

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن پچ میکرواستریپ آرایه 2×2 با تغذیه SIW در باند X

احسان سلطانی^{۱*}، بیژن ذاکری^۲، سید مهدی حسینی اندارگلی^۳

۱- کارشناسی ارشد ۲ و ۳- استادیار، گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی بابل

(دریافت: ۹۳/۱۲/۰۲، پذیرش: ۹۴/۰۷/۰۲)

چکیده

این مقاله به بررسی و طراحی یک آنتن آرایه‌ای پچ میکرواستریپ 2×2 در فرکانس ۹/۵ GHz برای کاربرد راداری پرداخته است که در شبکه تغذیه خود از مزایای موج‌برهای زیرلایه SIW بهره می‌برد. پچ‌های میکرواستریپ با روش تزویج از شکاف‌هایی روی موج‌بر زیرلایه (SIW)، تحریک می‌شود. این شبکه تغذیه از مبدل کواکسیال به SIW به صورت عمودی و دو تقسیم‌کننده توان از نوع Y تشکیل شده است. آنتن در نرم‌افزار تمام موج CST شبیه‌سازی و سپس نمونه‌ای ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری مطابقت خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. آنتن ساخته شده بهره ۱۱/۶ dB و سطوح گلبرگ‌های کناری کمتر از ۱۴/۵ dB و ۱۸ dB در صفحه E و صفحه H دارد.

کلید واژه‌ها

پچ میکرواستریپ، شکاف تزویج Aperture Coupled، تقسیم‌کننده توان، موج‌بر زیرلایه SIW.

۱. مقدمه

آنتن‌های میکرواستریپ^۱ به خاطر مزایایی از جمله کم حجم بودن، وزن سبک، هزینه پایین و سطح مقطع عرضی کم، قابلیت انعطاف بالا و... جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای راداری و سامانه‌های بیسیم موج میلیمتری دارند [۱]. فناوری روز دنیا به سمت آنتن‌هایی می‌رود که ابعادی کوچک، قابلیت ساخت آسان، وزن سبک و بهره بالایی داشته باشد. بسیاری از این نیازها توسط آنتن‌های پچ میکرواستریپ که با شبکه‌های تغذیه^۲ میکرواستریپ تحریک می‌شوند برآورده می‌شود [۳-۲].

اخیراً با توسعه موج‌برهای زیرلایه‌ای^۳، از آن‌ها به عنوان موج‌برهایی با ابعاد کوچک و کم هزینه برای تغذیه آنتن‌های پچ میکرواستریپ به صورت تزویج از شکاف^۴ استفاده شده است. در مرجع [۴] یک آنتن آرایه‌ای خطی 1×8 شامل هشت تشعشع‌کننده که از روش روزنه تزویج تغذیه می‌شود ساخته شده

است. طراح در این آنتن در حالت پچ تنها، بهره^۵ ۷/۱ dBi در فرکانس ۶۰ GHz و در آرایه خطی بهره ۱۵/۸ dBi و پهنای باند امیدانسی در حدود ۱/۵ درصد به دست آورده است. در مرجع [۵] ساختار آنتن با تغذیه SIW در فرکانس کاری ۶۰ GHz با شکاف-های تزویج طولی و عرضی مورد بررسی قرار گرفته است. این آنتن با شکاف‌های طولی و عرضی^۶ به ترتیب دارای بهره‌ای در حدود ۶/۸ dBi و ۴/۸ dBi و پهنای باندی در حدود ۲۳ درصد می‌باشد. در مرجع [۶] آنتن آرایه‌ای میکرواستریپ مبتنی بر موج‌بر SIW در فرکانس ۲۴ GHz طراحی شده است که این آنتن بهره ۱۱ dB و دارای گلبرگ‌های کناری^۷ ۳۳ dB و ۲۲ dB در صفحه‌های H و E است.

تحریک با خطوط میکرواستریپ^۸ معمولاً تلفات زیادی به خصوص در فرکانس‌های موج میلیمتری دارد و نیز باعث نامطلوب شدن الگوی تشعشعی^۹ میدان آنتن می‌شود [۷]. استفاده از

* رایانامه نویسنده پاسخگو: e.soltani.c@gmail.com

¹ Microstrip antennas

² Feednetwork

³ Substrate Integrated Waveguide

⁴ Aperture Coupled

⁵ Gain

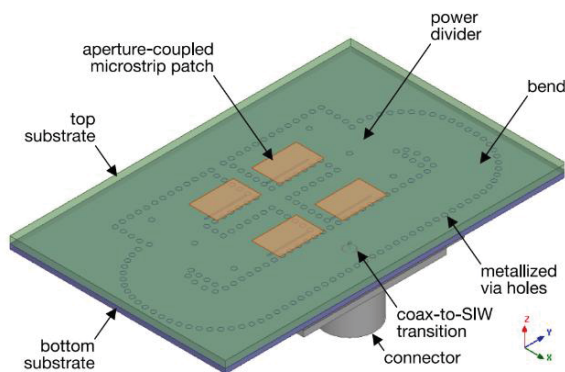
⁶ longitudinal and transversal slot

⁷ Side lobe level (SLL)

⁸ Microstrip transmission line

⁹ Pattern

آنتن تشکیل می‌دهد. پچ‌های میکرواستریپ به روش تزویج از روزنه یا شکاف به‌وسیله شبکه تغذیه SIW تحریک می‌شود. شبکه تغذیه آنتن خود از چهار قسمت تشکیل یافته است که عبارتند از مقسم توان^۳، خط انتقال خمیده^۴، مبدل کواکسیال به موج‌بر زیرلایه^۵ و شکاف تزویج. شبکه تغذیه به‌صورت متقارن و هم‌فاز می‌باشد. آنتن آرایه برای تحریک از کانکتور کواکسیال (SMA) استفاده می‌کند که هادی داخلی آن به صفحه هادی بالا و بدنه کانکتور به صفحه هادی پایین برد تغذیه اتصال دارد.



شکل ۱. ساختار کلی آنتن آرایه [۶]

شکل ۲ ساختار یک آنتن پچ میکرواستریپ تنها که با روش تزویج از تغذیه SIW تحریک می‌شود، نمایش می‌دهد. پچ مستطیلی میکرواستریپ با طول w_p و عرض l_p روی زیرلایه بالایی با دی الکتریک ϵ_r و ضخامت برد h قرار گرفته‌اند. در زیرلایه پایینی که شبکه تغذیه آنتن را تشکیل می‌دهد دو ردیف از via ها مرکز به مرکز روبروی هم با فاصله w_{SIW} قرار گرفته است که این via ها صفحه هادی پایینی را به صفحه هادی بالایی متصل می‌کند. Via ها با قطر d_{via} و فاصله‌ای به اندازه s در کنار هم چیدمان شده است. موج‌بر SIW در مود غالب TE₁₀ طراحی گردیده است. صفحه هادی بالای برد زیرین، برد شبکه تغذیه، یک صفحه زمین یا رفلکتور را برای پچ‌های میکرواستریپ فراهم می‌کند. شکاف‌های طولی با ابعاد اندازه w_s و l_s بر روی صفحه بالایی برد شبکه تغذیه SIW واقع شده است. مرکز این شکاف‌ها، به اندازه y_s ، از انتهای بسته موج‌بر در حدود یک چهارم طول موج موج‌بر و در جایی که بیشترین موج ساکن تشکیل می‌شود واقع شده است. پچ‌ها به‌صورت متقارن بر روی مرکز روزنه‌ها قرار گرفته است [۶].

