتن‌های آرایه‌ای، مدهای هدایت شده در درون زیرلایه آنتن است. این مدها می‌توانند به طور کامل در ساختار آرایه محبوس شوند و با فضای اطراف آنتن تزویج نداشته باشند یا به صورت محدود با فضای آزاد تزویج شده و باعث تشعشع شوند. به این مدها اگر محدود در ساختار آنتن باشند، موج سطحی<sup>۶</sup> و اگر تشعشع کنند، موج نشتی<sup>۷</sup> می‌گویند. مشخصات این مدهای زیرلایه را هندسه آنتن آرایه‌ای و جنس مواد تعیین می‌کنند. البته رفتار مدهای زیرلایه به دو شاخص ضخامت زیرلایه و ثابت دی‌الکتریک نیز وابسته است. به عنوان مثال در زیرلایه آنتن آرایه‌ای در صورت برآورده شدن معادله (۴)، تنها مد موج سطحی  $TM_0$  قابل انتشار است:

$$d < \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad (4)$$

زیرلایه‌های ضخیم‌تر با ثابت دی‌الکتریک بزرگ‌تر، باعث تولید مدهایی با درجه بالاتر می‌شود. البته مدها با درجه پایین‌تر، تأثیر بیشتری بر تشعشع و پویا آنتن آرایه‌ای دارند. اگرچه زیرلایه‌های آنتن‌های چاپی کاربردی، به اندازه کافی نازک بوده که فقط مد سطحی  $TM_0$  را تولید کنند، اما مسائلی از قبیل متالیزه<sup>۸</sup> و شبکه تغذیه بر مشخصات مدهای زیرلایه تأثیر داشته و باعث تحریک مدهایی با درجه بالاتر می‌گردد.

مدهای موج نشتی، هماهنگ‌های فضایی (مدهای فلوکه) مدهای موج سطحی هستند و تنها تفاوت بین آن‌ها، اختلاف در ثابت فاز آن‌ها است؛ به طوری که ثابت فاز موج نشتی  $(\beta_{1w})$  از

ضریب انعکاس فعال به دست آمده و سپس لایه تطبیق مناسب طراحی شده است.

تاکنون پژوهشی در زمینه طراحی لایه‌های تطبیق امپدانس برای آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپ با تغذیه کابل هم‌محور ارائه نشده است. در این مقاله با استخراج ضرایب تزویج بین عنصر مرکزی و بقیه عناصر به کمک شبیه‌سازی نسبت به روش اندازه‌گیری در [۱۶] سریع‌تر و ساده‌تر بوده است. به دلیل استخراج نتایج از شبیه‌سازی آنتن، امکان تغییر و طراحی برای آنتن‌های آرایه‌ای مختلف وجود دارد و می‌توان موقعیت‌های مختلف را مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

در این مقاله پس از بیان تئوری نقاط کور در الگوی تشعشعی آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپ، وجود این نقاط در الگوی آنتن نشان داده می‌شود. جهت جبران عدم تطبیق امپدانس بین آنتن و فضای آزاد بالای دریچه در نزدیکی نقاط کور و همچنین افزایش بازه پویا آنتن، به کمک بهینه‌سازی، یک لایه تطبیق ناهمسانگرد<sup>۱</sup> طراحی می‌شود. نمودار ضریب انعکاس فعال آنتن در حضور لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده و همچنین چرخش الگوی تشعشعی آنتن، جابه‌جا شدن نقاط کور را نشان داده است. تلف برگشتی در آرایه بی‌نهایت، کارآمدی لایه طراحی شده برای آنتن‌های آرایه‌ای بزرگ را تصدیق می‌کند.

## ۲- تئوری نقاط کور در آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپ

دو نوع مد متمایز در آنتن‌های آرایه‌ای مایکرواستریپ وجود دارد. مد تشعشعی<sup>۲</sup> که تشعشع از این آنتن‌ها را به صورت بی‌نهایت مد فلوکه<sup>۳</sup> بیان می‌کند و مد زیرلایه<sup>۴</sup> که بیانگر انتشار موج الکترومغناطیس در ساختار آنتن آرایه‌ای است.

مدهای تشعشعی که بیانگر تناوب میدان آرایه می‌باشند، با نام مدهای فلوکه نیز شناخته می‌شوند. به عبارت دیگر، میدان آرایه‌ای کل را می‌توان به بی‌نهایت مد فلوکه تجزیه کرد. در واقع هر یک از این مدها به عنوان یک موج صفحه‌ای با عدد موج و جهت انتشار مشخص، عمل می‌کنند. البته در عمل فقط تعداد کمی از مدهای اولیه با فضای آزاد تزویج شده و سبب انتشار می‌شوند و مدهای باقیمانده (مدهای گذرا) به صورت تابع نمایی در فضای آزاد بالای آنتن کاهش یافته و سبب انتقال انرژی و تشعشع بر روی سطح آنتن می‌شوند. پرتو اصلی آنتن آرایه‌ای ناشی از مد اصلی فلوکه و پرتوهای گریتینگ<sup>۵</sup>، ناشی از مدهای فلوکه با درجات بالاتر هستند.

<sup>1</sup> Anisotropic

<sup>2</sup> Radiation mode

<sup>3</sup> Floquet mode

<sup>4</sup> Substrate mode

<sup>5</sup> Grating

<sup>6</sup> Surface wave

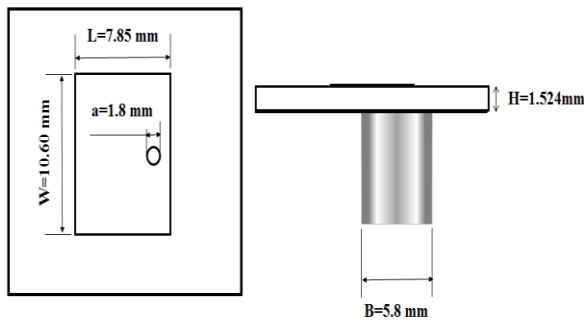
<sup>7</sup> Leaky wave

<sup>8</sup> Metallization

می‌گردد. در آرایه‌های چرخشی<sup>۴</sup>، فاصله بین عناصر برابر نصف طول موج در فرکانس کاری انتخاب می‌شود [۱۹]. در ادامه آنتن آرایه مایکرواستریپ در فرکانس تشدید ۱۰/۲ GHz طراحی و حضور نقاط کور در الگوی تشعشی آن نشان داده می‌شود.

