

آنتن آرایه شکافی ۶۴ المانی خطی با حفره پستی و تکنولوژی ساخت SIW و با استفاده از تحریک مودهای مرتبه بالاتر در باند Ku

سید علی کیوان^۱ سید همایون عریضی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

A_kayvaan@elec.iust.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران- ایران

h_orazi@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک آنتن آرایه شکافی با حفره پستی طراحی، شبیه سازی و ساخته شده است. ساختار کلی آنتن از سه لایه اصلی تشکیل می‌گردد: ۱. لایه تغذیه ۲. لایه حفره ۳. لایه پلارایزر. به منظور کاهش پیچیدگی در شبکه تغذیه آرایه، از تحریک مودهای مرتبه بالاتر برای آرایه هشت در هشت استفاده شده است. بدین ترتیب علاوه بر سادگی طراحی و ساخت آنتن، به کاهش تلفات و افزایش بازدهی تشعشعی آنتن منجر می‌گردد. به منظور بهبود مشخصات اساسی آنتن از بهینه سازی توسط نرم افزارهای شبیه ساز تمام موج CST و HFSS استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: آنتن آرایه شکافی، حفره پستی، مودهای مرتبه بالاتر

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.3.725

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۸/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: همایون عریضی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

خدمات ماهواره‌ای سیار امروزه به صورت چشم گیری رشد داشته و محبوبیت آن روز افزون است. آنتن‌هایی که بر روی وسایل نقلیه‌ای همچون ماشین، کشتی، قطار و هواپیما نصب می‌شوند باید پاسخگوی این نیاز ضروری باشند. برای اطمینان از صحت برقراری ارتباط و به کار بردن آسان آن در این وسایل، آنتن‌های گیرنده‌ای مورد نیاز است که از خود بهره و بازدهی تشعشعی بالایی نشان دهند و همچنین دارای وزن و ضخامت اندک باشند [۱].

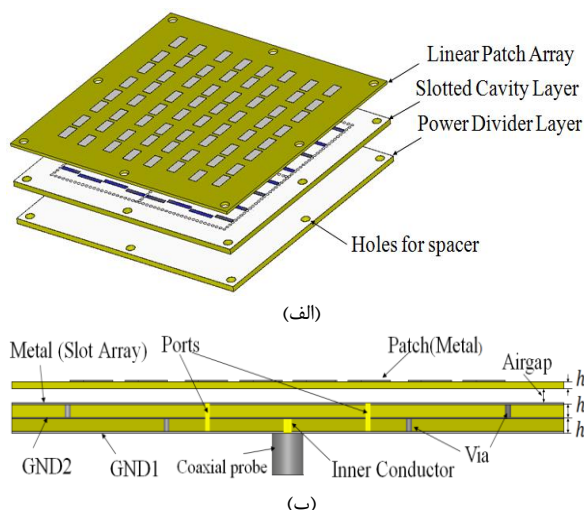
تکنولوژی موجبر مجتمع شده زیرلایه (SIW) یکی از محبوب‌ترین تکنولوژی‌ها با داشتن مشخصاتی همچون ضخامت کم و حجم فشرده است که می‌تواند گین زیادی نیز داشته باشد [۲]. آنتن‌های با حفره پشتی بسیاری بدین منظور طراحی و ساخته شده‌اند که بهره بالایی نیز دارند [۳].

از طرفی استفاده از مودهای مرتبه بالاتر برای تحریک آنتن با حفره پشتی، یکی دیگر از روش‌هایی است که با استفاده از موج ایستا تحقق می‌یابد [۴-۵]. در [۶]، یک آنتن آرایه شکافی با تحریک مودهای مرتبه بالاتر ساخته شده است. برتری این گونه ساختارها نسبت به تحریک مودهای مرتبه پایین بدین صورت است که علاوه بر سادگی طراحی شبکه تغذیه، به کاهش تلفات و افزایش بازدهی تشعشعی می‌انجامد [۷-۱۱]. از دیگر انواع آنتن می‌توان به ساختار فابری پرو اشاره کرد که با استفاده از ساختار چند لایه به بهره بالا می‌توان دست یافت [۱۲]. نمونه آنتن‌هایی که از SIW به عنوان تغذیه استفاده کرده‌اند در مراجع [۱۳، ۱۴] دیده می‌شود.