تحریک آنتن به روش تزویج از شکاف یکی از روش‌هایی است که تا حدودی این مشکل را برطرف می‌کند اما همچنان تشعشعات ناشی از خطوط میکرواستریپ در پشت آنتن و تلفات توان، عاملی مزاحم محسوب می‌شود. برای رفع این مشکل استفاده از موج‌برها به جای خطوط میکرواستریپ پیشنهاد می‌شود. استفاده از موج‌برهای مستطیلی به‌علت استحکام مکانیکی بالا، شیلدینگ مناسب، توان قابل تحمل بسیار بالا، افت کم و کیفیت بالا می‌تواند گزینه‌ای قابل اجرا برای جلوگیری از تشعشعات مزاحم مدار تغذیه باشد اما موج‌برهای مستطیلی معمولی حجیم و دارای هزینه ساخت بالا می‌باشند و مجتمع‌سازی آن‌ها با مدارهای صفحه‌ای دشوار است. از این رو گزینه مناسب استفاده از موج‌بر زیرلایه‌ای SIW می‌باشد. ساختارهای موج‌بری زیرلایه، SIW، دارای مشخصاتی بسیار شبیه به موج‌برهای مستطیلی^۱ RWG می‌باشد. توزیع میدان در موج‌برهای SIW مشابه توزیع میدان در RWG است اما در SIW به خاطر فاصله‌ی بین حفره‌های فلزی^۲ در دیواره‌ی موج‌بر، فقط مد TE₁₀ قابل انتشار است [۸]. این مدها مشخصات پراکندگی تقریباً یکسانی با مدهای انتشاری در RWG که با دی‌الکتریک پر شده است، دارند. همچنین ساختارهای SIW درحالی‌که مزایای موج‌بر را حفظ می‌کنند، عیوب بیان‌شده در فوق را نیز برطرف می‌کنند. فرمول‌های مختلفی در مراجع [۸، ۹ و ۱۰] برای تبدیل موج‌بر معمولی به SIW ارائه شده است. با توجه به این ویژگی‌ها، ساختارهای SIW می‌تواند گزینه مناسبی برای پیاده‌سازی ادوات مایکروویوی و آنتن‌های فرکانس بالا بخصوص موج میلیمتری باشد. یک موج‌بر زیرلایه SIW، یک ساختار هدایت موج است که مشابه با موج‌بر مستطیلی بوده با این تفاوت که در این ساختار، دیواره‌های جانبی موج‌بر مستطیلی بوسیله حفره‌های فلز اندودشده جایگزین می‌شوند. آنتن مذکور هم از مزایای موج‌برهای زیرلایه و هم از مزایای آنتن‌های میکرواستریپ بهره می‌برد.

۲. ساختار آنتن

ساختار سه‌بعدی آنتن آرایه در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آنتن شامل دو زیرلایه‌ی مجزا با ثابت دی‌الکتریک همسان می‌باشد که زیرلایه بالا را آرایه‌ی ۲×۲ پچ‌های میکرواستریپ و زیرلایه پایینی را شبکه تغذیه

³ Power divider

⁴ Bend

⁵ coax-to-SIW transition

¹ Rectangular waveguide

² Via

در طراحی آنتن از دو زیرلایه استاندارد RO4003 با قطر ۱/۵۲۴mm و ثابت دی‌الکتریک ۳/۳۸ استفاده شده است. لذا طراحی تمام قسمت‌های آنتن بر مبنای مشخصات این زیرلایه انجام گرفته است.

۳-۱. طراحی موج‌بر مستطیلی

عملاً برای انتقال امواج الکترومغناطیسی در هدایت‌کننده مستطیلی^۱ از مد TE₁₀ استفاده می‌شود که آن را مد غالب^۲ یا اصلی می‌نامند، زیرا دارای کمترین فرکانس قطع^۳ در تمام مدهای ممکن در موج‌بر مستطیلی می‌باشد. برای پهنای داده شده در یک هدایت‌کننده، فرکانس کاری باید بزرگتر از فرکانس قطع در مد TE₁₀ و کمتر از فرکانس قطع در مد TE₂₀ باشد. در عمل حد بالای فرکانس را ۵ درصد کمتر از فرکانس قطع TE₂₀ در نظر گرفته می‌شود و حد پایین فرکانس تقریباً ۲۵ درصد بالاتر از فرکانس قطع TE₁₀ خواهد بود تا از ورود به ناحیه تضعیف زیاد در نزدیکی فرکانس قطع جلوگیری شود. با توجه به فرکانس کاری موج‌بر و انتشار موج در مد TE₁₀ ابعاد موج‌بر مستطیلی پر-شده از جنس دی‌الکتریک از مرجع [۱۱] به دست می‌آید.

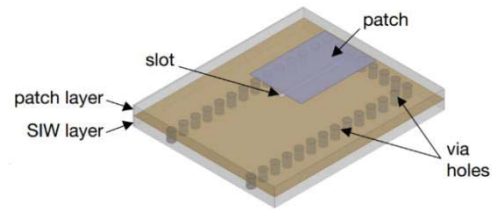
۳-۲. تبدیل موج‌بر مستطیلی به موج‌بر زیرلایه SIW

موج‌بر منطبق بر مدارات مجتمع باید به گونه‌ای طراحی شود که تا حد امکان موج‌بر مستطیلی را شبیه‌سازی کند و معادل آن باشد. با انتخاب دقیق پارامترهای w_{SIW} و s و d یک موج‌بر SIW می‌تواند به عنوان یک موج‌بری با اندازه دیواره افقی a_{RWG} عمل کند. چون دیواره عمودی موج‌بری یک آرایه خطی از via است و بین via فاصله s وجود دارد طراح باید به مقداری از توان امواج الکترومغناطیسی که از میان via تشعشع می‌کند توجه داشته باشد. نشت موج به خاطر میدان الکترومغناطیسی گذرنده از میان فاصله بین هر دو via متوالی با استفاده از فرمول (۱) تقریب زده می‌شود [۱۲].

