

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن مایکرواستریپ پهن‌بند با استفاده از ساختار چندلایه و عنصر پارازیتی در باند Ku

رضا کاظمی^۱، محسن فلاح^{۲*}، بیژن عباسی آرند^۳، سید حسین محسنی ارمکی^۴

۱- دانشجوی دکتری و ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، ۴- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران (دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳)

چکیده

در این مقاله، طراحی جدیدی از یک آنتن پچ مایکرواستریپ مستطیلی با پهنای باند وسیع در باند Ku با استفاده از ساختار دی‌الکتریکی چندلایه، برای کاربردهای راداری و ماهواره‌ای پهن‌بند ارائه شده است. در این طراحی فشرده، یک گیره رسانای الکتریکی برای تحریک پچ تشعشع‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است. پچ پارازیتی نیز توسط فاصله‌هایی از پچ تشعشع‌کننده جدا شده است. با این روش‌ها، پهنای باند امپدانس ۱۰ dB اندازه‌گیری شده آنتن، به بیش از ۲۲٪ افزایش یافته است. همچنین تغییرات بهره اندازه‌گیری شده آنتن در کل پهنای باند آن، کمتر از ۱ dB است. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن مذکور ارائه خواهد شد و مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد.

کلید واژه‌ها: آنتن‌های مایکرواستریپ پهن‌بند، آنتن باند Ku، پهنای باند امپدانس، پچ تشعشع‌کننده، پچ پارازیتی

۱- مقدمه

مایکرواستریپ، ایجاد نقصان^۲ بر روی پچ تشعشع‌کننده و همچنین صفحه زمین آنتن می‌باشد که مورد دوم به ساختارهای با زمین ناقص^۳ (DGS) معروف است [۵ و ۶]. همچنین یک آنتن پچ مایکرواستریپ مستطیلی با شکاف U شکل^۴ و تغذیه تزویج دهانه‌ای^۵ در فرکانس مرکزی ۱۷/۷۵ GHz، در مرجع [۷] ارائه شده است. در برخی کاربردها نیز برای افزایش پهنای باند آنتن مایکرواستریپ، از روش‌های مختلف تغذیه استفاده شده است. در مرجع [۸] از دو تکه زائده در خط تغذیه مایکرواستریپ استفاده شده است، که این زائده‌ها نقش مدار تطبیق داشته و باعث افزایش پهنای باند می‌شوند. در مرجع [۹] نیز از تغذیه Inset و Proximity برای بهبود تطبیق امپدانس و در نتیجه افزایش پهنای باند استفاده شده است. اما همانطور که پیش‌تر اشاره شد، یک روش شناخته شده برای افزایش پهنای باند آنتن‌های مایکرواستریپ، استفاده از پچ‌های پشت‌های است. در این نوع ساختارها، پچ پارازیتی بر روی پچ اصلی قرار می‌گیرد. از این‌رو افزایش پهنای باند در آنتن‌های پشت‌های دولایه مشاهده می‌شود [۱۰]. مشخصات زیرلایه‌ای که پایین پچ اصلی قرار می‌گیرد، در تعیین پهنای باند آنتن بسیار مهم می‌باشد [۱]. در عمل، پهنای باند امپدانس در این نوع ساختارها، به عوامل فیزیکی متعددی از جمله ابعاد پچ و ضخامت زیرلایه بستگی دارد [۲، ۳ و ۱۰]. در ادامه تعدادی از آنتن‌های پچ پشت‌های مورد بررسی قرار می‌گیرند.

آنتن‌های پهن‌بند کاربردهای گسترده‌ای در سامانه‌های راداری و ماهواره‌ای دارند. در این نوع کاربردها، وقتی علاوه بر پهنای باند، مولفه‌هایی از قبیل وزن، هزینه و ابعاد آنتن اهمیت پیدا می‌کند، ساختارهای مایکرواستریپ یکی از بهترین انتخاب‌ها خواهند بود. یک عامل بازدارنده در استفاده از آنتن‌های مایکرواستریپ ساده، پهنای باند باریک آن‌ها می‌باشد [۳-۱]. برخی از روش‌های متداول افزایش پهنای باند آنتن‌های مایکرواستریپ عبارت‌اند از: استفاده از زیرلایه‌های ضخیم، استفاده از زیرلایه‌هایی با ثابت دی‌الکتریکی کوچک و بکارگیری پچ‌های پارازیتی بر روی لایه‌های پشت‌های^۱. برخی تحقیقات نشان‌دهنده این است که افزایش ضخامت زیرلایه‌های با ثابت دی‌الکتریکی کوچک، بیشترین پهنای باند و همچنین راندمان مناسب امواج سطحی را به‌دنبال خواهد داشت [۱]. در مرجع شماره [۴]، یک آنتن ساده به‌همراه یک گیره اتصالی بین خط تغذیه و پچ که از بین سوراخ ایجاد شده در صفحه زمین عبور کرده است، ارائه شده است. در این آنتن برای دستیابی به پهنای باند بیشتر، از یک زیرلایه ضخیم به ضخامت ۱/۵۷ mm (۰/۰۶۲۵ λ) استفاده شده است. بهره و پهنای باند امپدانس این آنتن به ترتیب ۶/۷ dBi و ۴٪ می‌باشد. روش دیگر برای افزایش پهنای باند آنتن

^۲ Defect

^۳ Defected Ground Structures

^۴ U-slotted

^۵ Aperture coupled

* نویسنده مسئول: mohsen_fallah@mut.ac.ir

^۱ Stacked layers

شد، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده می‌شود.