در این مقاله، یک آنتن آرایه شکافی ۶۴ المانه به سادگی تنها با استفاده از یک کابل کوکسیال تحریک می‌گردد. چهار حفره کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند (هر کدام ۱۶ المان) و مود TE440 در هر یک شکل می‌گیرد. این نحوه چیدمان المان‌های آرایه به آنتنی با بهره بالا و حجم اندک و همچنین بازدهی شکافی بالایی می‌انجامد.

۲- طراحی آنتن

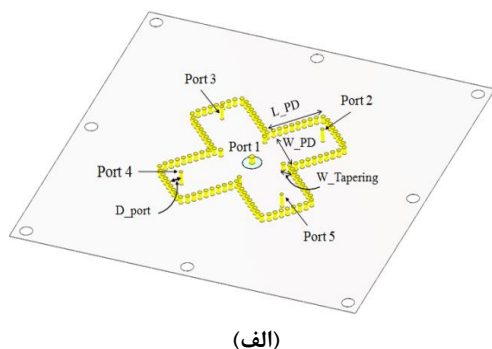
شکل (۱)، شمای کلی آنتن را که از سه لایه کلی مقسم توان، حفره‌های شکاف دار و لایه پلاریز در دست شده است را نشان می‌دهد. طراحی و شرح هر یک از این بخش‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل (۱): نمای کلی ساختار (الف) نمای سه بعدی (ب) نمای جانبی

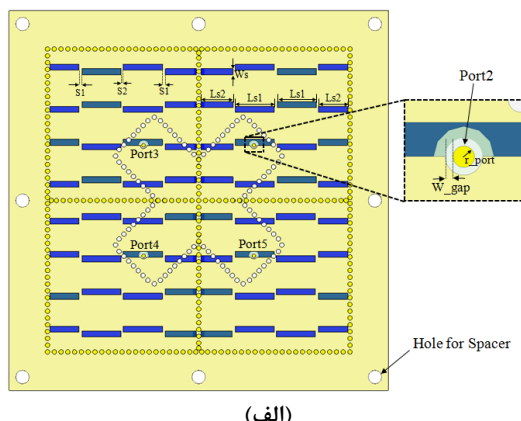
۲-۱- بخش مقسم توان

همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود، مقسم توان SIW طراحی شده در زیرلایه اول برای تحریک چهار حفره رزونانسی در زیرلایه دوم استفاده می‌شود. این مقسم توان از چهار حفره مستطیلی SIW با بازشدگی‌های باریک‌شونده^۱ تشکیل می‌شود و توسط پروب کابل کوکسیال در مرکز تحریک می‌گردد. چهار پروب نیز در انتهای هر حفره مستطیلی از مقسم توان قرار داده شده و به حفره رزونانسی لایه فوقانی که شامل آرایه شکاف‌ها هستند، موج را منتقل می‌کنند. امپدانس پورت ورودی و پورتهای مقسم توان را می‌توان با تغییر در عرض W-Tapering که باریک‌شوندگی حفره را ایجاد می‌کند و همچنین D-port که فاصله پروب‌های واسط تا لبه انتهایی حفره است، تعیین می‌گردد. پارامترهای L_{PD} و W_{PD} به گونه انتخاب شده‌اند که مکان پورت میان لایه‌ای در یکی از قله‌های میانی میدان TE440 باشد. سپس این دو پارامتر و دیگر پارامترهای موجود در مقسم توان با استفاده از بهینه‌سازی تعیین شده‌اند. اختلاف فاز میان هر کدام از پورت‌های مقسم توان ناچیز است و این به دلیل وجود تقارن در هر چهار بخش تقسیم‌کننده توان می‌باشد. چنین ساختار تزویج مرکبی نه تنها باعث بهبود در تطبیق بین مقسم توان و بخش حفره تشدید می‌گردد، بلکه باعث بهبود در عملکرد تشعشعی ساختار نسبت به روش مرسوم تزویج روزنه دارد.

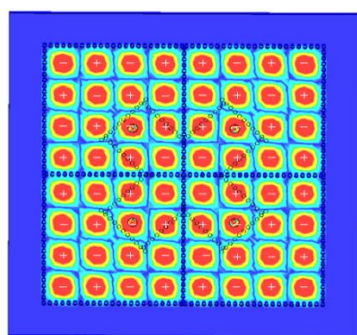


(الف)

32.9mm×32.9mm×1.524mm در فرکانس‌های کاری مختلف ایجاد می‌گردند که بیستمین آن‌ها مد نظر است و دارای ۱۶ قله است.