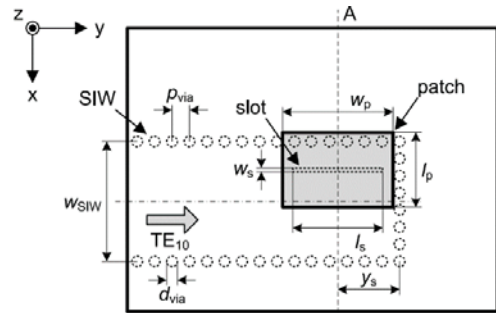
$$R_{leak} = 1 - \frac{d}{s \cdot \cos(\theta)} \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{m\lambda}{2a} \quad (2)$$

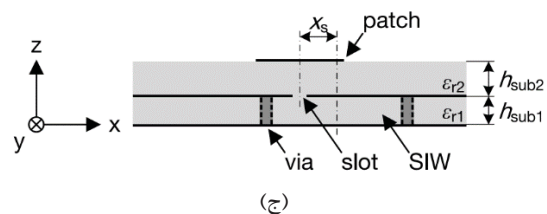
در روابط بالا، d قطر via ، s فاصله بین via های متوالی و θ زاویه برخورد موج می‌باشد. زاویه برخورد موج به دیواره‌های موج‌بر از معادله (۲) قابل محاسبه است. در معادله (۲) m ، مدهای TE_{m0}، λ طول موج، a پهنای SIW و θ زاویه برخورد می‌باشد. شکل ۳



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. ساختار آنتن پیچ میکرواستریپ تنها [۶] (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای بالا (ج) نمای عرضی

۳. طراحی و شبیه‌سازی

هر یک از اجزای آنتن اعم از پیچ‌های میکرواستریپ و قسمت‌های مختلف شبکه تغذیه می‌تواند به صورت جداگانه طراحی گردد. برای تسهیل در روند طراحی مراحل زیر پیشنهاد می‌شود. در مرحله نخست شبکه تغذیه آنتن و در آخر بهتر است پیچ‌های میکرواستریپ طراحی گردد. همچنین برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات می‌تواند ابتدا طراحی بر مبنای موج‌بر مستطیلی مرسوم انجام شود و در نهایت به ساختار SIW تبدیل گردد. بنابراین مراحل طراحی آنتن به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- طراحی موج‌بر مستطیلی در فرکانس ۹/۵ GHz

۲- تبدیل موج‌بر مستطیلی به موج‌بر زیرلایه SIW

۳- طراحی مبدل درگاهی کواکسیال به موج‌بر زیرلایه SIW

۴- طراحی شبکه تقسیم‌کننده توان موج‌بر زیرلایه SIW

۵- طراحی شبکه تغذیه آنتن

۶- طراحی شکاف یا روزنه روی موج‌بر زیرلایه SIW

۷- طراحی پیچ میکرواستریپ

۸- طراحی آنتن پیچ میکرواستریپ تنها با تغذیه SIW

۹- آرایه کردن پیچ‌های میکرواستریپ با تغذیه SIW

¹ Rectangular waveguide

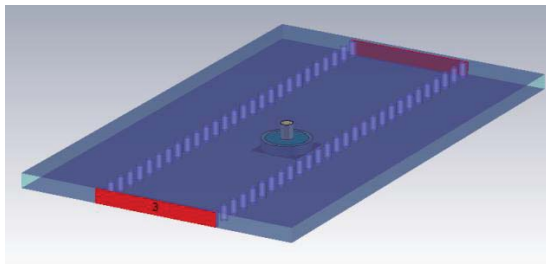
² Fundamental mode

³ Cutoff frequency

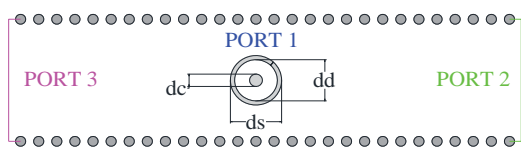
بین via ها می‌باشد.

۳-۳. طراحی میدل کوکسیال به SIW

در مرجع [۱۴] تطبیق خط انتقال هم محور به موج‌بر SIW نشان داده شده است. طراحی میدل کوکسیال به SIW مهمترین قسمت آنتن می‌باشد. شکل ۴ نمایی از طراحی میدل کوکسیال به SIW را نشان می‌دهد.



(الف)



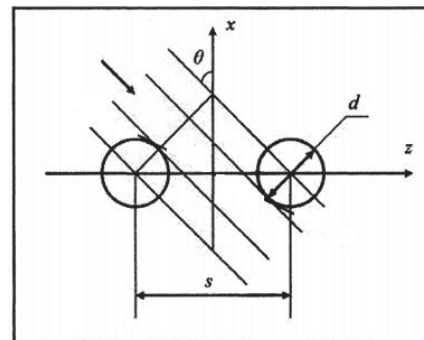
Coax to SIW

(ب)

شکل ۴. نمای میدل کوکسیال به موج‌بر (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای دوبعدی

در طراحی این قسمت هادی کانکتور SMA به صفحه هادی بالایی و بدنه کانکتور به صفحه هادی پایینی برد تغذیه متصل می‌شود. اندازه‌های قطر Via ها، فاصله بین آن‌ها، ارتفاع زیرلایه، عرض دهانه موج‌بر و جنس دی‌الکتریک هر یک در تطبیق امپدانس و پهنای باند موج‌بر تأثیر دارند. با افزایش قطر Via ها و کاهش فاصله آنها از یکدیگر چنانچه ملاحظات طراحی و ساخت در نظر گرفته شده باشد، وضعیت تطبیق بهتر خواهد شد. افزایش قطر Via ها باعث کاهش استحکام مکانیکی تغذیه آنتن می‌شود. همچنین افزایش ضخامت برد و کاهش ضریب دی‌الکتریک زیرلایه وضعیت تطبیق امپدانس را بهتر خواهد کرد. بیشترین تأثیر مربوط به تغییرات ضخامت زیرلایه است. هر چه ضخامت برد افزایش پیدا می‌کند موج برگشتی کمتر و همچنین افت کمتری در موج‌بر خواهیم داشت [۱۱]. کم کردن عرض دهانه موج‌بر باعث بهبود ضریب انعکاس می‌شود. البته باید به این نکته توجه کرد که با کاهش عرض دهانه موج‌بر فرکانس قطع مد TE10 افزایش پیدا می‌کند. در اینجا با استفاده از زیرلایه RO4003 با ضخامت $1/524$ میلی‌متر و بقیه پارامترهای موجود

امواجی را نشان می‌دهد که به یک آرایه خطی از via برخورد می‌کند. با توجه به معادلات (۱ و ۲) زمانی که فرکانس افزایش می‌یابد اگر زاویه برخورد ثابت باشد نشت الکترومغناطیسی بین via ها افزایش می‌یابد. هر چند که اگر فرکانس افزایش یابد و زاویه برخورد نیز افزایش یابد، نشت الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد. این بدان خاطر است که زاویه برخورد نسبت به فرکانس تأثیر بیشتری روی نشت الکترومغناطیسی دارد [۱۲].