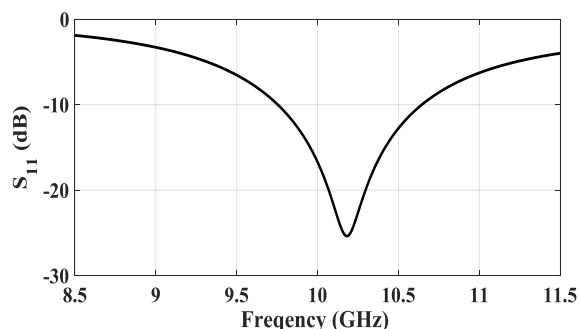
### ۳- ساختار آنتن آرایه‌ای

آنتن‌های آرایه‌ای مورد بررسی به‌صورت دو آرایه ۸ و ۴۸ عنصری در فرکانس کاری ۱۰/۲ GHz می‌باشند. آرایه ۸ عنصری به‌صورت یک ساختار مستطیلی ۱×۸ و آرایه ۴۸ عنصری به‌صورت یک ساختار مستطیلی ۶×۸ عنصری در نظر گرفته شده است. تک عنصر آرایه، یک آنتن مایکرواستریپ مستطیلی با ابعاد  $L = 7.85 \text{ mm}$  و  $W = 10.6 \text{ mm}$  می‌باشد که بر روی زیرلایه‌ای از جنس راجرز RO4725/JXR با ضریب دی‌الکتریک  $\epsilon_r = 2.55$  و ضخامت  $h = 1.524 \text{ mm}$  چاپ شده است (شکل ۱). هر عنصر از آرایه توسط یک کابل هم محور  $50 \Omega$  با شعاع  $0.9 \text{ mm}$  و شعاع خارجی  $2.9 \text{ mm}$  به صورت مجزا تغذیه می‌شود. فضای بین عناصر آرایه برابر  $D = 0.63\lambda = 18.53 \text{ mm}$  اعمال شده است.



شکل (۱): ساختار آنتن تک عنصری

$S_{11}$  آنتن تک عنصری همراه با الگوی تشعشی آن در صفحات E و H به کمک نرم‌افزار CST در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): شاخص پراکندگی آنتن تک عنصری

ثابت فاز فضای آزاد کوچک‌تر بوده و باعث تشعشع در یک جهت خاص، متناسب با ثابت انتشار می‌شوند. این در حالی است که ثابت انتشار موج سطحی ( $\beta_{sw}$ ) بزرگتر از ثابت فاز فضای آزاد بوده و در نتیجه مدهای موج سطحی در محیط زیرلایه محصور شده و توانایی انتشار موج در فضای بیرون را ندارند [۱۷].

در ساختار آرایه‌ای تحریک شده، دو مجموعه متفاوت از مدهای فلوکه، یکی برای بیان میدان آرایه‌ای و دیگری برای بیان میدان مدهای زیرلایه تعریف می‌شود. ممکن است مدهای فلوکه از این دو مجموعه با همدیگر تزویج یابند؛ که در این صورت تحریک مدهای زیرلایه به حداکثر رسیده و بخش قابل توجهی از انرژی آرایه به این مدها اختصاص یافته و به‌جای این‌که در فضا تشعشع یابد، در زیرلایه باقی می‌ماند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که ثابت فاز مماسی مد فلوکه انتشاری ( $k_{pq}$ ) با ثابت انتشار مد زیرلایه ( $\beta_{sub}$ ) برابر شود. شرط وجود این تزویج منسجم یا به عبارتی پویش کور در رابطه ( $\Delta$ ) آمده است:

$$\beta_{sub}^2 = \left( \frac{2\pi p}{d_x} + k_0 \sin \theta \cos \varphi \right)^2 + \left( \frac{2\pi q}{d_y} + k_0 \sin \theta \sin \varphi \right)^2 \quad (5)$$

$\beta_{sub}$  بسته به نوع مد می‌تواند  $\beta_{1w}$  یا  $\beta_{sw}$  باشد. رابطه ( $\Delta$ ) شرط کافی برای ظهور نقاط کور در الگوی تشعشی آنتن نمی‌باشد و نیازمند وجود جریان با قطبش مناسب بر روی ساختار آنتن جهت تحریک مدهای زیرلایه (با قطبش مشابه جریان) است. معادله ( $\Delta$ ) برای مدهای موج سطحی با  $K_0 < \beta_{sw}$  و مد فلوکه  $(0,0)$  ارضا نمی‌شود و تنها وقتی مد فلوکه  $(0,0)$  یا همان پرتو اصلی نقاط کور ایجاد می‌کند که آرایه با مدهای موج ناشی با  $K_0 > \beta_{1w}$  تحریک شود. در بیشتر موارد عملی، کوری ناشی از تزویج بین مد موج سطحی و مدهای فلوکه مرتبه  $(\pm 1,0)$  می‌باشد [۱۸].