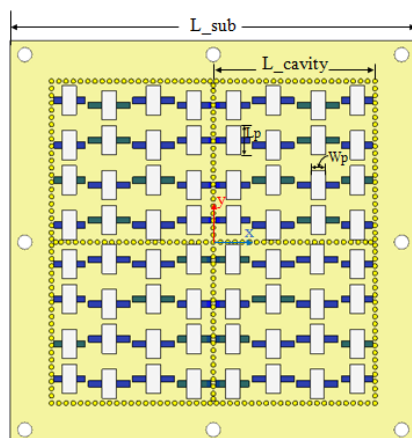


(الف)



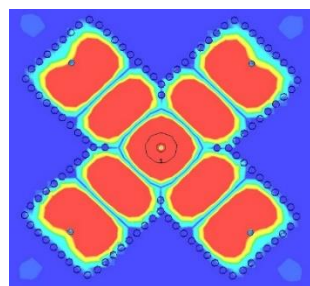
(ب)

شکل (۳): (الف) ساختار حفره‌های شکاف دار (ب) میدان الکتريکی مود مرتبه بالاتر



شکل (۴): محل قرارگیری دیپل ها بر روی لایه سوم

ملاحظه می‌گردد که هر چه به سمت مودهای شماره بالاتر حرکت کنیم فاصله میان مود کاری با مود بعدی کمتر خواهد شد. بنابراین موجب کاهش پهنای باند کاری آنتن تحریک شده توسط مودهای مرتبه بالاتر می‌شود. در واقع می‌توان آنتن را با مودهای بسیار مرتبه بالاتر نیز تحریک کرد برای مثال مود TE880 اما چیزی که از دست می‌دهیم پهنای باند کاری و الگوی تشعشعی قابل قبول آنتن است. هر یک از محفظه‌ها در مود کاری TE440 تحریک شده است و با کنار هم قرار دادن چهار محفظه رزونانسی آرایه‌ای هشت در هشت با ۶۴



(ب)

شکل (۲): ساختار مقسم توان (الف) نمای سه بعدی (ب) میدان الکتريکی شکل گرفته درون مقسم توان

شکل (۲-الف) نشان می‌دهد که پورت شماره ۱، که همان پروب کواکسیال است، تحریک کل آنتن را بر عهده دارد. مابقی پورت‌ها (۲، ۳، ۴ و ۵) تنها پورت‌های واسط میان لایه مقسم توان و لایه حفره تشدید هستند و وظیفه تحریک چهار حفره تشدید را بر عهده دارند و پورت‌های میان‌لایه‌ای هستند. در شکل (۲-ب)، توزیع میدان‌های الکتريکی درون مقسم توان را می‌توان مشاهده نمود و تقارن ایجاد شده بین چهار بخش در این شکل نمایان است. طراحی‌های صورت گرفته برای موجبری این چهار حفره مستطیلی مقسم توان در فرکانس کاری 14GHz است.

۲-۲- بخش حفره‌های شکافدار و دیپل ها

می‌توان با استفاده از تکنولوژی موجبر مجتمع در زیر لایه (SIW) به خواص حفره تشدید مستطیلی مرسوم رسید که در عین حال مزیت کم حجم بودن ساختار و افزایش بازدهی تشعشعی آنتن را به همراه دارد. یک روش برای حذف تلفات ناشی از دیواره‌های جانبی آنتن‌های با حفره پشته‌ای استفاده از حفره‌های با مودهای مرتبه بالاتر است. از طرفی به کارگیری حفره با تحریک مودهای بالاتر، پیچیدگی شبکه تغذیه در آرایه‌های مسطح را به شدت کاهش می‌دهد. با استفاده از رابطه (۱) ابعاد محفظه ساخته شده با وایا‌های فلزی SIW در فرکانس کاری مورد نظر بدست می‌آید.

$$f_{n01} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{n}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{l}{L_{eff}}\right)^2} \quad (1)$$

که L_{eff} و W_{eff} به ترتیب عرض و طول معادل SIW می‌باشند. همچنین می‌توان از روش تحلیل مقادیر ویژه^۲ برای شبیه سازی ساختار در نرم افزار CST Studio بهره برد و مودهای تحریکی در فرکانس‌های مختلف را درون یک حفره تشدید مشاهده نمود. در آنتن پیشنهادی، طراحی ابعاد حفره تشدید باید به گونه ای باشد تا مود تحریک شده در حوالی فرکانس ۱۴ گیگاهرتز، TE440 باشد. فرکانس کاری هر یک از مودها مختلف بوده و تنها مود مورد نظر که همان مود TE440 است در حوالی فرکانس مرکزی آنتن انتشار می‌یابد. مودهای مختلفی در محفظه تشدید به ابعاد

المان بوجود می‌آید.