شکل ۳. برخورد امواج الکترومغناطیسی با دو via متوالی

ویژگی دیگری که تأثیر زیادی روی نشت الکترومغناطیسی از میان دو via متوالی دارد، نسبت بین فاصله میان دو via متوالی و قطر via ها می‌باشد یعنی s/d . اگر نسبت s/d افزایش یابد، نشت الکترومغناطیسی زیاد می‌شود و اندازه میدان در درون آنتن SIW کاهش می‌یابد. برای اطمینان از این که نشت امواج الکترومغناطیسی قابل چشم‌پوشی باشد، دو شرط زیر باید ارضا شود.

$$\frac{s}{d} \leq 2 \quad (3)$$

$$d \leq 0.2\lambda \quad (4)$$

ناحیه‌ای از s/λ_c و d/λ_c وجود دارد که نشتی ناشی از فاصله via ها قابل اغماض است [۱۲]. این ناحیه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{s}{\lambda_c} < 0.25 \quad (5)$$

$$\frac{s}{\lambda_c} > 0.05 \quad (6)$$

$$s > d \quad (7)$$

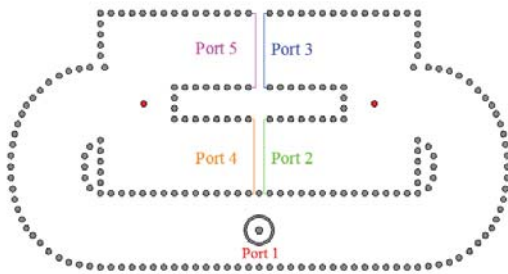
پارامتر w_{RWG} باید طوری انتخاب شود که فرکانس قطع مد TE10 و مد TE20 مربوط به آنتن SIW دقیقاً مشابه با مقادیر متناظر مربوط به آنتن موج‌بری می‌باشد. در مرجع [۱۳] روابط تبدیل اندازه دهانه موج‌بر به دهانه موج‌بر SIW آمده است که عبارتند از:

$$w_{RWG} = \left(W_{SIW} - \frac{d^2}{0.95s} \right) \quad (8)$$

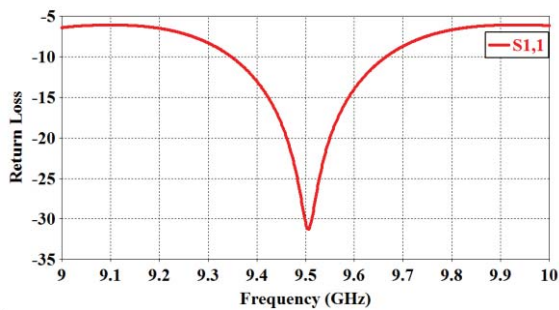
$$w_{RWG} = \left(W_{SIW} - 1.08 \frac{d^2}{s} - 0.1 \frac{d^2}{W_{SIW}} \right) \quad (9)$$

که در آن w_{SIW} پهنای دهانه موج‌بر SIW، d قطر via و s فاصله

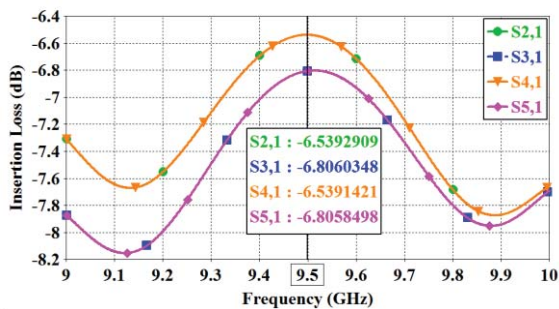
پهنای باند کمتر از ۱۰ dB-۱ در حدود ۳۰۰ MHz است. چنانچه بردی با تنازات تلفات بیشتر انتخاب شود تطبیق بهتر خواهد شد ولی از طرفی دیگر افت مسیر موج بر افزایش می‌یابد.



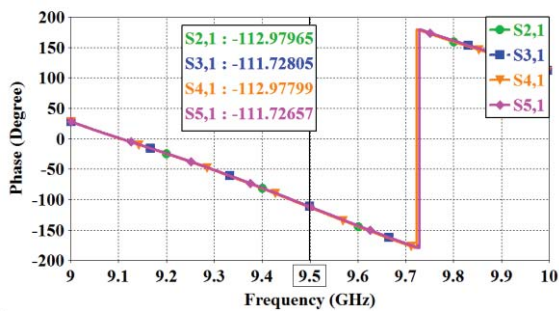
شکل ۶. ساختار کامل شبکه تغذیه



شکل ۷. وضعیت توان برگشتی در شبکه تغذیه SIW



شکل ۸. وضعیت تلفات تا درگاهی‌های دیگر



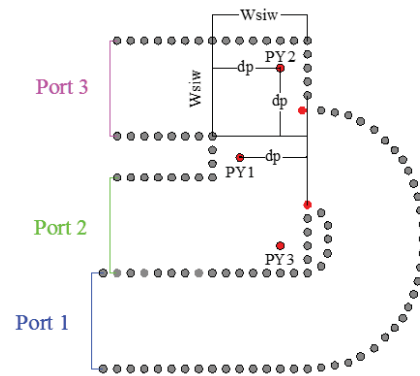
شکل ۹. وضعیت فاز در شبکه تغذیه

شکل‌های ۸ و ۹ وضعیت تلفات توان و فاز را در شبکه تغذیه آنتن نشان می‌دهد. در شکل ۸ بیشترین تلفات خط انتقال تقریباً

در جدول ۱ به ضریب انعکاسی کمتر از ۱۲ dB-۱ بسنده کرده‌ایم.

۳-۴. طراحی شبکه تقسیم‌کننده توان

برای تحریک هریک المان‌های آنتن از دو مقسم توان یک به دو بر پایه موج‌بر زیرلایه استفاده شده است. با توجه به مرجع [۱۵] در طراحی تقسیم‌کننده توان، از اتصال نوع Y و خط انتقال خمیده استفاده شده است. این تقسیم‌کننده در مود غالب TE₁₀ طراحی شده است. در اتصال نوع Y اندازه دهانه‌های ورودی و دو خروجی یکسان می‌باشد. در شکل ۵ در اتصال نوع Y پست^۱ PY₁ برای تقسیم توان از ورودی به دو خروجی SIW استفاده می‌شود. فاصله PY₁ نزدیک به یک چهارم طول موج موج‌بر در فرکانس کاری از دهانه ورودی است. برای کاهش موج برگشتی و تطبیق امپدانس بهتر، از پست‌های PY₂ و PY₃ در طراحی استفاده شده است. عموماً این پست‌ها در فاصله یک چهارم طول موج موج‌بر ($\lambda/4$) ورودی قرار گرفته و سپس با جابه‌جا کردن پست‌ها بهترین عملکرد مقسم توان به دست می‌آید. در مرحله نخست به خاطر متقارن بودن شبکه تغذیه و تقسیم‌کننده توان یک سمت طراحی شده و سپس سمت دیگر را به مقسم توان اضافه می‌کنیم.