فاصله بین عناصر، تأثیر مستقیم و ضخامت زیرلایه و ثابت دی‌الکتریک آن، تأثیر غیرمستقیم در تشکیل نقاط کور دارد. اگرچه افزایش ضخامت دی‌الکتریک و ضریب دی‌الکتریک<sup>۱</sup> باعث ایجاد موج زیرلایه و کوری پویش در جهت عرضی<sup>۲</sup> می‌شود؛ فاصله بین عناصر، مهم‌ترین عامل در ایجاد نقاط کور است. اگر فاصله بین عناصر از نصف طول موج بیشتر باشد، امکان حضور نقاط کور در جهت عرضی وجود دارد؛ در صورتی که فضای بزرگ بین عناصر خود باعث تشکیل گلبرگ‌های تصویر در فضای قابل مشاهده<sup>۳</sup>

<sup>1</sup> Permittivity

<sup>2</sup> Broadside

<sup>3</sup> Visible space

<sup>4</sup> Scanning array

کلیدی در عملکرد آن دارند و تزویج متقابل با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. می‌توان با بررسی الگوی تشعشعی تک المان فعال و امپدانس فعال عنصر مرکزی در آرایه‌های کوچک (حدود ۲۵ تا ۵۰ عنصری) به خصوصیات تشعشعی آرایه‌های بزرگ دست یافت. از طرفی در نقاط کور آنتن آرایه‌ای، بخشی از انرژی در پرتو اصلی تشعشع نمی‌یابد و در سطح آنتن منتقل می‌شود که این مسأله خود باعث ایجاد یک صفر عمیق در ضریب انعکاس فعال آنتن می‌شود. از دید امپدانس این صفر عمیق به صورت عدم تطبیق امپدانس بین آنتن و فضای آزاد نمود یافته و می‌توان با یک شبکه تطبیق، مشکل را بر طرف ساخت.

ضریب انعکاس فعال عنصر مرکزی در آرایه محسود با  $(2N_x + 1) \times (2N_y + 1)$  عنصر از رابطه (۶) قابل محاسبه است [۱۰]:

$$S_{11}^a(u, v) = s_{11}(u, v) + \sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} s_{21}(m, n) \exp[-jmd_x \frac{2\pi}{\lambda} u - jnd_y \frac{2\pi}{\lambda} v] \quad (6)$$

که در آن:

$$u = \sin \theta_0 \cos \theta_0 \quad (7)$$

و

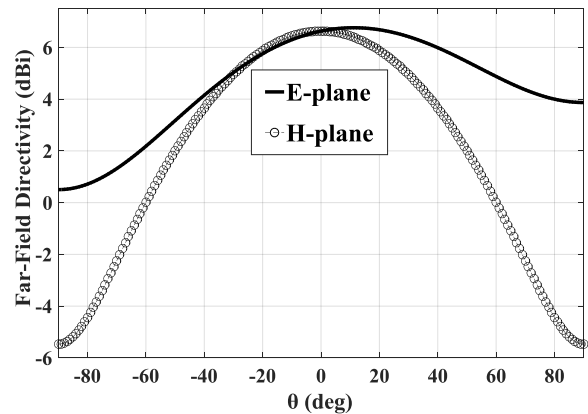
$$v = \sin \theta_0 \sin \theta_0 \quad (8)$$

در رابطه (۶)، عبارت  $\sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} s_{21}(m, n)$  جمع بر روی همه عناصر به جز عنصر مرکزی (یعنی وقتی هم‌زمان  $m = 0$  و  $n = 0$  باشد) است.  $S_{11}(u, v)$  ضریب انعکاس خودی برای عنصر مرکزی و  $s_{21}(m, n)$  شاخص‌های پراکندگی تزویج متقابل باقی عناصر بر روی عنصر مرکزی، در حالی که فقط عنصر مرکزی تحریک می‌شود، می‌باشد. به عبارت دیگر، این متغیر تأثیر تزویج ناشی از تک‌تک عناصر بر روی عنصر مرکزی را نشان می‌دهد [۱۰].

با محاسبه ضریب انعکاس فعال، امپدانس معادل آنتن آرایه‌ای از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱۶].

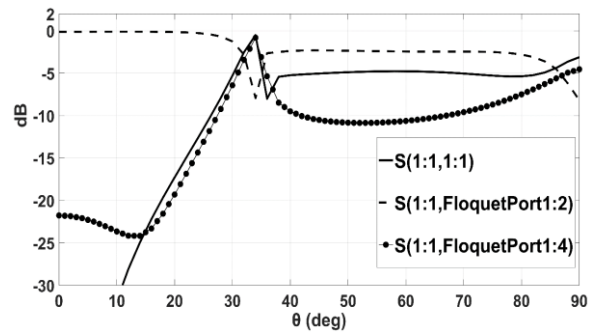
$$Z_n(\theta, \varphi) = Z_0 \frac{1 + S_{11}^a(u, v)}{1 - S_{11}^a(u, v)} \quad (9)$$

همان‌طور که از معادله (۶) مشخص است، جهت محاسبه  $S_{11}^a$  نیاز به ضرایب تزویج بین عنصر مرکزی و کلیه عناصر آنتن است. پس ابتدا آنتن‌های آرایه‌ای ۸ و ۴۸ عنصری در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی و سپس ضرایب پراکندگی مربوط به عنصر مرکزی استخراج می‌شود (پردازنده intel core i7-5930k cpu @3.5GHz و به کمک نرم‌افزار MATLAB، مقدار  $S_{11}^a$  برای هر زاویه چرخش آنتن به دست می‌آید. در



شکل (۳): الگوی تشعشعی آنتن تک عنصری

در شکل (۴) شاخص پراکندگی تک عنصر ( $S_{11}$ ) و انرژی منتشر شده در گلبرگ‌های مرتبه ۰ و ۱- (مدهای فلوکه دوم و چهارم) در آنتن آرایه‌ای بی‌نهایت به کمک نرم‌افزار HFSS با شرایط مرزی مستر-اسلیو<sup>۱</sup> در فرکانس ۱۰/۲ GHz نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)،  $S_{11}$  در نزدیکی نقطه کور در  $34^\circ$  به سمت 0 dB میل می‌کند در حالی که در این نقطه یک صفر بسیار عمیق در مد مرتبه صفر اتفاق می‌افتد.