پارامترهای اساسی طراحی در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. همچنین محل قرار گیری هر یک از پورت‌های میان‌لایه‌ای ۲ تا ۵ در این شکل نشان داده شده است. شایان ذکر است که با توجه به شکل مقسم توان، محل این پورت‌ها به گونه‌ای تعریف شده است که بر روی یکی از قله‌های مرکزی مود TE440 باشد. شکل (۳-ب) توزیع میدان الکتریکی را در این چهار حفره تشدیدی نشان می‌دهد. علائم مثبت و منفی نمایانگر جهت میدان است. تعیین کننده اصلی در جهت میدان‌ها، همان پورت‌های ورودی به هر حفره تشدیدی هستند که با علامت منفی و رو به پایین نشان داده شده‌اند. بدین ترتیب هر حفره با حفره کناری خود ۱۸۰ درجه اختلاف فاز در تحریک قله‌های میدان خواهد شد.

برای طراحی آرایه شکاف‌ها با توجه به تئوری آرایه شکافی محل و طول شکاف‌ها را تعیین می‌کنیم. شکاف‌ها را بر روی هر یک از قله‌های میدان TE440 قرار می‌دهیم تا حداکثر تشعشع را داشته باشیم. میدان‌های الکتریکی که در دو شکاف کناری توزیع می‌شوند دارای فاز مختلفی هستند، بنابراین این شکاف‌ها را نسبت به یکدیگر با آفستی^۲ در جهت مخالف یکدیگر قرار می‌دهیم تا تمامی ۱۶ شکاف هر یک از این حفره‌ها هم فاز تشعشع کنند. هر یک از این آنتن‌های با حفره پشتی تحریک شده توسط مود TE440 را می‌توان یک آنتن شکافی طولی موجبری مبتنی بر ۴SIW دانست. در واقع آنتن آرایه شکافی با مود TE440 متشکل از چهار موجبر ۱ در ۴ است که ما دیواره‌های بین موجبرها را برداشته ایم (شکل (۴-۷)). این آرایش یک متغیر جدید را به مراحل طراحی اضافه می‌کند. می‌توان با نوع تغذیه ولتاژهای مود نسبی در شاخه‌های موجبری مختلف را تعیین نمود. این یک پارامتر اضافی است که در روابط طراحی داخل می‌شود. در این صورت با استفاده از اندیس‌های دوگانه، روابط طراحی آرایه صفحه‌ای به صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = K_1 f_{mn} \sin v(x_{mn}) \frac{V_{mn}^s}{V_{mn}} \quad (2)$$

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = \frac{K_2 f_{mn}^2}{Z_{mn}^a} \quad (3)$$

که در آنها K1 و K2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_1 = -j \left[\frac{8(a/b)}{\pi^2 \eta G_0 (\beta/k)} \right]^2 \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \quad (5)$$

بنابراین داریم:

$$f_{mn} = \left\{ \frac{\cos \left[\left(\frac{\beta}{k} \right) y_{mn} v(x_{mn}) \right] - \cos[y_{mn} v(x_{mn})]}{\sin[y_{mn} v(x_{mn})]} \right\} \times \sin \left(\frac{\pi x_{mn}}{a} \right) \quad (6)$$

که در آن $y_{mn} = l_{mn}/l_r(x_{mn})$ طول نرمالیزه شکاف و $(x_{mn}, 2l_{mn})$ آفست و طول شکاف l_{mn} در شاخه موجبری n ام