شکل ۵. ساختار مقسم توان اولیه

۳-۵. طراحی شبکه تغذیه آنتن

با اضافه شدن قسمت دیگر مقسم توان و مبدل کوآکسیال به موج‌بر زیرلایه SIW شبکه تقسیم‌کننده توان کامل می‌گردد. در این مرحله وضعیت توان بازگشتی یک بار دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. با جابه‌جایی پست‌های گفته‌شده در بخش قبل وضعیت توان برگشتی را می‌توان بهینه کرد. در شکل ۶ نمای کلی از شبکه تقسیم‌کننده توان نشان داده شده است. در اینجا از پست‌های PY₂ و PY₃ پس بهینه‌سازی حذف شده است. شکل ۷ وضعیت توان بازگشتی را نشان می‌دهد که ضریب انعکاس (S₁₁) بهتر از ۳۰ dB-۳ در فرکانس مرکزی ۹/۵ GHz می‌باشد. همچنین

^۱ Post

۷-۳. طراحی پچ میکرواستریپ

در مرجع [۱۷ و ۱۸] روش طراحی آنتن‌های پچ مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۳) ابعاد حدودی پچ میکرواستریپ در فرکانس مورد نظر به دست می‌آید.

$$Wp = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (10)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{Wp} \right]^{-1/2} \quad (11)$$

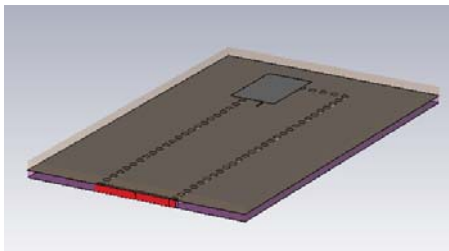
$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{Wp}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} + 0.258) \left(\frac{Wp}{h} + 0.8 \right)} \quad (12)$$

$$Lp = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (13)$$

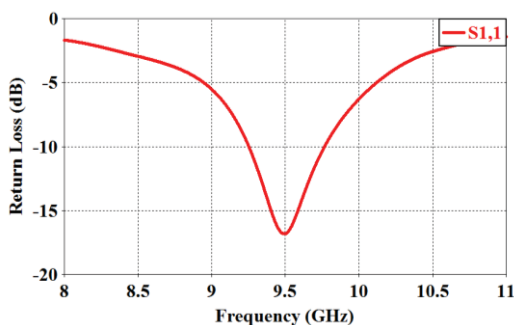
Wp و Lp به ترتیب پهنا و طول پچ میکرواستریپ و f_0 و ϵ_r به ترتیب ضخامت برد، فرکانس رزونانس و ثابت دی‌الکتریک برد زیرلایه می‌باشد. تغییرات در طول پچ باعث جابه‌جایی فرکانس رزونانس و در پهنا پچ سبب افزایش پهنا باند و بهره می‌شود.

۸-۳. طراحی آنتن پچ میکرواستریپ

قبل از طراحی آرایه ابتدا یک پچ تنها با تغذیه SIW طراحی کرده و سپس آن را به آرایه تعمیم می‌دهیم. شکل ۱۰ یک پچ میکرواستریپ تنها که با فید SIW تحریک شده است را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ ضریب انعکاس پچ تنها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب انعکاس در فرکانس ۹/۵ GHz کمتر از ۱۶ dB- می‌باشد. همچنین از این آنتن بهره‌ای در حدود ۶/۶ dB را به دست آمده است.



شکل ۱۰. آنتن پچ میکرواستریپ تنها



شکل ۱۱. ضریب توان برگشتی آنتن پچ میکرواستریپ تنها

برابر ۰/۸ dB است. ضمن این‌که ۶ dB تلفات ناشی از تقسیم توان در موج‌بر SIW می‌باشد که در مجموع توان رسیده به سر درگاه‌های ۲ تا ۵ تلفاتی در حدود ۶/۸ dB را نشان می‌دهد. به علت این‌که پچ‌ها به صورت هم‌دامنه و هم‌فاز تحریک می‌شوند پس می‌بایست دامنه و فاز رسیده به سر درگاه‌های ۲ تا ۵ یکسان باشند. در شکل‌های (۸ و ۹) مشاهده می‌شود اختلاف دامنه و فاز رسیده بر سر درگاه‌ها به ترتیب برابر ۰/۳dB و ۱/۲ درجه می‌باشد. جدول ۱ مقدار تلفات توان و فاز را در درگاه‌های ۱ تا ۵ نمایش می‌دهد.

جدول ۱. وضعیت تلفات و توان برگشتی تغذیه آنتن در شبیه‌سازی

فاز (degree)	دامنه (dB)	فرکانس ۹/۵ GHz
-۱۰۹/۲	-۳۰/۴۶	S11 مقدار موج برگشتی در درگاه ۱
-۱۱۲/۹۸	-۶/۵۳۹	S21 مقدار تلفات توان در درگاه ۲
-۱۱۱/۷۳	-۶/۸۰۵	S31 مقدار تلفات توان در درگاه ۳
-۱۱۲/۹۸	-۶/۵۳۹	S41 مقدار تلفات توان در درگاه ۴
-۱۱۱/۷۳	-۶/۸۰۵	S51 مقدار تلفات توان در درگاه ۵

۶-۳. طراحی شکاف روی شبکه تقسیم‌کننده توان

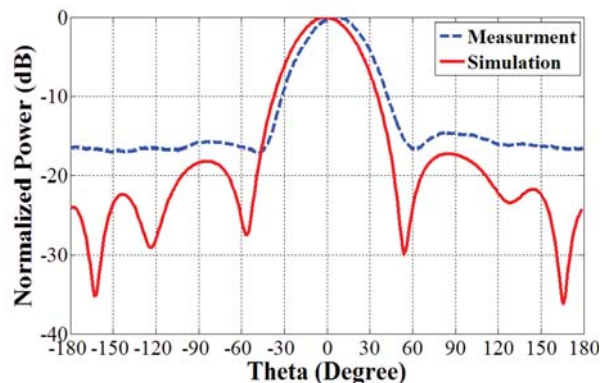
طراحی اسلات‌ها باید به گونه‌ای انجام شود که آنتن بدون گذاشتن پچ‌های میکرواستریپ در فرکانس کاری رزونانس داشته باشد. در طراحی شکاف‌ها به این نکته می‌بایست توجه کرد که افزایش طول شکاف‌ها باعث شیفت فرکانسی به سمت بالا و بلعکس می‌شود. همچنین عرض یا پهنا شکاف‌ها تقریباً یک بیستم یا کمتر در نظر گرفته می‌شود که در مراجع آمده است. طول شکاف باید حدوداً نصف طول موج هدایت موج‌بر در مد غالب باشند. در طراحی موقیت شکاف‌ها از مرکز موج‌بر معمولاً چنانچه طراحی بر روی موج‌بر مستطیلی مرسوم انجام شود در تبدیل به موج‌بر SIW، شکاف فاصله بیشتری از مرکز پیدا می‌کند. پهنا شکاف تأثیر زیادی در جابه‌جایی فرکانسی ندارد ولی می‌توان با مقداردهی مناسب تطبیق بهتری به دست آورد. در مرجع [۱۹] نمونه‌ای از آن اشاره شده است. برای به دست آوردن ابعاد و موقیت مکانی شکاف آنچه که در طراحی آنتن‌های آرایه‌ای شکافی به روش لیوت انجام می‌گیرد را دنبال می‌کنیم [۱۶]. برای تحریک هر یک از المان‌های پچ میکرواستریپ به صورت شکاف تزویج، چهار شکاف طولی با ابعاد l_s و w_s روی صفحه هادی بالایی زیرلایه پایینی تعبیه شده است. این شکاف‌ها در مرکز بیشترین جایی که موج ساکن ایجاد می‌شود، تقریباً در فاصله یک چهارم طول موج موج‌بر از انتهای دیواره بسته با یک آفست از خط وسط موج‌بر، واقع شده‌اند [۶]. مرکز شکاف‌ها به صورت کاملاً دقیق در زیر مرکز پچ‌های میکرواستریپ قرار گرفته است.