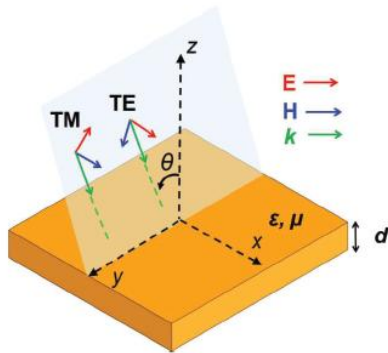
شکل (۴): تلف برگشتی در آنتن آرایه بی‌نهایت، سطح انتقال گلبرگ اصلی، گلبرگ تصویر

#### ۴- ضریب انعکاس فعال آنتن آرایه‌ای

جهت تعیین محل نقاط کور در الگوی تشعشعی آنتن‌های آرایه‌ای با تعداد عناصر محدود از ضریب انعکاس فعال عنصر مرکزی آنتن استفاده می‌شود. در این بخش جزئیات این روش برای آرایه مایکرواستریپ به تفصیل شرح داده شده است.

عملکرد آنتن‌های آرایه فازی بزرگ با شبکه‌بندی مستطیلی با فاصله بین عناصر  $d_x$  و  $d_y$  و به‌وسیله دو شاخص اصلی الگوی تشعشعی تک المان فعال و امپدانس فعال مشخص می‌شود [۱۰]. هر دو شاخص به تزویج متقابل همه عناصر بر روی عنصر مورد بررسی بستگی دارند. با این وجود عناصر نزدیک به این عنصر نقش

<sup>1</sup> Master-Slave



شکل (۷): تابش موج صفحه‌ای بر لایه دی‌الکتریک با زاویه دلخواه

جهت طراحی چنین لایه‌هایی نیاز به محاسبه امپدانس لایه ناهمسانگرد با تابش موج صفحه‌ای با دو قطبش TE و TM است. امپدانس عرضی صفحه انتشار در نیم فضای ناهمسانگرد از معادلات (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید [۲]:

$$Z_{TE} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{k_z}{w\mu_0\mu_x} \quad (10)$$

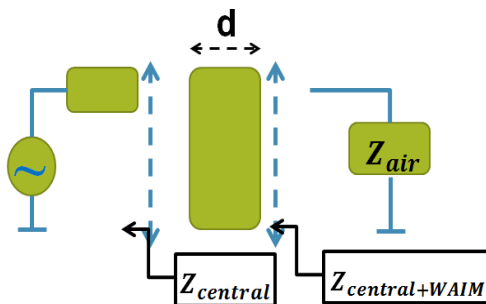
$$= \left[ \frac{\epsilon_0\epsilon_y}{\mu_0\mu_x} - \frac{k_x^2}{w^2\mu_0^2\mu_z\mu_x} \right]^{-1}$$

$$Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{k_z}{w\epsilon_0\epsilon_x} \quad (11)$$

$$= \left[ \frac{\mu_0\mu_y}{\epsilon_0\epsilon_x} - \frac{k_x^2}{w^2\epsilon_0^2\epsilon_z\epsilon_x} \right]$$

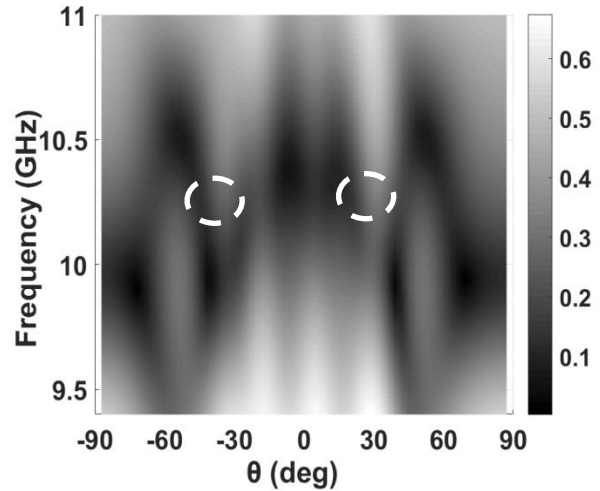
## ۶- استخراج شاخص‌های لایه ناهمسانگرد به کمک بهینه‌سازی

در شکل (۸) طرح کلی از حضور لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده با ضخامت d جهت تطبیق امپدانس فعال المان مرکزی آرایه نشان داده شده است. با اعمال شرط تطبیق امپدانس بر امپدانس آنتن به همراه لایه ناهمسانگرد (بخش‌های ۴ و ۵) و امپدانس فضای آزاد، مقادیر تانسورهای گذردهی الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی و ضخامت لایه محاسبه می‌شود.

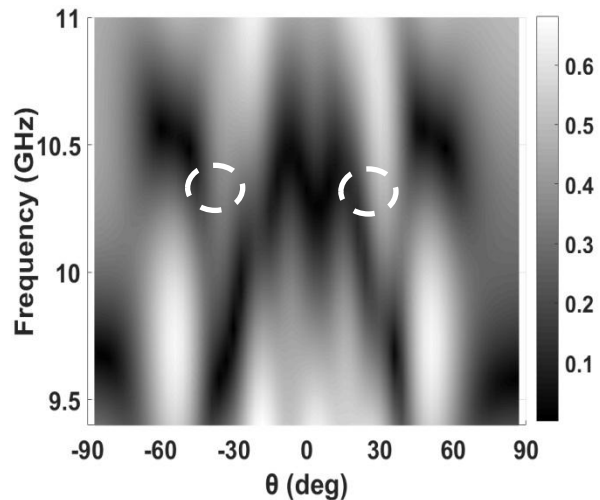


شکل (۸): بلوک دیاگرام مدل خط انتقال آنتن به همراه لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده

شکل‌های (۵) و (۶)، به ترتیب ضریب انعکاس فعال برای آرایه ۸ و ۴۸ عنصری نشان داده‌است و نقاط کور در فرکانس ۱۰/۲ GHz به صورت خط چین مشخص شده‌اند.