۲- طراحی و تحلیل آنتن

آنتن‌های پهن‌بند یکی از ارکان جدایی‌ناپذیر سامانه‌های تصویربرداری راداری هستند. از این رو هدف اصلی در این طراحی، افزایش پهنای باند یک آنتن مایکرواستریپی برای استفاده در سامانه عملیاتی SAR می‌باشد. افزایش پهنای باند در رادار SAR، باعث افزایش وضوح^۲ در راستای برد^۳ و در نتیجه افزایش کیفیت تصاویر SAR طبق رابطه (۱) می‌شود [۲۰].

$$\Delta R = C / 2B \quad (1)$$

که در آن، C سرعت نور، B پهنای باند رادار و ΔR قدرت تفکیک رادار (فاصله بین دو هدف مختلف) در راستای برد می‌باشد. طبق رابطه (۱) با افزایش پهنای باند کاری رادار، فاصله قابل تشخیص بین دو هدف مختلف کاهش یافته و در نتیجه قدرت تفکیک رادار افزایش می‌یابد. افزایش قدرت تفکیک در رادار تصویربرداری SAR، به معنای افزایش کیفیت تصاویر می‌باشد.

روند کلی طراحی آنتن بدین صورت است که ابتدا یک پچ تشعشع‌کننده با استفاده از روابط نظری در فرکانس مرکزی ایجاد شده و با استفاده از خط تغذیه مایکرواستریپی و گیره یکنواخت تحریک می‌شود. سپس برای افزایش پهنای باند امپدانس آنتن، یک پچ پارازیتی بعد از فاصله هوایی بر روی پچ تشعشع‌کننده قرار می‌گیرد. همچنین برای بهبود تطبیق امپدانس، از گیره پله-ای به جای گیره یکنواخت استفاده می‌شود تا حداکثر پهنای باند ممکن به دست آید. در نهایت مطالعه مولفه‌ای بر روی ابعاد قسمت‌های مختلف آنتن صورت گرفته و مقادیر بهینه مولفه‌های طراحی مشخص می‌گردد. در ادامه جزئیات روال طراحی توضیح داده خواهد شد.

ساختار آنتن چندلایه پیشنهادی به همراه مولفه‌های طراحی در شکل (۱) نشان داده شده است. این آنتن توسط یک خط تغذیه مایکرواستریپی 50Ω ، که در قسمت پایینی اولین زیرلایه قرار گرفته و به واسطه صفحه زمین از پچ‌ها جدا شده است، تغذیه می‌شود. این خط تغذیه در پایین‌ترین زیرلایه با ضخامت بسیار کم 0.254 mm (0.1λ) تعبیه شده است تا تلفات تشعشعی^۴ کاهش یابد. ثابت دی‌الکتریکی زیرلایه اول 2.5 می‌باشد. در نتیجه با توجه به ضخامت ϵ_r اولین زیرلایه و با احتساب فرکانس مرکزی 17 GHz ، عرض خط تغذیه 50Ω به اندازه 0.65 mm به دست می‌آید.

آنتن پچ پشته‌ای ارائه شده در مرجع [۱۱]، دارای پهنای باند امپدانس $8/6\%$ (از فرکانس $9/6 \text{ GHz}$ تا $10/47 \text{ GHz}$) و بهره $7/2 \text{ dBi}$ در فرکانس مرکزی می‌باشد. همچنین یک آنتن مایکرواستریپ پشته‌ای که دارای یک پچ اصلی تحریک شده توسط خط تغذیه مایکرواستریپی و یک آرایه 2×2 از پچ‌های پارازیتی مستطیلی پشته‌ای می‌باشد، در مرجع [۱۲] ارائه شده است. این آنتن دارای پهنای باند 4% (از فرکانس $2/4 \text{ GHz}$ تا $2/5 \text{ GHz}$) و حداکثر بهره 10 dBi می‌باشد. در مرجع [۱۳] نیز یک آنتن مایکرواستریپی پشته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که اتصال بین پچ اصلی و پارازیتی آن توسط دو عدد گیره و از طریق فاصله هوایی برقرار شده است. این آنتن دارای پهنای باند $1/73 \text{ GHz}$ (از فرکانس $4/55 \text{ GHz}$ تا $6/28 \text{ GHz}$) است، اما نکته قابل تامل این است که استفاده از دو عدد گیره در کنار یکدیگر، راه‌کار مناسبی برای باند Ku نمی‌باشد. آنتن پچ پشته‌ای دیگری نیز برای استفاده در باند Ka در مرجع [۱۴] ارائه شده است. این آنتن دارای پهنای باند 13% (حدود $3/7 \text{ GHz}$) و بهره $7/3 \text{ dBi}$ در فرکانس $28/5 \text{ GHz}$ است. در مرجع [۱۵] یک آنتن مایکرواستریپی پشته‌ای دو بانده با تغذیه تزویج دهانه‌ای ارائه شده است. در این مقاله برای افزایش پهنای باند، علاوه بر افزودن پچ پشته‌ای، از ایجاد شکاف و برش بر روی پچ‌های تشعشع‌کننده و پارازیتی نیز استفاده شده است. با به کارگیری این روش‌ها، آنتن ساخته شده دارای پهنای باند امپدانس $13/5\%$ در فرکانس مرکزی $3/7 \text{ GHz}$ و $1/5$ در فرکانس مرکزی $5/2 \text{ GHz}$ می‌باشد.

همچنین در مراجع [۱۶-۱۹]، آنتن‌های مایکرواستریپی پشته‌ای با ساختار آرایه‌ای به همراه شبکه تغذیه متناظر، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مقالات نشان می‌دهند که استفاده از عنصر آنتن پچ پشته‌ای در ساختارهای آرایه‌ای (خطی و صفحه‌ای)، به منظور افزایش پهنای باند، امری متداول و گره‌گشا است.