جدول ۲. اندازه‌های قسمت‌های مختلف آنتن بر حسب میلی‌متر

ابعاد زیرلایه	a×b×h	۱۰۰×۵۰×۱/۵۲۴
قطر داخلی هادی کانکتور	dc	۱/۲۷
قطر دی‌الکتریک کانکتور	dd	۴/۲۵
ضخامت بدنه کانکتور	ds	۰/۴۲
قطر Via	dvia	۱
فاصله بین Via ها	s	۱/۸
ضخامت مس روی زیرلایه	t	۰/۰۱۷
اندازه دهانه موج‌بر فلزی	a _{rwg}	۱۲
ارتفاع موج‌بر فلزی و SIW	h	۱/۵۲۴
اندازه دهانه موج‌بر SIW	W _{SIW}	۱۲/۵۸
پهنای شکاف یا روزنه	W _s	۰/۳
پهنای پچ میکرواستریپ	W _p	۱۲/۵
طول شکاف یا روزنه	l _s	۹
عرض پچ میکرواستریپ	l _p	۵/۸
فاصله مرکز شکاف از دیواره انتهایی موج‌بر	y _s	۷/۵
فاصله مرکز شکاف از مرکز موج‌بر	x _s	۵
فاصله پست p از ورودی دهانه موج‌بر	dp	۷

۴. نتایج آزمایشگاهی

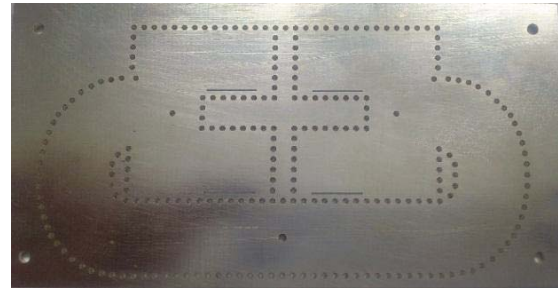
الگوی تشعشی میدان آنتن در سه فرکانس ۹/۴، ۹/۵ و ۹/۶ گیگاهرتز مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ الگوی تشعشی میدان الکتریکی راه دور آنتن در فرکانس ۹/۵GHz در صفحه‌های E و H نمایش داده شده است.



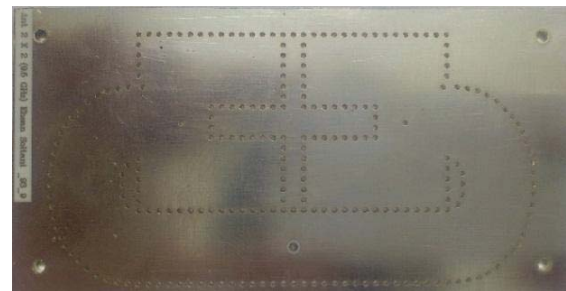
شکل ۱۵. الگوی تشعشی میدان راه دور در صفحه E

۳-۹. آرایه کردن آنتن پچ میکرواستریپ ۲×۲

برای کاهش تزویج متقابل فاصله مرکز به مرکز المان در حدود ۰/۵۶ طول موج در فضای آزاد در نظر گرفته شده است. مقدار تزویج متقابل کمتر از ۱۷ dB - می‌باشد. در شکل‌های (۱۲-۱۴) قسمت‌های مختلف آنتن ساخته‌شده، نمایش داده شده است. در جدول ۲ تمامی مقادیر پارامترهای طراحی برای ساخت آنتن آمده است.



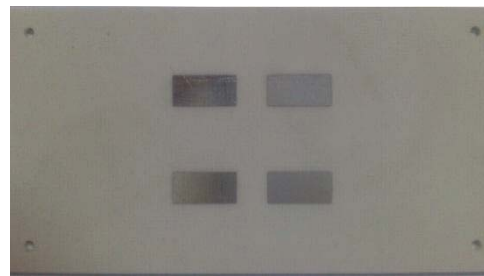
(الف)



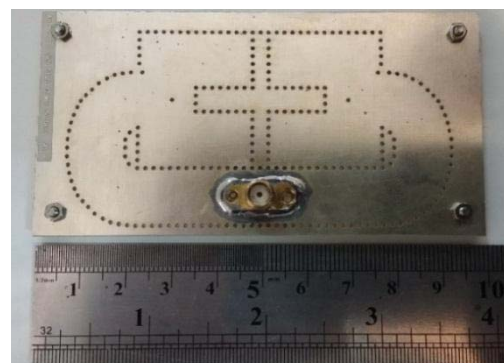
(ب)

شکل ۱۲. نمایی از شبکه تغذیه آنتن (الف) نمای بالا به‌همراه شکاف

(ب) نمای پشت



شکل ۱۳. نمای جلوی آنتن آرایه



شکل ۱۴. نمای پشت آنتن با اتصال کانکتور

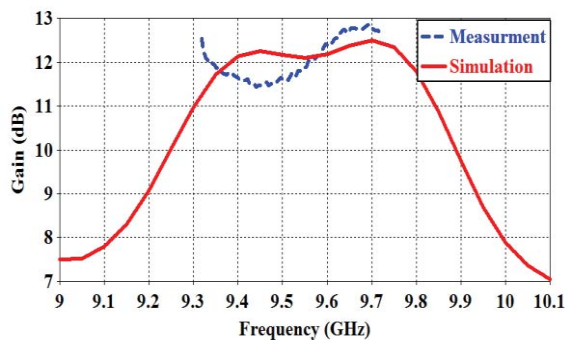
جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در سه فرکانس ۹/۴، ۹/۵ و ۹/۶ گیگاهرتز در صفحه H

فرکانس (GHz)	۹/۴	۹/۵	۹/۶
بیشترین سطح گلبه‌های کناری در شبیه‌سازی (dB)	-۲۴/۶	-۲۴	-۲۳/۸
بیشترین سطح گلبه‌های کناری در اندازه‌گیری (dB)	---	-۱۸/۱	-۱۶/۹
پهنای نیم‌توان در شبیه‌سازی بر حسب درجه	۴۲/۵	۴۱/۱	۴۱/۶
پهنای نیم‌توان در اندازه‌گیری بر حسب درجه	۴۲	۴۰/۸	۴۰/۸
انحراف بیم اصلی اندازه‌گیری شده نسبت به شبیه‌سازی بر حسب درجه	۶	۴/۸	۸/۴

در شکل ۱۷ وضعیت بهره آنتن در دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان داده شده است. در اینجا بهره به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری برابر ۱۱/۶ dB در فرکانس ۹/۵ GHz می‌باشد که نسبت به شبیه‌سازی ۰/۸ dB اختلاف دارد. جدول ۵ مقادیر عددی بهره را در سه فرکانس ۹/۴، ۹/۵ و ۹/۶ گیگاهرتز نشان می‌دهد.