شکل (۵): ضریب انعکاس فعال آنتن ۸ عنصری



شکل (۶): ضریب انعکاس فعال آنتن ۴۸ عنصری

## ۵- امپدانس لایه ناهمسانگرد با تابش موج صفحه‌ای

یکی از کارآمدترین روش‌های تطبیق امپدانس آنتن‌های آرایه‌ای با فضای آزاد، لایه‌های دی‌الکتریک تطبیق امپدانس زاویه گسترده در بالای دریچه آنتن می‌باشد. لایه‌های تطبیق امپدانس در یک بازه زاویه‌ای وسیع شامل یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت محدود در بالای دریچه آنتن آرایه‌ای، به صورت یک سوسپتانس موازی عمل کرده و سبب تطبیق امپدانس می‌شوند (شکل ۷). استفاده از مواد ناهمسانگرد با پنج درجه آزادی شامل ضخامت لایه، قابلیت بیشتر را در اختیار طراح قرار می‌دهد [۲۰].

ممکن رسیده، متغیرهای طراحی مطابق جدول (۲) به دست آمده و در پیچه آنتن با لایه ناهمسانگرد پوشانده می‌شود.

جدول (۲): مشخصات لایه‌های طراحی شده

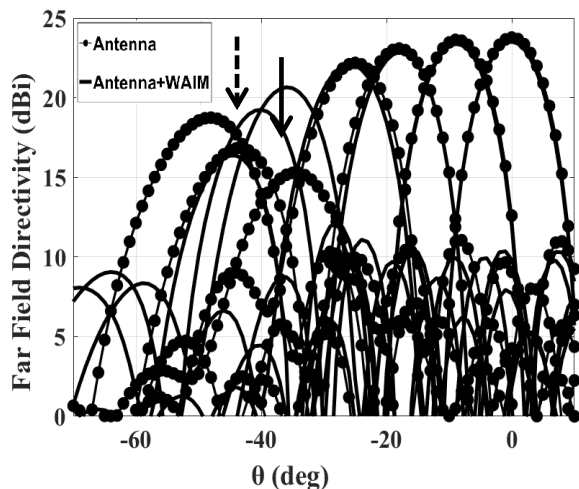
ساختار آنتن	ضخامت (mm)	$\epsilon_z$	$\epsilon_x$	$\mu_z$	$\mu_x$
آنتن ۱×۸	۳/۳	۰/۲۵	۲/۱	۰/۶	۳/۵
آنتن ۶×۸	۴/۸	۰/۲۱	۲/۲	۰/۶	۳/۵

ساختار کلی در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی می‌شود و سپس با اعمال اختلاف فاز مناسب بین عناصر آرایه، طبق رابطه (۱۵) الگوی تشعشعی در دو حالت (آنتن و آنتن به همراه لایه ناهمسانگرد) در فرکانس ۱۰/۲ GHz چرخانده می‌شود و با ترکیب نتایج خروجی‌های هر کابل تغذیه در نرم‌افزار CST الگوی تشعشعی آنتن محاسبه می‌شوند.

$$\varphi = \frac{360 \times d \times \sin \theta}{\lambda} \quad (15)$$

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، کاهش بهره آنتن در نقاط کور به وسیله لایه تطبیق جبران و محل نقاط کور که با فلش مشخص شده‌اند در آرایه ۸ عنصری از ۳۶° به ۴۲° و در آرایه ۴۸ عنصری از ۳۲° به ۴۲° منتقل شده است. حضور لایه تطبیق سبب افزایش سمت‌گرایی آنتن در حدود ۷ dB در نقطه کور آنتن (۳۲°) شده است.

همچنین ضرایب انعکاس فعال برای آرایه در حضور لایه تطبیق همگن محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌گردد، مقدار ضریب انعکاس در فرکانس مرکزی (۱۰/۲ GHz) در بازه پوشش  $\pm 42^\circ$  کمتر از -10 dB می‌باشد.



شکل (۹): مقایسه چرخش الگوی تشعشعی آنتن ۸ عنصری

در تطبیق امپدانس باید شرط  $Z_{central-WAIM}(f, \theta) = Z^*_{air}(f, \theta)$  در فرکانس و زاویه چرخش آرایه تأمین شود و با استفاده از یک روش بهینه‌سازی، شاخص‌های مؤثر لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده استخراج شود. اگر طبق شاخص‌های استخراج‌شده، شرایط تطبیق برقرار نبود؛ شاخص‌های لایه تطبیق امپدانس زاویه گسترده تغییر کرده و دوباره امپدانس محاسبه می‌شود و این حلقه تا دست‌یابی به مقادیر مناسب، تکرار می‌شود. در این روش به دلیل نبود فرم بسته معادله امپدانس، از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک کمک گرفته شده است [۲۱]. ضرایب انعکاس فعال المان مرکزی کمتر از -10 dB در بازه زاویه‌ای مورد نظر، معیار توقف الگوریتم می‌باشد. تابع هزینه بهینه‌سازی  $\Theta(\epsilon, \mu, d)$  به صورت حداقل مربع اختلاف بین  $R_{ref}$  و  $R_{center}$  تعریف می‌شود [۱۶].

$$\Theta(\epsilon, \mu, d, \theta) = \sum_{\theta=0}^{\theta_{max}} [R_{ref} - R_{center}(\theta)]^2 \quad (12)$$

$\epsilon$  و  $\mu$  به ترتیب تانسورهای<sup>۱</sup> ضریب دی‌الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی<sup>۲</sup> و  $d$  ضخامت لایه است (رابطه (۱۳) و رابطه (۱۴)). در این معادله با میل دادن تابع هزینه به سمت صفر، به هدف دست می‌یابیم.

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mu_r = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

در جدول (۱) محدوده تغییرات شاخص‌های بهینه‌سازی بیان شده است.