در این مقاله، یک آنتن مایکرواستریپی مستطیلی چهارلایه، با بهره مناسب و پهنای باند امپدانس وسیع در باند Ku، برای کاربرد SAR^۱ ارائه شده است. در این ساختار برای افزایش پهنای باند آنتن، پچ تشعشع‌کننده توسط یک گیره پله‌ای تحریک شده و پچ پارازیتی نیز بعد از یک فاصله هوایی، بر روی پچ تشعشعی قرار گرفته است. برای کاهش هزینه‌های ساخت و پیاده‌سازی آنتن، سادگی ساختار نیز تا حد ممکن در نظر گرفته شده است. در ادامه روال طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن مذکور تشریح شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آن ارائه شده است. همانطور که در بخش‌های آتی توضیح داده خواهد

^۲ Resolution

^۳ Range

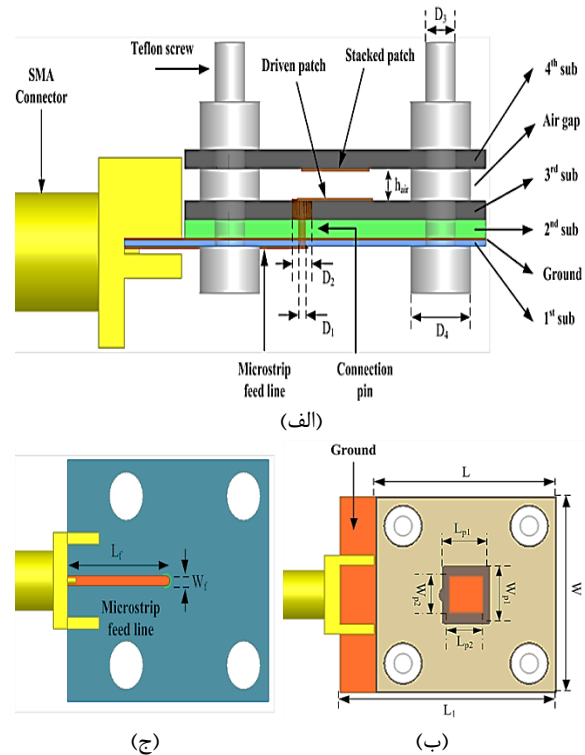
^۴ Radiation loss

^۱ Synthetic Aperture RADAR

در اینجا 0.5 mm در نظر گرفته شده است تا امکان ایجاد سوراخی با قطر 0.5 mm در زیرلایه اول، بدون آسیب به خط تغذیه (بلند شدن از روی زیرلایه) وجود داشته باشد. همچنین اندازه D_1 کوچکتر از 0.5 mm انتخاب نشده است تا امکان ساخت آن توسط دستگاه‌های تراشکاری وجود داشته باشد. این گیره پله‌ای با قطر D_1 از زیرلایه اول، صفحه زمین و زیرلایه دوم عبور کرده و با قطر D_2 وارد زیرلایه سوم شده و به پچ تشعشعی متصل می‌شود. برای دستیابی به تطبیق امپدانس بهتر و افزایش پهنای باند امپدانسی آنتن، D_2 بزرگتر از D_1 در نظر گرفته شده است. در واقع پچ تشعشع‌کننده بطور مستقیم توسط یک گیره پله‌ای که به انتهای خط تغذیه مایکرواستریپی وصل شده است، تحریک می‌شود. برای اجتناب از اتصال گیره و صفحه زمین، سوراخی در صفحه زمین با قطر بزرگتر از D_1 تعبیه شده است. در اینجا وظیفه صفحه زمین، که در بالای زیرلایه اول قرار دارد، جدا کردن آنتن از لایه پایین صفحه زمین می‌باشد تا اثرات خط تغذیه بر روی عنصر آنتن به حداقل ممکن برسد [۱ و ۲].

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، از آنجایی که پچ اصلی (تشعشع‌کننده) بر روی زیرلایه سوم قرار می‌گیرد، این زیرلایه نقش مهمی در تعیین مشخصات آنتن دارد. بنابراین، زیرلایه‌ای با ثابت دی‌الکتریک بسیار کوچک ($2/17$) برای این منظور در نظر گرفته شده است. اما برای زیرلایه دوم که تاثیر کمتری بر روی مشخصات آنتن داشته و همچنین وظیفه نگهداری از قسمت نازک‌تر گیره پله‌ای و ایجاد فاصله بین قسمت ضخیم‌تر گیره پله‌ای و صفحه زمین را دارد، از زیرلایه‌ای با ثابت دی‌الکتریک بزرگتر ($2/45$) استفاده شده است تا در هزینه‌ها صرفه‌جویی گردد. مشخصات کامل زیرلایه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین برای درک بهتر، نمای از هم پاشیده شده ساختار آنتن در شکل (۲) نشان داده شده است.

در انتها برای بهینه‌سازی ابعاد بخش‌های مختلف آنتن که در شکل (۱) نشان داده شده است، مطالعه مولفه‌ای بر روی آنتن چندلایه صورت گرفته است. این رویکرد، در منابع اشاره شده در بخش مراجع نیز مورد استفاده قرار گرفته است. به همین منظور برای تعیین مقادیر بهینه ابعاد پچ‌های تشعشعی و پارازیتی و همچنین مولفه‌های D_2 و h_{air} اثرات مقادیر مختلف این مولفه‌ها بر روی منحنی ضریب انعکاس^۱ آنتن چندلایه پیشنهادی، در شکل‌های (۳ و ۴) بررسی شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

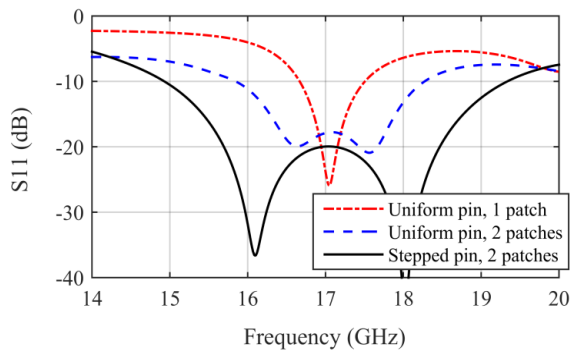


شکل (۱): ساختار آنتن پیشنهادی (الف) نمای کناری، (ب) نمای بالایی، (ج) نمای پایینی.