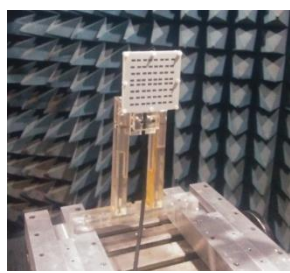
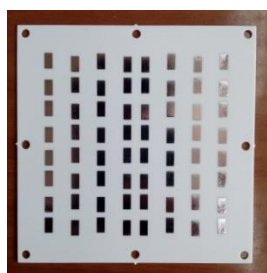
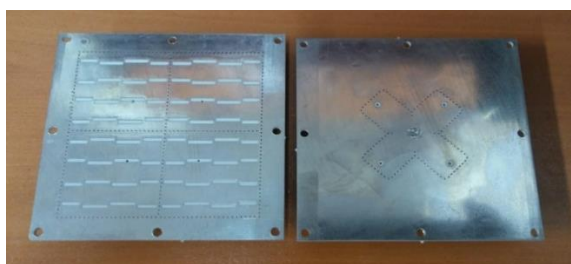
می‌باشد. فرض می‌کنیم که فواصل شکاف‌های هر شاخه موجبری از همدیگر تشدیدی است (موج ایستا است). این مسئله باعث می‌شود که ولتاژهای مود به صورت زیر باشند:

$$V_{mn} = (-1)^n V_n \quad (7)$$

که در آن V_n ولتاژ مود مرجع در شاخه موجبری n ام است. بنابراین برای رابطه اول طراحی داریم:

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = K_1 |f_{mn}| \sin v(x_{mn}) \frac{V_{mn}^s}{V_n} \quad (8)$$

تغییر متوالی در جهت آفست شکاف‌ها، رابطه زیر را باعث می‌شود:



شکل (۵): نمونه ساخته شده و اندازه گیری مشخصات آنتن

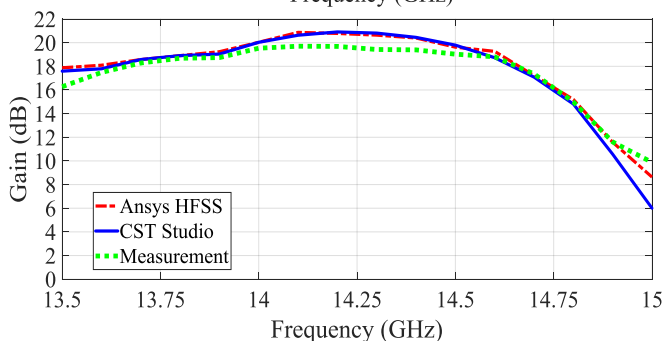
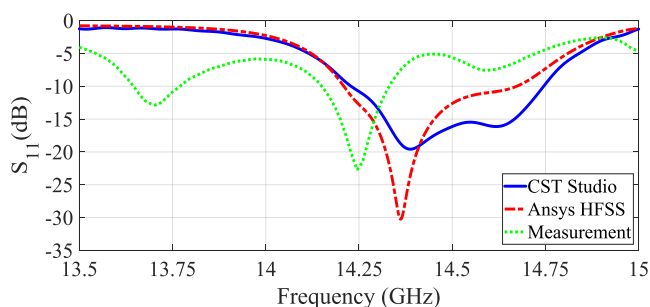
$$\sin \left(\frac{\pi x_{mn}}{a} \right) = (-1)^m \left| \sin \left(\frac{\pi x_{mn}}{a} \right) \right| \quad (9)$$

برای استفاده از روابط طراحی فوق، باید مقادیر اولیه برای V_n در نظر گرفته شود که در نهایت به یک دستگاه چند معادله چند مجهول می‌رسد، که با حل آن به طول هر یک از شکاف‌ها و آفست آن‌ها دست می‌یابیم. برای افزایش بهره آنتن از یک لایه پلاریزر که متشکل از پنج هابی روی زیرلایه RO4003 می‌باشد استفاده شده است. طول این پنج هاب برابر نصف طول موج کاری آنتن در نظر گرفته می‌شود و در نهایت ابعاد پنج بهینه سازی می‌گردد. دلیل باریک بودن پهنای باند امپدانس ضخامت کم زیرلایه آنتن است، و اینکه تنها مود TE440 در محفظه تحریک می‌گردد. به عنوان یک راهکار برای افزایش پهنای باند امپدانس بدون افزایش ضخامت زیرلایه، اتصال پروب تحریک محفظه را از شکاف‌ها قطع کرده و دایره‌ای به شعاع 0.73mm را دور آن خالی کردیم، شکل (۳-الف). بنابراین با در نظر گرفتن این نوع طراحی دیگر نیاز به لحیم کاری قسمت فوقانی پروبی که از لایه مقسم توان به لایه حفره تشدیدی رسیده، نیست. همچنین با این کار از خطاهای ناشی از لحیم کاری که می‌تواند مشکلاتی را، به

خصوص در باند موج میلی متری ایجاد کند، جلوگیری به عمل آمد.