جدول (۱): محدوده تغییرات شاخص‌های بهینه‌سازی

شاخص‌های بهینه‌سازی	دامنه تغییرات
$\mu_x = \mu_y$	۰/۲-۵/۵
$\mu_z$	۰/۲-۵/۵
$\epsilon_x = \epsilon_y$	۰/۲-۵/۵
$\epsilon_z$	۰/۲-۵/۵
$d$	۲/۹-۴/۹

$d$  ضخامت لایه تطبیق بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

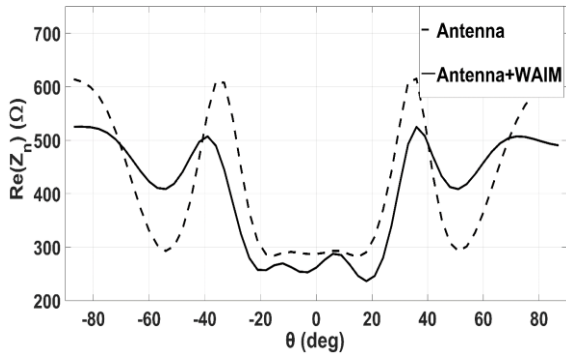
## ۷- نتایج شبیه‌سازی

با تغییر شاخص‌های لایه ناهمسانگرد، تابع هزینه به کمترین مقدار

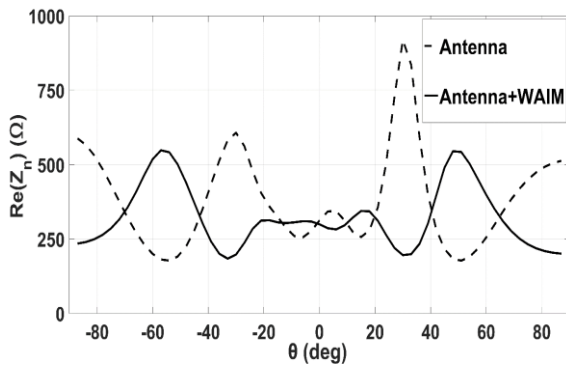
<sup>۱</sup> Tensor

<sup>۲</sup> Permeability

حالت حضور و عدم حضور لایه ناهمسانگرد رسم و عدم تطبیق در نقاط کور به صورت یک بیشینه بسیار بزرگ در نمودار امپدانس مشخص شده است. با اضافه شدن لایه تطبیق، مقدار بیشینه امپدانس کاهش یافته و به زوایای دورتر منتقل شده است.

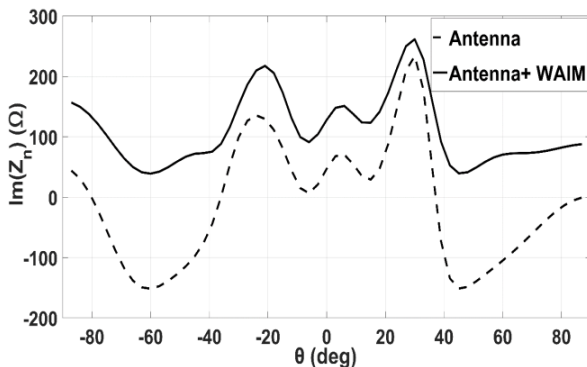


شکل (۱۳): مقایسه قسمت حقیقی امپدانس آنتن ۸ عنصری

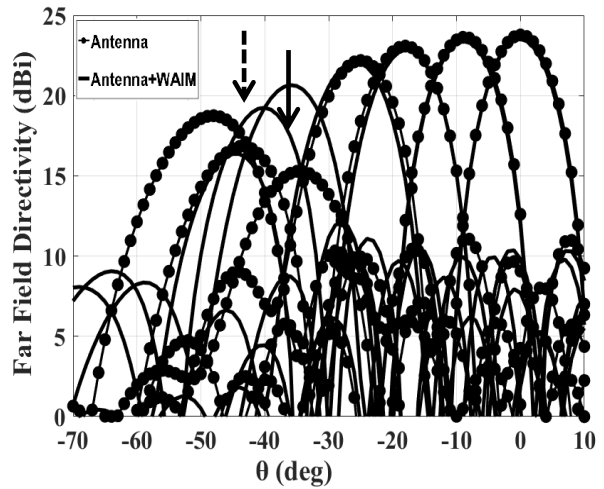


شکل (۱۴): مقایسه قسمت حقیقی امپدانس آنتن ۴۸ عنصری

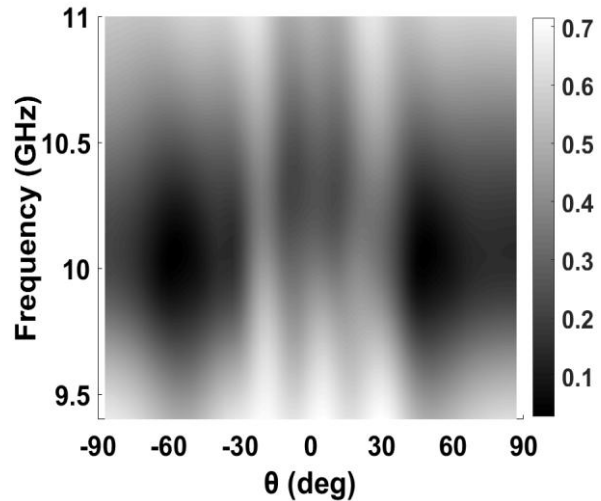
مقادیر موهومی امپدانس آنتن در دو حالت حضور و عدم حضور لایه ناهمسانگرد در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده و در نقاط کور به صورت یک تغییر علامت در نمودار امپدانس مشخص شده است. لایه تطبیق باعث کاهش این تغییر علامت شدید امپدانس در زوایای بزرگ‌تر شده است.