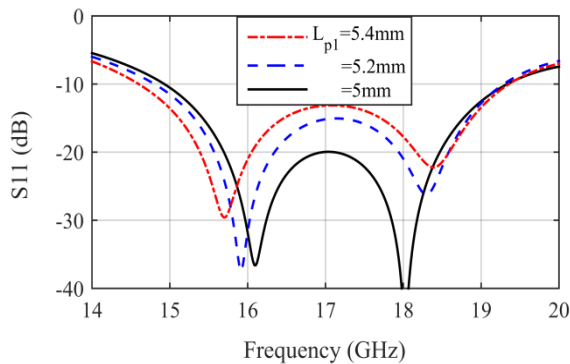
پچ اصلی (تشعشع‌کننده)، بر روی زیرلایه سوم با ضخامت نسبتاً زیاد 0.787 mm (0.44λ) قرار گرفته است تا پهنای باند و بهره آنتن افزایش یابد. همچنین برای افزایش بیشتر پهنای باند آنتن، پچ پارازیتی بر روی پچ تشعشع‌کننده و در قسمت پایین زیرلایه چهارم قرار می‌گیرد. زیرلایه‌های سوم و چهارم مشابه یکدیگر بوده و دارای ثابت دی‌الکتریک $2/17$ می‌باشند. در این حالت، زیرلایه چهارم به‌عنوان رادوم برای کل آنتن عمل می‌کند. فاصله هوایی بین زیرلایه‌های سوم و چهارم (h_{air})، توسط نگهدارنده‌های تفلونی که برای این منظور طراحی شده‌اند، ایجاد شده است. با توجه به مشخصات زیرلایه‌های سوم و چهارم، ابعاد اولیه پچ‌ها (تشعشعی و پارازیتی) توسط روابط نظری موجود در مراجع [۲۱ و ۲۲]، در فرکانس مرکزی محاسبه می‌شود. ابعاد بهینه پچ‌ها نیز با استفاده از مطالعه مولفه‌ای توسط نرم افزار HFSS به دست خواهد آمد. این نکته هم حائز اهمیت است که، در کارهای مشابه معمولاً اندازه پچ پارازیتی، کوچکتر یا مساوی پچ تشعشعی در نظر گرفته شده است.

در انتهای خط تغذیه 50Ω ، یک گیره پله‌ای با قطرهای D_1 و D_2 قرار خواهد گرفت تا بتواند از طریق اتصال فیزیکی، پچ تشعشع‌کننده را تحریک نماید. قطر قسمت نازک‌تر گیره پله‌ای (D_1) باید از 0.65 mm (عرض خط تغذیه) کمتر باشد. اندازه D_1

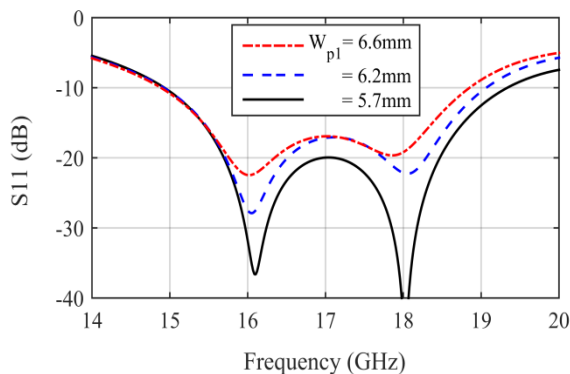
¹ Reflection coefficient



(الف)



(ب)

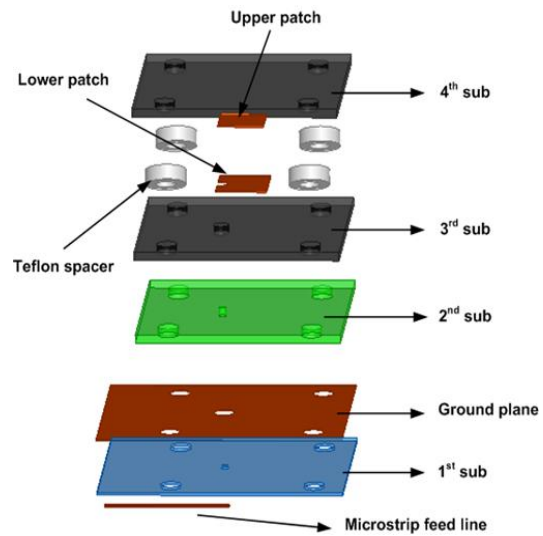


(ج)

شکل (۳): S_{11} شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی (الف) ساختارهای

مختلف، (ب) مقادیر مختلف L_{pl} ، (ج) مقادیر مختلف W_{pl} .

در شکل (۴) نیز اثرات مقادیر مختلف ابعاد پچ پارازیتی، D_2 و h_{air} بر روی منحنی S_{11} آنتن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-الف) دیده می‌شود، با کوچکتر شدن طول و عرض پچ پارازیتی، فرکانس تشدید اول آنتن بیشتر شده و قله منحنی S_{11} پایین‌تر آمده است، در نتیجه پهنای باند امپدانسی آنتن افزایش یافته است. به همین ترتیب، با افزایش مقدار D_2 ، صفرهای منحنی S_{11} پایین‌تر آمده است. در انتها نیز بر اثر افزایش مقدار h_{air} ، فرکانس تشدید دوم آنتن کاهش یافته و با پایین‌تر آمدن صفرها و قله منحنی S_{11} ، قابلیت اطمینان آنتن افزایش یافته است. مقادیر بهینه شده مولفه‌های طراحی، در جدول (۲) ارائه شده‌اند.