در شکل ۱۸ پهنای باند امپدانس آنتن نشان داده شده است. پهنای باند کمتر از ۱۰ dB - این آنتن در حدود ۵/۳ درصد است.

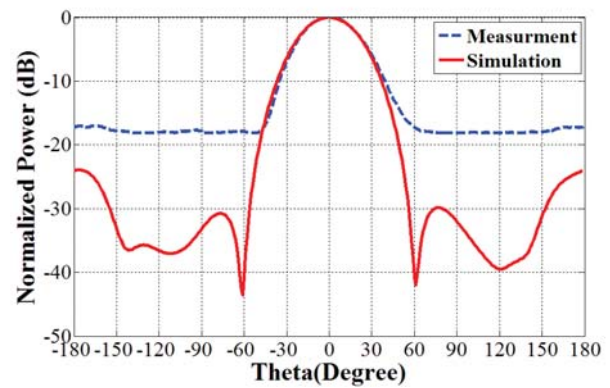
شکل ۱۹ وضعیت الگوی تشعشی را در دو حالت co-pol و cross-pol در صفحات E و H در شبیه‌سازی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود آنتن پلاریزاسیون متعامد کمتر از ۵۰ dB دارد.



شکل ۱۷. نمودار بهره آنتن آرایه

جدول ۵. مقدار بهره در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

فرکانس (GHz)	۹/۴	۹/۵	۹/۶
بهره در شبیه‌سازی (dB)	۱۲/۱۳	۱۲/۱۷	۱۲/۱۸
بهره در اندازه‌گیری (dB)	۱۱/۶۵	۱۱/۶	۱۲/۳۹



شکل ۱۶. الگوی تشعشی میدان راه دور در صفحه H

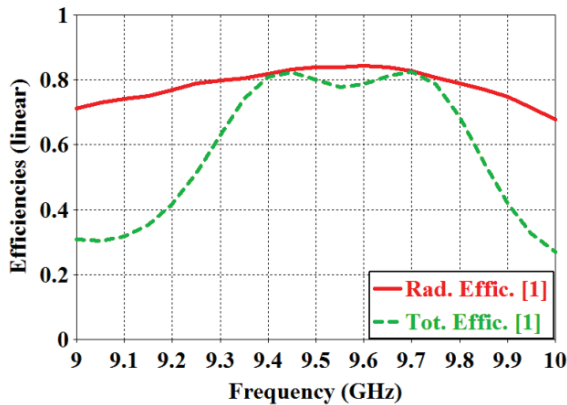
در جدول ۲ و ۳ مقادیر به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی آنتن در دو صفحه E و H مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور مشاهده می‌شود نتایج پارامترهای گلبه‌های کناری، پهنای نیم‌توان^۱ و انحراف بیم اصلی در سه فرکانس بررسی شده‌اند. در این مقایسه وضعیت گلبه‌های کناری ۲/۷ dB در صفحه E و ۵/۹ dB در صفحه H بیشتر می‌باشد. وضعیت پهنای نیم‌توان در صفحه E برابر با شبیه‌سازی بوده و در صفحه H، ۱/۳ درجه نسبت به شبیه‌سازی اختلاف دارد. انحراف در بیم اصلی نیز دارای ۴/۸ درجه اختلاف در فرکانس ۹/۵ GHz می‌باشد. جزئیات بیشتر برای دو فرکانس دیگر در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای صفحه‌های E و H آمده است. اختلاف بوجود آمده در انحراف بیم آنتن به دلیل تلورانس ساخت بوده و متأسفانه به جهت خطای دستگاه اندازه‌گیری در قرائت توان‌های پایین، توان گلبه‌های کناری بیشتر از حد انتظار است.

جدول ۳. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در سه فرکانس

۹/۴، ۹/۵ و ۹/۶ گیگاهرتز در صفحه E

فرکانس (GHz)	۹/۴	۹/۵	۹/۶
بیشترین سطح گلبه‌های کناری در شبیه‌سازی (dB)	-۱۸	-۱۷/۲	-۱۶/۷
بیشترین سطح گلبه‌های کناری در اندازه‌گیری (dB)	-۱۵/۱	-۱۴/۵	-۱۳/۸
پهنای نیم‌توان در شبیه‌سازی بر حسب درجه	۴۱/۳	۴۰/۸	۴۰/۲
پهنای نیم‌توان در اندازه‌گیری بر حسب درجه	۴۱/۹	۴۰/۸	۴۰/۸
انحراف بیم اصلی اندازه‌گیری شده نسبت به شبیه‌سازی بر حسب درجه	۶	۴/۸	۸/۴

¹ Half power beamwidth



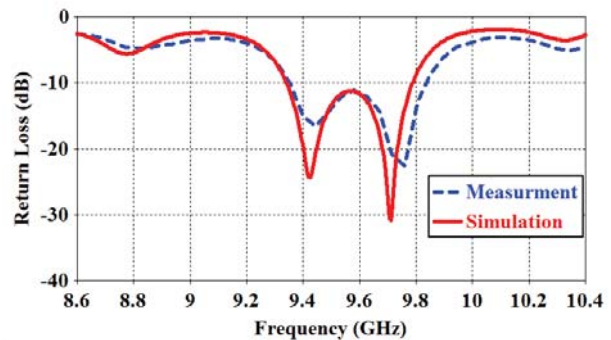
شکل ۲۰. راندمان تشعشی و کل آنتن در شبیه‌سازی

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن پچ میکرواستریپ آرایه ۲×۲ که توسط موج‌بر زیرلایه SIW تغذیه می‌شود، در فرکانس ۹/۵ GHz طراحی و ساخته شده است. آنتن شامل دو زیرلایه است که زیرلایه بالا را پچ‌های میکرواستریپ و زیرلایه پایین را تغذیه آنتن تشکیل می‌دهد. استفاده از این شبکه تغذیه به خاطر شیلدینگ مناسب و تلفات کم، بیشتر در فرکانس‌های با موج میلی‌متری که تلفات خط انتقال بسیار زیاد است کاربرد دارد. شبکه تغذیه به دلیل استفاده از مزایای موج‌بری کمترین تشعشعات پرازیتی را ایجاد می‌کند. مبنای طراحی آنتن بر روی برد RO4003 قرار داده شده است. آنتن ساخته‌شده دارای بهره ۱۱/۶ dB و پهنای باند ۵/۳ درصد می‌باشد. اندازه گلب‌رگ‌های کناری در صفحه E برابر با ۱۴/۵ dB- و در صفحه H برابر با ۱۸ dB- است. همچنین در این آنتن پلاریزاسیون متعامد کمتر از ۵۰ dB- در هر یک از دو صفحه E و H به دست آمده است که به خاطر شبکه تغذیه آنتن در مقایسه با آنتن‌های پچ میکرواستریپ معمول بسیار کمتر است.