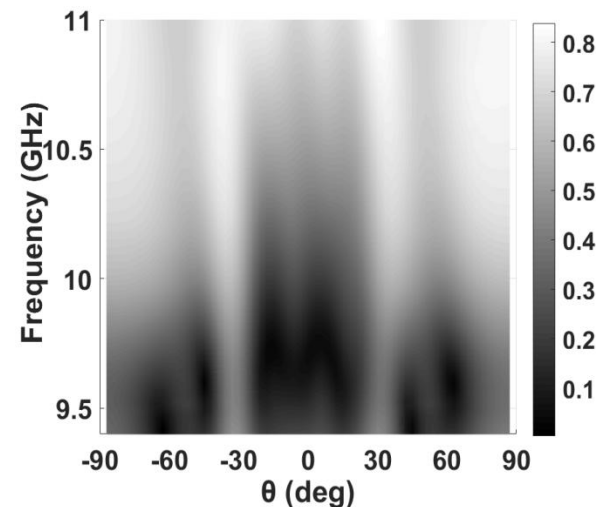
شکل (۱۵): مقایسه قسمت موهومی امپدانس آنتن ۸ عنصری



شکل (۱۰): مقایسه چرخش الگوی تشعشی آنتن ۴۸ عنصری



شکل (۱۱): ضریب انعکاس فعال آنتن ۸ عنصری در حضور لایه تطبیق



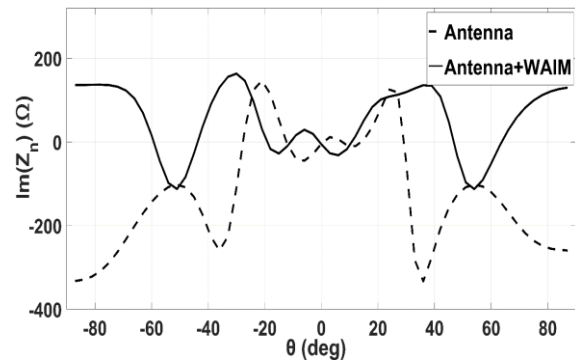
شکل (۱۲): ضریب انعکاس فعال آنتن ۴۸ عنصری در حضور لایه تطبیق

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مقادیر حقیقی امپدانس آنتن در دو

محدوده پویش آنتن آرایه فازی مایکرواستریپی به کار رفته است. با کمک روابط ضریب انعکاس فعال و شبیه‌سازی آنتن، امیدانس عنصر مرکزی آنتن محاسبه و سپس با روش الگوریتم ژنتیک، خصوصیات لایه تطبیق مناسب استخراج می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزارهای CST و HFSS، کارآمدی ساختار پیشنهادی به‌عنوان لایه تطبیق امیدانس زاویه گسترده را نشان می‌دهد. حضور لایه تطبیق سبب افزایش سمت‌گرایی آنتن در حدود ۷ dB در نقطه کور آنتن شده است. محدوده پویش آنتن از  $\pm 34^\circ$  به  $\pm 42^\circ$  افزایش یافته است. این لایه را می‌توان با استفاده از ساختارهای فرامادی پیاده‌سازی نمود.

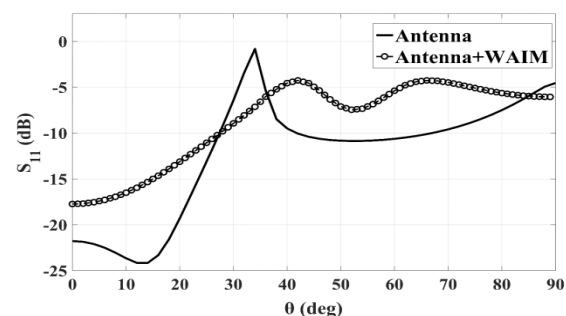
## ۹- منابع

- [1] Y. Haghian, S. H. Mohseni Armaki, M. Kazerooni, "Design, Simulation and Realization of S band Circular Polarization Microstrip Array Antenna," Applied. Electromagnetic, No. 1, pp. 49-54, 2015 (In Persian).
- [2] D. M. Pozar, "Scanning characteristics of infinite arrays of printed antenna subarrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 40, No. 6, pp. 666-674, 1992.
- [3] R. B. Waterhouse, "The use of shorting posts to improve the scanning range of probe-fed microstrip patch phased arrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 3, pp. 302-309, 1996.
- [4] W.-J. Tsay and D. M. Pozar, "Radiation and scattering from infinite periodic printed antennas with inhomogeneous media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 11, pp. 1641-1650, 1998.
- [5] R. L. Chen, D. R. Jackson, J. T. Williams, and S. A. Long, "Scan impedance of RSW microstrip antennas in a finite array," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 3, pp. 1098-1104, 2005.
- [6] T. Crépin et al., "Blind spot mitigation in phased array antenna using metamaterials," In the Int. Radar Conf, 2014, pp. 1-4.
- [7] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, "Microstrip antennas: the analysis and design of microstrip antennas and arrays" John Wiley & Sons Inc.: New Jersey, 1995.
- [8] H. Moghadas, A. Tavakoli, and M. Salehi, "Elimination of scan blindness in microstrip scanning array antennas using defected ground structure," AEU-International Journal of Electronics and Communications, Vol. 62, No. 2, pp. 155-158, 2008.
- [9] M. Isa et al., "A technique of scan blindness elimination for planar phased array antenna using miniaturized EBG," Journal of Teknologi, Vol. 69, No. 2, pp. 11-15, 2014.
- [10] Z. Iluz, R. Shavit, and R. Bauer, "Microstrip antenna phased array with electromagnetic bandgap substrate," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 6, pp. 1446-1453, 2004.
- [11] S. Sajuyigbe, "Electromagnetic metamaterials for antenna applications," Ph.D. Thesis, Duke Univ., Durham, NC, 2010.
- [12] E. Magill and H. Wheeler, "Wide-angle impedance matching of a planar array antenna by a dielectric sheet," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, No. 1, pp. 49-53, 1966.
- [13] S. Sajuyigbe, M. Ross, P. Geren, S. Cummer, M. Tanielian, and D. Smith, "Wide angle impedance matching metamaterials for waveguide-fed phased-array antennas," IET Microwave, Antennas & Propagation, Vol. 4, No. 8, pp. 1063-1072, 2010.



شکل (۱۶): مقایسه قسمت موهومی امیدانس آنتن ۴۸ عنصری

در انتها جهت معرفی لایه تطبیق پیشنهادی برای آرایه‌های بزرگ، آنتن آرایه‌ای بی‌نهایت به‌همراه ریدوم در نرم‌افزار HFSS تحلیل و با مقایسه با مقادیر موج برگشتی در درگاه<sup>۱</sup> آنتن جابه‌جایی نقاط کور از  $34^\circ$  به  $42^\circ$  نمایان شده است (شکل ۱۷).