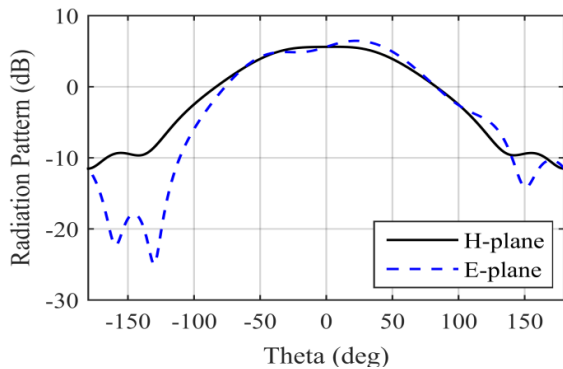
شکل (۲): ساختار از هم پاشیده شده آنتن پیشنهادی.

در شکل (۳-الف) تاثیرات اضافه شدن پچ پشت‌های و استفاده از گیره پله‌ای در مقایسه با گیره یکنواخت، بر روی ضریب انعکاس آنتن نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در صورت استفاده از یک پچ و گیره یکنواخت، یک صفر^۱ در منحنی S_{11} آنتن در فرکانس ۱۷ GHz ایجاد شده و پهنای باند در حدود ۱ GHz خواهد شد. اما هنگامی که پچ دوم (پارازیتی) به ساختار اضافه می‌شود، صفر دوم در منحنی S_{11} ایجاد شده و بنابراین پهنای باند به بیش از ۲ GHz افزایش می‌یابد (نمودار خط چین). و در نهایت با استفاده از گیره پله‌ای به جای گیره یکنواخت، پهنای باند امپدانسی آنتن به بیش از ۴ GHz افزایش یافته است (نمودار توپر). در شکل‌های (۳-ب و ج) نیز تاثیرات مقادیر مختلف L_{pl} و W_{pl} ، بر روی منحنی S_{11} آنتن نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های مذکور قابل مشاهده است، با کاهش مقدار L_{pl} ، فرکانس‌های تشدید آنتن اندکی جابجا شده و صفرهای منحنی S_{11} پایین‌تر آمده است. همچنین قله منحنی ضریب انعکاس که در فرکانس ۱۷ GHz رخ داده است، پایین‌تر آمده و باعث افزایش قابلیت اطمینان آنتن شده است. با کاهش مقدار W_{pl} نیز، صفرهای منحنی S_{11} پایین‌تر آمده و در نتیجه پهنای باند امپدانسی آنتن افزایش یافته است.

جدول (۱): مشخصات زیرلایه‌ها

ابعاد (mm)	ضخامت (mm)	ϵ_r	زیرلایه
۲۴ × ۲۰	۰/۲۵۴	۲/۵	اول (Rogers Ultralam 2000)
۲۰ × ۲۰	۰/۷۶۲	۲/۴۵	دوم (Neltec NX9245)
۲۰ × ۲۰	۰/۷۸۷	۲/۱۷	سوم و چهارم (Arlon CuClad 217)

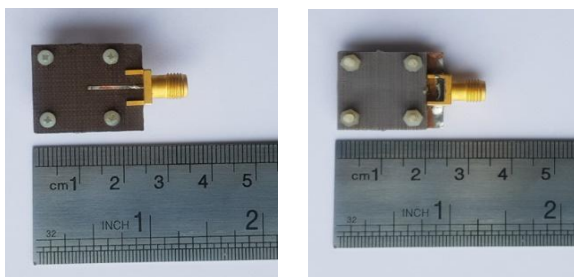
^۱ Null



شکل (۵): الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۷ GHz (صفحات $\phi = 0$ و $\phi = 90$ درجه)

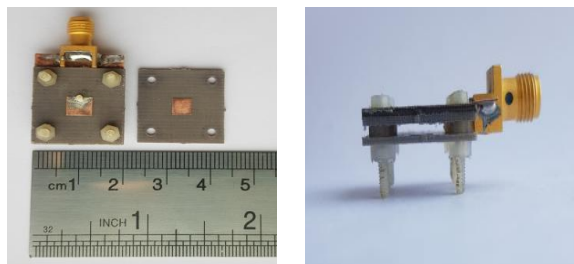
۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

آنتن پیشنهادی با استفاده از زیرلایه‌های مذکور در جدول (۱) و با ابعاد ارائه شده در جدول (۲) ساخته شد و مشخصات آن در اتاق آزمون آنتن مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار HFSS، نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در ادامه ارائه خواهند شد. تصویر آنتن ساخته و پیاده‌سازی شده با استفاده از نگهدارنده‌های تفلونی در شکل (۶) ارائه شده است. برای توضیح بیشتر روش پیاده‌سازی و ساخت آنتن مذکور، تصاویری از تمام لایه‌های آنتن قبل از نصب کردن آن، در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، لایه اول (سمت راست) در بردارنده خط تغذیه مایکرواستریپی و صفحه زمین می‌باشد. در لایه‌های سوم و چهارم نیز به ترتیب پیچ‌های تشعشع‌کننده و پارازیتی قرار دارند.



(ب)

(الف)



(د)

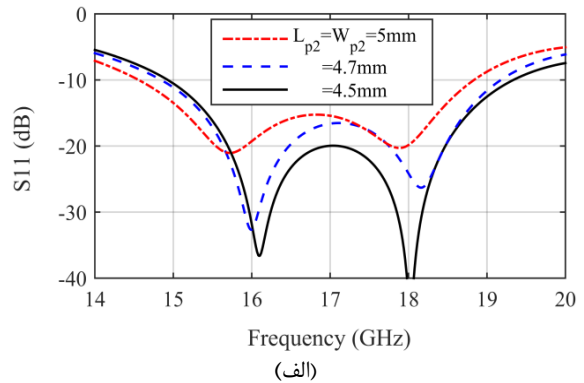
(ج)

شکل (۶): تصاویری از آنتن پیشنهادی ساخته شده (الف) نمای بالا، (ب) نمای پایین، (ج) نمای کنار، (د) نمای بالا قبل از نصب لایه چهارم.