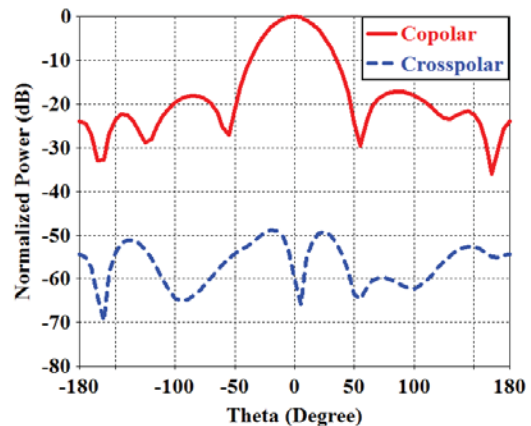
۶. مراجع

- [1] M. I. Skolnik, "Radar Handbook," 3rd ed., McGraw-Hill, 2009.
- [2] M. H. Awida and A. E. Fathy, "Substrate-integrated waveguide Ku-band cavity-backed 2x2 microstrip patch array antenna," IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett., vol. 8, pp. 1054-1056, 2009.
- [3] X. Feng, C. Xu, and W. Xin'an, "K-band micro-strip antenna array applied in anti-collision radar," in Proc. 12th ICCT, anjing, CN, PP. 1240-1243, Nov. 2010.
- [4] W. M. Abdel-Wahab, S. Safavi-Naeini, and D. Busuioac, "Low cost microstrip patch antenna array using planar waveguide technology for emerging millimeter-wave wireless communication," in Proc. 14th ANTEM-AMEREM, Ottawa, CA, Jul. 2010.

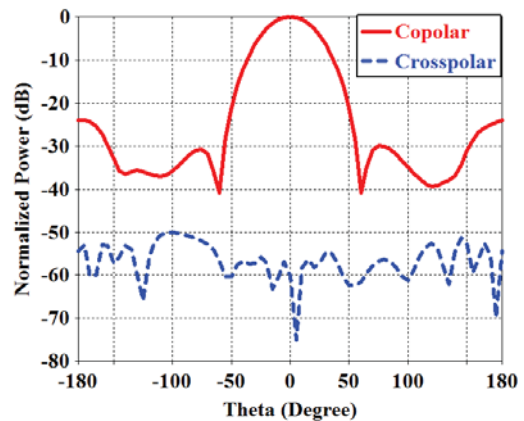


شکل ۱۸. نمودار افت توان برگشتی آنتن آرایه

در شکل ۲۰ وضعیت راندمان آنتن نشان داده شده است. نمودار پیوسته راندمان تشعشی آنتن و نمودار نقطه‌چین راندمان کل آنتن را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود راندمان تشعشی آنتن در فرکانس‌های ۹/۳۲GHz تا ۹/۷۶GHz بیشتر از ۸۰ درصد می‌باشد و راندمان کل آنتن در این باند در حدود ۸۰ درصد است. چنانچه از زیرلایه‌ی با تانژانت تلفات کمتر استفاده می‌شد مقدار راندمان افزایش می‌یافت. در اینجا مقدار تانژانت تلفات در این باند فرکانسی برای زیرلایه RO4003، در حدود ۰/۰۰۲۷ است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹. نمودار copolarization و cross polarization در شبیه‌سازی

(الف) صفحه E (ب) صفحه H

- [12] D. Deslandes, K. Wu, "Accurate modeling wave mechanisms and design consideration of a substrate integrated waveguide," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 45, no. 6, June 2006.
- [13] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu, "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas," IEEE Proc. Microwaves Antenn. Propag., vol. 5, no. 8, pp. 909-920, June 2011.
- [14] A. Morini, M. Farina, C. Cellini, T. Rozzi, and G. Venanzoni, "Design of low-cost nonradiative SMA-SIW launchers," in Proc. 36th EuMC, Manchester, GB, pp. 526-529, Sep. 2006.
- [15] Zh. Hao, W. Hong, H. Li, H. Zhang, and Ke Wu, "Multiway Broadband Substrate Integrated Waveguide (SIW) Power Divider," IEEE 2005.
- [16] R. S. ELLIOTT, "Antenna Theory and Design," Rev ed. Hoboken (US-NJ), Chapter VIII, 2003.
- [17] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design" 3rd Edition, WILEY, 2005.
- [18] E. O. Hammerstad, "Equations for Microstrip Circuit Design," IEEE, Microwave Conference, 1975. 5th European, 10.1109/EUMA, 1975.
- [19] T. Mikulasek and J. Lacik, "Microstrip Patch Antenna Fed by Substrate Integrated aveguide," 978-1-61284-978-2/11/\$26.00 ©2011 IEEE.
- [5] W. M. Abdel-Wahab and S. Safavi-Naeini, "Wide-bandwidth 60GHz aperture-coupled microstrip patch antennas fed by substrate integrated waveguide," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 10, pp. 1003-1005, 2011.
- [6] T. Mikulasek, A. Georgiadis, A. Collado, and J. Lacik, "2x2 Microstrip Patch Antenna Array Fed by Substrate Integrated Waveguide for Radar Applications," IEEE antennasand wireless propagation Letters, vol. xy, 2013.
- [7] P. Kovacs, J. Bartyzal, T. Bostik, T. Mikulasek, J. Puskely, Z. Raida, L. Slama, J. Vorek, and D. Wolansky, "Antenna arrays for tactical communicationsystems: a comparative study," Radioengineering, vol. 20, no. 4, pp. 817-827, Dec. 2011.
- [8] M. Salehi and E. mehrshahi, "A closed-form formula for dispersion characteristics of funda-mental SIW mode," IEEE Microwave and Wireless Components Letters., vol. 21, no. 1, pp. 4-6, 2011.
- [9] G. Cassivi, Y. Perregrini, L. Arcioni, P. Bressan, M. Wu, and K. Conciauro, "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. vol. 12, no. 9, pp. 333-335, 2002.
- [10] W. Che, K. Deng, D. Wang, and Y. L. Chow, "Analytical equivalence between substrate integrated waveguide and rectangular waveguide," IET Microw. Antennas Propag., pp. 35-41, 2008.
- [11] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 3rd ed. New York, Wiley, 2005.

Design, Simulation and Fabrication of 2x2 Microstrip Patch Antenna Array Fed by Substrate Integrated Waveguide at x Band

Ehsan Soltani^{*}, Bijan Zakeri, S. M. Hosseini Andargoli

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 21/02/2015, Accepted: 24/09/2015)

Abstract

This paper describes the design of a 2x2 micro-strip patch antenna array in the frequency of 9.5GHz for radar applications, using substrate integrated waveguide, SIW, for feeding network. The micro-strip patches are aperture-coupled with the feeding network of SIW. The feeding network consisting of a perpendicular coax-to-SIW transition and two Y-junction power dividers. The antenna is simulated in full wave software of CST and the prototype is fabricated. The measurement results good agreement with the simulation results. a fabricated prototype has a gain of 11.6dB and a side lobe level below -14.5dB in the E-plane and -18dB in the H-plane.

Keywords

Microstrip Patch, Aperture coupled, Power divider, Substrate Integrated Waveguide (SIW).

* Corresponding author E-mail: e.soltani.c@gmail.com