شکل (۱۷): مقایسه تلف برگشتی در آنتن آرایه بی‌نهایت

همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، عملکرد لایه تطبیق به‌دست‌آمده در این پژوهش نسبت به لایه تطبیق پیشنهادی در [۱۵] برای آنتن آرایه‌ای مایکرواستریپ رشد قابل قبولی داشته است. همچنین لازم در [۱۵] آنتن آرایه‌ای ساخته و سپس به‌کمک اندازه‌گیری، ضرایب تزویج بین عنصر مرکزی با عناصر دیگر آرایه به‌دست آمده است که باعث افزایش پیچیدگی حل مساله می‌شود.

جدول (۳): مقایسه لایه تطبیق پیشنهادی با تحقیقات پیشین

مرجع	فرکانس (GHz)	تعداد عناصر	افزایش دامنه الگوی تشعشعی در نقاط کور (dB)
[۱۵]	۱۰	۱۰۰	۴
لایه پیشنهادی	۱۰/۲	۴۸	۷

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع لایه تطبیق ناهمسانگرد طراحی و برای بهبود

<sup>۱</sup>Port



- [18] E. Adas, F. De Flaviis, and N. G. Alexopoulos, "Integrated microstrip antennas and phased arrays with mode-free electromagnetic bandgap materials for scan blindness elimination," *Electromagnetics*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-16, 2017.
- [19] N. R. Labadie, S. K. Sharma, and G. M. Rebeiz, "A novel approach to beam steering using arrays composed of multiple unique radiating modes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* ., Vol. 63, No. 7, pp. 2932-2945, 2015.
- [20] F. Silvestri, L. Cifola, and G. Gerini, "Diamagneto-Dielectric Anisotropic Wide Angle Impedance Matching Layers for Active Phased Arrays," *Progress in electromagnetics research B*, Vol. 70, pp 1-12, 2016.
- [21] R. L. Haupt and S. E. Haupt, "Practical genetic algorithms" John Wiley & Sons Inc.: New Jersey, 2004.
- [14] T. R. Cameron and G. V. Eleftheriades, "Analysis and characterization of a wide-angle impedance matching metasurface for dipole phased arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* ., Vol. 63, No. 9, pp. 3928-3938, 2015.
- [15] P. Rodriguez-Ulibarri et al., "Metaradome for blind spot mitigation in phased-array antennas," *Eu. Conf. on Antennas and Propa.*, 2014, 2504-2508.
- [16] P. Rodríguez Ulibarri et al., "Experimental demonstration of metamaterials application for mitigating scan blindness in phased array antennas," *EPJ Applied metamaterials*, Vol. 3, No. 9, pp 1-9, 2016.
- [17] A. K. Bhattacharyya, "Phased array antennas: Floquet analysis, synthesis, BFNs and active array systems"; John Wiley & Sons Inc.: New Jersey, 2006.

## Beam width expansion of microstrip array antenna by wide angle impedance matching layer

M. Safari Dehnavi, S. M. J. Razavi\*, S. H. Mohseni Armaki

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 12/09/2018, Accepted: 02/03/2019)

### Abstract

*In this paper, a new method for calculating the active reflection coefficient of an array antenna has been proposed, and accordingly an anisotropic wide-angle impedance matching layer has been designed to mitigate blind spots. The designed antenna consists of a microstrip array with rectangular arrangement. The space between the elements in the mentioned array is equal to 0.63 times the wavelength in X band. In order to compensate the impedance mismatch near the blind spots between the antenna and the free space above the aperture and also to increase the antenna scan range, the anisotropic matching layer characteristics are extracted by genetic algorithm optimization method. Finally, its efficiency is investigated in CST Microwave Studio and HFSS software. Compared with other similar techniques, the proposed method is simpler and faster, and does not require fabrication and measurement of coupling coefficients. It is a powerful tool for deriving the active reflection of microstrip array antenna whose analytical equations are difficult to extract. The designed wide-angle impedance matching layer has increased the scan range of antenna from  $\pm 34^\circ$  to  $\pm 42^\circ$  by shifting blind spots.*

**Keywords:** Microstrip array antenna, Blind spots, X band, Optimization, WAIM

---

\* Corresponding author E-mail razavismj@mut.ac.ir

---

## **Beam Width Expansion of Microstrip Array Antenna by Wide Angle Impedance Matching Layer**

**M. Safari Dehnavi, S. M. J. Razavi\*, S. H. Mohseni Armaki**

**Malek-Ashtar University of Technology**

(Received: 12/09/2018, Accepted: 02/03/2019)

### **Abstract**

*In this paper, a new method for calculating the active reflection coefficient of an array antenna has been proposed, and accordingly an anisotropic wide-angle impedance matching layer has been designed to mitigate blind spots. The designed antenna consists of a microstrip array with rectangular arrangement. The space between the elements in the mentioned array is equal to 0.63 times the wavelength in X band. In order to compensate the impedance mismatch near the blind spots between the antenna and the free space above the aperture and also to increase the antenna scan range, the anisotropic matching layer characteristics are extracted by genetic algorithm optimization method. Finally, its efficiency is investigated in CST Microwave Studio and HFSS software. Compared with other similar techniques, the proposed method is simpler and faster, and does not require fabrication and measurement of coupling coefficients. It is a powerful tool for deriving the active reflection of microstrip array antenna whose analytical equations are difficult to extract. The designed wide-angle impedance matching layer has increased the scan range of antenna from  $\pm 34^\circ$  to  $\pm 42^\circ$  by shifting blind spots.*

**Keywords:** Microstrip Array Antenna, Blind Spots, X Band, Optimization, WAIM

---

\* Corresponding author E-mail [razavismj@mut.ac.ir](mailto:razavismj@mut.ac.ir)