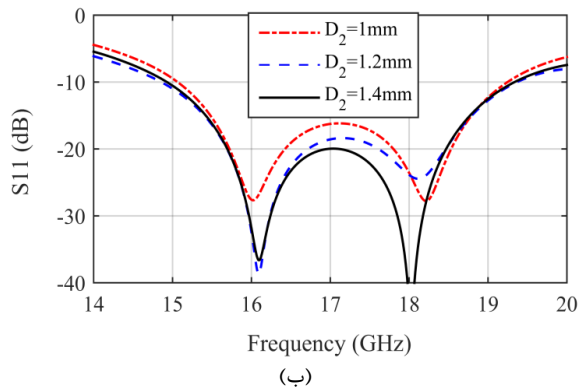
جدول (۲): مولفه‌های طراحی آنتن پیشنهادی

(همه مقادیر بر حسب میلی‌متر هستند)

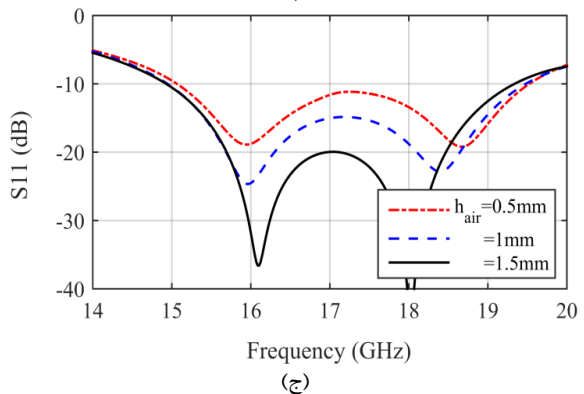
مقدار	مولفه	مقدار	مولفه
۲۰	L	۲۰	W
۵	L_{p1}	۵/۷	W_{p1}
۴/۵	L_{p2}	۴/۵	W_{p2}
۱۲	L_f	۰/۶۵	W_f
۲۴	L_1	۱/۵	h_{air}
۲	D_3	۰/۵	D_1
۴	D_4	۱/۴	D_2



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴): مطالعه مولفه‌های بر روی منحنی S_{11} آنتن (الف) ابعاد مختلف پیچ پارازیتی، (ب) مقادیر مختلف D_2 ، (ج) مقادیر مختلف h_{air}

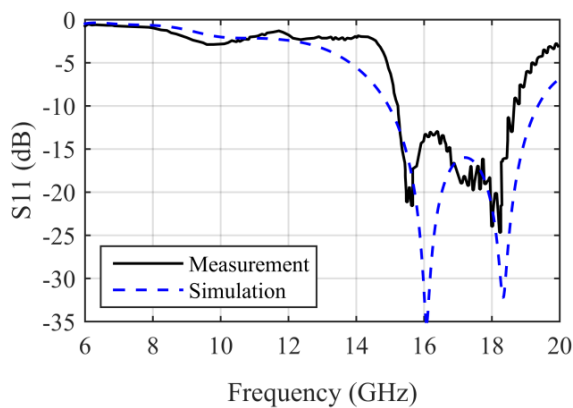
در نهایت الگوهای تشعشعی^۱ شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در فرکانس مرکزی و در صفحات E و H با حداکثر بهره ۷ dBi، در شکل (۵) نشان داده شده است.

^۱ Radiation patterns

همان‌طور که قبلاً گفته شد هدف اصلی در طراحی این آنتن، افزایش پهنای باند امپدانس آن می‌باشد. بنابراین، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از پیچ پارازیتی و گیره پله‌ای در این آنتن مورد استفاده قرار گرفته است. از این‌رو ساختار پیشنهادی، نسبت به ساختارهای ساده و تک‌لایه، دشواری پیاده‌سازی بیشتری دارد (به دلیل نیاز به لحیم‌کاری گیره تغذیه با خط میکرواستریپی و پیچ تشعشی).

از طرف دیگر افزایش تعداد زیرلایه‌ها باعث شده است که ارتفاع کل آنتن نسبت به نمونه‌های مشابه افزایش یابد. این موضوع در جدول (۳) قابل مشاهده است.

ضریب انعکاس آنتن ساخته‌شده در باند Ku، توسط دستگاه^۱ VNA اندازه‌گیری شده است. منحنی S_{11} اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در شکل (۸) با یکدیگر مقایسه شده‌اند و مشاهده می‌شود که انطباق خوبی در کل بازه فرکانسی دارند. پهنای باند امپدانس اندازه‌گیری شده آنتن (به‌ازای مقادیر S_{11} کمتر از -۱۰ dB)، از فرکانس ۱۵/۱ GHz تا فرکانس ۱۸/۹ GHz می‌باشد (۳/۸ GHz).



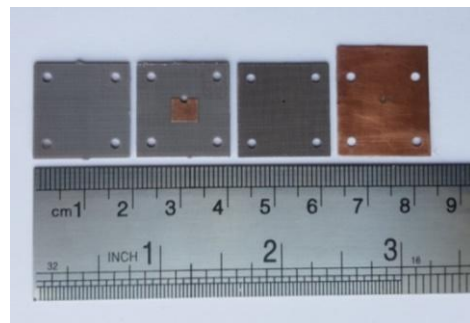
شکل (۸): مقایسه ضریب انعکاس اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی.

الگوهای تشعشی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده آنتن پیچ پیشنهادی باند Ku، در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است. پهنای پرتو نیم توان^۲ (HPBW) اندازه‌گیری شده صفحات E و H در فرکانس مرکزی، به ترتیب ۶۷ و ۵۸ درجه می‌باشد. حداکثر بهره اندازه‌گیری شده آنتن در فرکانس مرکزی ۱۷ GHz نیز ۶/۸ dBi می‌باشد.