۳- شبیه سازی، ساخت و اندازه گیری

شکل (۵)، نمونه ساخته شده آنتن را نشان می دهد. مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری پارامتر پراکندگی در شکل (۶-الف) به نمایش در آمده است. پهنای باند امپدانسی ۱.۳٪ در بازه 14.1-



شکل (۶): نمودارهای شبیه سازی و اندازه گیری (الف) پارامتر پراکندگی و (ب) بهره آنتن

14.3 گیگاهرتز می باشد. همانطور که مشاهده می شود پهنای باند در ساخت اندکی نسبت به مقادیر شبیه سازی کاهش یافته که می توان به کیفیت مونتاژ و کانکتور مورد استفاده نسبت داد. حداکثر بهره آنتن ساخته شده به 19.6dB رسیده است که به مقادیر شبیه سازی نزدیک است. همچنین میزان بازدهی تشعشعی آنتن به حداکثر ۸۰ درصد رسیده است که به دلیل استفاده از زیرلایه Rogers//Duroid 4003 است. در شکل (۷-الف) و (۷-ب) الگوهای تشعشعی آنتن نشان داده شده اند. میزان سطوح گلبزرگ کناری آنتن به حداکثر مقادیر 7dB و 5dB به ترتیب برای صفحات E و H رسیده است، که البته از مقادیر شبیه سازی شده 15dB و 13dB- بیشتر است. دلیل این امر نبود دقت کافی در اتاق تست آنتن می باشد. در جدول (۱) مقایسه ای بین آنتن های آرایه ای خطی ۶۴ المانی برای تکنولوژی های ساخت SIW و Gapwaveguide انجام شده است.

همانطور که مشاهده می شود در مقایسه با دیگر آنتن ها

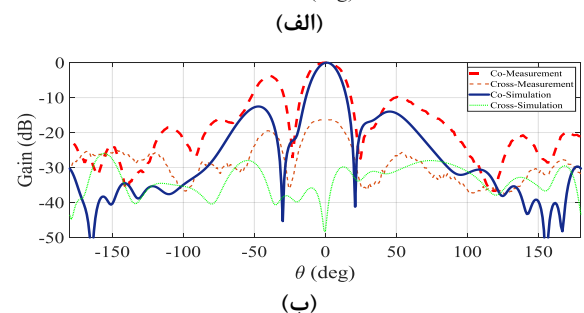
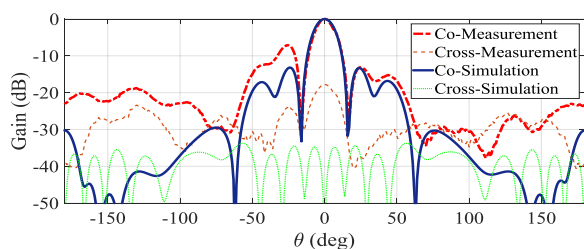
آنتن ساخته شده تنها نسبت به تکنولوژی Gap Waveguide در مرجع [10] دارای بازدهی روزنه کمتری می باشد و نسبت به کارهای مشابه SIW قبلی از بازدهی روزنه بیشتری برخوردار است. شایان ذکر است که هزینه ساخت برای تکنولوژی Gap Waveguide بسیار بیشتر از SIW می باشد.

جدول (۱): مقایسه آنتن های آرایه ای خطی 8 × 8

بازدهی روزنه	طول آنتن	حداکثر بهره	تکنولوژی ساخت	فرکانس کاری	مرجع
42.3%	۸۹،۷	23.8dBi	SIW و Gap Waveguide	87-101 GHz	[7]
19%	۹۶،۸	22.8dBi	SIW	60 GHz	[9]
80%	۷۲،۸	25dBi	Gap Waveguide	60 GHz	[10]
74%	۹۹،۸	19.8dBi	SIW	14.2 GHz	این کار

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش نوین در تحریک مودهای مرتبه بالاتر و برای آرایه ۶۴ المانی مطرح شده است. با این روش علاوه بر کاهش تلفات ناشی از فلز، بازدهی تشعشعی آنتن نیز به مراتب بهبود می یابد. تمامی ۶۴ المان با یک کابل کواکسیال و یک مقسم توان یک به چهار تحریک می شوند. بازدهی تشعشعی حداکثر ۸۰٪ در شبیه سازی بدست آمده است. همچنین حداکثر بهره 19.6dB با پهنای باند 1-dB برای ریبیل گین آنتن به میزان ۷٪ دست یافتیم. علاوه بر این بازدهی روزنه آنتن با توجه به ابعاد و فرکانس کاری چیزی در حدود ۷۴٪ شد.