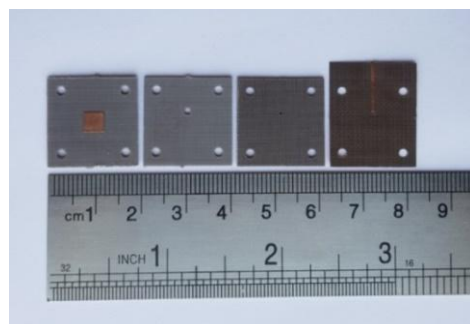
^۱ Vector Network Analyzer

^۲ Half power beam width

برای پیاده‌سازی این آنتن، ابتدا زیرلایه‌های اول تا سوم روی یکدیگر قرار گرفته و با چهار عدد پیچ و مهره تفلونی کاملاً محکم می‌شوند تا هیچ فضای خالی بین لایه‌ها باقی نماند. سپس یک گیره پله‌ای با قطرهای D_1 و D_2 که برای دستیابی به تطبیق امپدانس بهتر، طراحی، بهینه‌سازی و ساخته شده است، در محل سوخ‌های تعبیه‌شده در زیرلایه‌های اول، دوم و سوم قرار گرفته و از پایین به انتهای خط تغذیه میکرواستریپی و از بالا به پیچ تشعشع‌کننده لحیم می‌شود. شایان ذکر است که این چهار عدد مهره تفلونی که در شکل (۲) به‌عنوان (Teflon spacer) مشخص شده است، برای ایجاد فاصله هوایی یکنواخت بین زیرلایه‌های سوم و چهارم (پیچ‌های اصلی و پارازیتی) نیز به کار گرفته می‌شود. در انتها زیرلایه چهارم که در برگیرنده پیچ پارازیتی می‌باشد، بر روی مهره‌های تفلونی (Teflon spacer) قرار گرفته و برای محکم شدن آن، چهار عدد مهره تفلونی دیگر بر روی زیرلایه چهارم بسته می‌شود. مزیت این روش پیاده‌سازی نسبت به روش‌های دیگر (مانند استفاده از چسب)، آن است که با برداشتن لحیم خط تغذیه و پیچ اصلی، آنتن به راحتی قابل جداسازی بوده و در صورتی که هر کدام از زیرلایه‌ها دچار آسیب و یا خرابی شده باشد، امکان تعویض آن زیرلایه وجود دارد. همچنین نسبت به چسب ارزان‌تر بوده و از اثرات احتمالی لایه‌های چسب بر روی مشخصات آنتن و ایجاد فاصله اضافی توسط آن، جلوگیری می‌شود.



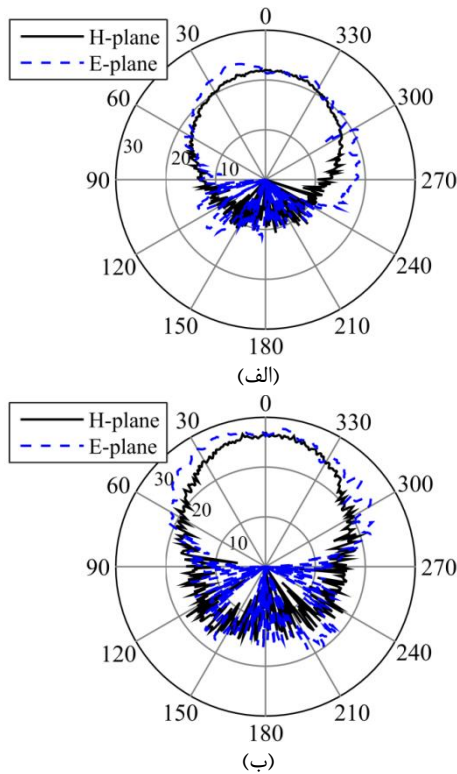
الف



ب

شکل (۷): تصاویری از لایه‌های ۱ تا ۴ (از راست به چپ) ساختار

پیشنهادی (الف نمای بالا، ب نمای پایین)



شکل (۱۰): الگوهای تشعشی اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی (الف) فرکانس ۱۱/۵ GHz، (ب) فرکانس ۱۸/۵ GHz

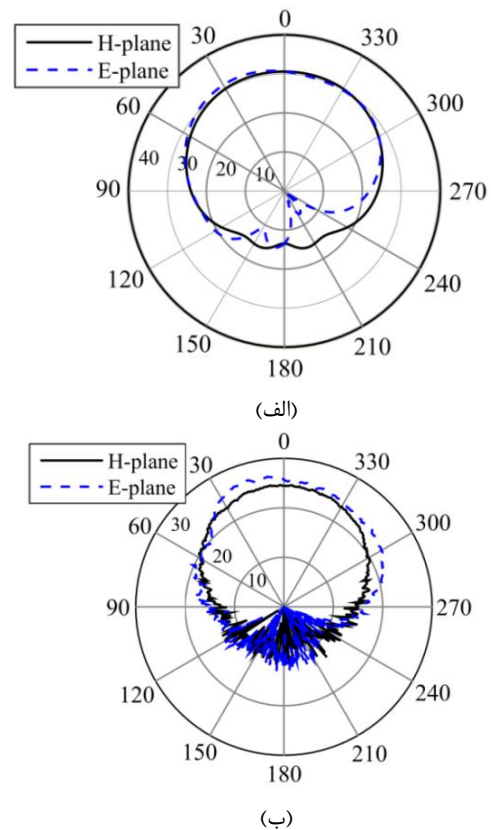
نتایج ارائه شده حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد، که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک طراحی نوین برای آنتن مایکرواستریپ پهن‌بند در باند Ku ارائه شده است. هدف از این طراحی، افزایش پهنای باند آنتن مایکرواستریپ برای استفاده در سامانه عملیاتی SAR می‌باشد. به دلیل محدودیت ابعاد و وزن آنتن در سامانه مذکور و برای مقرون به صرفه بودن آن، ساختار مایکرواستریپ در نظر گرفته شده است. اما مهم‌ترین چالش آنتن‌های مایکرواستریپ، پهنای باند کم آن‌ها می‌باشد که برای فائق آمدن بر این مشکل، از روش‌های چندلایه کردن آنتن، استفاده از پیچ پارازیتی و همچنین پله‌ای کردن گیره تغذیه استفاده شده است. در نتیجه آنتن ساخته شده پهنای باندی در حدود ۲۲٪ در فرکانس مرکزی ۱۱ GHz از خود نشان داده است. همان‌طور که در جدول (۳) نیز قابل مشاهده است، پهنای باند آنتن پیشنهادی نسبت به مراجع اشاره شده افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین شایان ذکر است در جستجوهای انجام شده بر روی تعداد زیادی از مراجع و مقالات مرتبط، دستیابی به تطبیق امپدانس با استفاده از گیره پله‌ای دیده نشده است. از طرف دیگر، این آنتن قابلیت مجتمع شدن و به‌کارگیری در ساختار آرایه‌ای را به راحتی داراست.