شکل (۷): نمونه ساخته شده و اندازه گیری مشخصات آنتن در

صفحات (الف) E و (ب) H

مراجع

- [1] S. Ye et al., "High-gain planar antenna arrays for mobile satellite communications," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 54, no. 6, pp. 256-268, Dec. 2012.
- [2] Elboushi, A.; Haraz, O.M.; Sebak, A.; Denidni, T., "A new circularly polarized high gain DRA millimeter-wave antenna," in Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE, vol., no., pp. 1-4, 11-17 July 2010.
- [3] H. Sun, Y. X. Guo and Z. Wang, "60-GHz Circularly Polarized U-Slot Patch Antenna Array on LTCC," in IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 1, pp. 430-435, Jan. 2013.
- [4] A. B. Guntupalli and K. Wu, "60-GHz Circularly Polarized Antenna Array Made in Low-Cost Fabrication Process," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, no. , pp. 864-867, 2014.
- [5] T. Zhang, Y. Zhang, L. Cao, W. Hong and K. Wu, "Single-Layer Wideband Circularly Polarized Patch Antennas for Q-Band Applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 1, pp. 409-414, Jan. 2015.
- [6] Y. Li, Z. N. Chen, X. Qing, Z. Zhang, J. Xu and Z. Feng, "Axial Ratio Bandwidth Enhancement of 60-GHz Substrate Integrated Waveguide-Fed Circularly Polarized LTCC Antenna Array," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 10, pp. 4619-4626, Oct. 2012.
- [7] B. Cao, H. Wang, Y. Huang and J. Zheng, "High-Gain L-Probe Excited Substrate Integrated Cavity Antenna Array with LTCC-Based Gap Waveguide Feeding Network for W-Band Application," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 12, pp. 5465-5474, Dec. 2015.
- [8] W. Li, K. D. Xu, X. Tang, Y. Yang, Y. Liu and Q. H. Liu, "Substrate Integrated Waveguide Cavity-Backed Slot Array Antenna Using High-Order Radiation Modes for Dual-Band Applications in K -Band," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 9, pp. 4556-4565, Sept. 2017.
- [9] S. Liao, P. Chen, P. Wu, K. M. Shum and Q. Xue, "Substrate-Integrated Waveguide-Based 60-GHz Resonant Slotted Waveguide Arrays With Wide Impedance Bandwidth and High Gain," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 7, pp. 2922-2931, July 2015.
- [10] A. Vosoogh and P. Kildal, "Corporate-Fed Planar 60-GHz Slot Array Made of Three Unconnected Metal Layers Using AMC Pin Surface for the Gap Waveguide," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, pp. 1935-1938, 2016.
- [11] W. Han, F. Yang, J. Ouyang and P. Yang, "Low-Cost Wideband and High-Gain Slotted Cavity Antenna Using High-Order Modes for Millimeter-Wave Application," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 11, pp. 4624-4631, Nov. 2015.
- [12] Azizi Y, Komjani N, Chaychizadeh M. Design, simulation and Fabrication of Circularly Polarized Fabry-Perot Antenna for Ku Band. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2019; 16 (1) :147-154

[۱۳] پالودی، شکبیا؛ نادر کمجانی برچلوئی و مصطفی خنجریان، ۱۳۹۷، مطالعه روش های طراحی و شبیه سازی موجبرهای SIW و RSIW، سومین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، تهران، انجمن فناوری های نوین،

[۱۴] سلطانی، احسان؛ بیژن ذاکری و سید مهدی حسینی اندارگلی، ۱۳۹۴، طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن پچ میکرواستریپ آرایه 2x2 با تغذیه SIW در باند X، فصلنامه رادار ۳-۳

¹ Tapered Openings

² Eigen-mode

³ Offset