جدول (۳): مقایسه بین آنتن پیشنهادی و نتایج تحقیقات مشابه.

مرجع	فرکانس مرکزی (GHz)	پهنای باند (%)	بهره (dBi)	ابعاد (λ_0)	تعداد لایه ارتفاع (λ_0)
[۱۱]	۱۰	۸/۶۷	۷/۲	۱ × ۱	۳-۰/۱۳
[۱۲]	۲/۴۵	۴	۱۰	۱/۱۶ × ۱/۳۷	۲-۰/۰۶
[۱۴]	۲۸/۵	۱۳	۷/۳	۰/۴۹ × ۰/۴۹	۲-۰/۰۸۱
[۱۵]	۳/۷ ۵/۲	۱۳/۵ ۱۱/۵	۵/۱ ۶/۶	۰/۳۲ × ۰/۹۳ ۰/۴۵ × ۱/۳۱	۳-۰/۰۸۲
[۱۸]*	۲۷/۶۵	۱۵/۱۸	۸/۲	۰/۵۷ × ۰/۶۴	۲-۰/۱۱۷
[۱۹]	۱۸/۱	۴/۱	۱۳/۲۷	۱/۸۱ × ۱/۸۱	۴-۰/۲۴۷
این آنتن	۱۷	۲۲	۶/۸	۱/۱۳ × ۱/۱۳	۴-۰/۲۳



شکل (۹): الگوهای تشعشی آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱۷ GHz (الف) شبیه‌سازی، (ب) اندازه‌گیری

۵- مراجع

- [11] K. Xu, J. Shi, X. Qing, and Z. N. Chen, "A substrate integrated cavity backed filtering slot antenna stacked with a patch for frequency selectivity enhancement," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, pp. 1910-1914, 2018.
- [12] M. A. Belen, "Stacked microstrip patch antenna design for ISM band applications with 3D-printing technology," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, pp. 709-712, 2019.
- [13] A. Kumar, N. Gupta, and P. C. Gautam, "Design Analysis of Broadband Stacked Microstrip Patch Antenna for WLAN Applications," *Wireless Personal Communications*, vol. 103, pp. 1499-1515, 2018.
- [14] Q. Van den Brande, S. Lemey, S. Cuyvers, S. Poelman, L. De Brabander, O. Caytan, L. Bogaert, I.L. De Paula, S. Verstuyft, A. C. Reniers, and B. Smolders, "A Hybrid Integration Strategy for Compact, Broadband, and Highly Efficient Millimeter-Wave On-Chip Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, pp. 2424-2428, 2019.
- [15] A. Agarwal and A. Kaur, "A dual band stacked aperture coupled antenna array for WLAN applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, pp. 648-654, 2017.
- [16] J. Xu, W. Hong, Z. H. Jiang, and H. Zhang, "Wideband, Low-Profile Patch Array Antenna With Corporate Stacked Microstrip and Substrate Integrated Waveguide Feeding Structure," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, pp. 1368-1373, 2018.
- [17] P. A. Dzagbletey and Y. B. Jung, "Stacked microstrip linear array for millimeter-wave 5G baseband communication," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, pp. 780-783, 2018.
- [18] M. Khalily, R. Tafazolli, P. Xiao, and A. A. Kishk, "Broadband mm-wave microstrip array antenna with improved radiation characteristics for different 5G applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, pp. 4641-4647, 2018.
- [19] E. García-Marín, J. L. Masa-Campos, and P. Sánchez-Olivares, "Linearly polarized small patch array fed by corporate SIW network," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, pp. 587-593, 2016.
- [20] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB," Chapman & Hall_CRC, 2000.
- [21] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband microstrip antennas," Artech house, 2003.
- [1] R. B. Waterhouse, "Design of probe-fed stacked patches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, pp.1780-1784, 1999.
- [2] S. D. Targonski, R. B. Waterhouse, and D. M. Pozar, "Design of wide-band aperture-stacked patch microstrip antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, pp. 1245-1251, 1998.
- [3] J. R. James and P. S. Hall, "Handbook of Microstrip Antennas," London, Peter Peregrinus Ltd., vol. 1, 1989.
- [4] P. Mousavi, M. Fakhrazadeh, S. H. Jamali, K. Narimani, M. Hossu, H. Bolandhemmat, G. Rafi, and S. Safavi-Naeini, "A low-cost ultra low profile phased array system for mobile satellite reception using zero-knowledge beamforming algorithm," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 3667-3679, 2008.
- [5] S. I. M. Sheikh, W. Abu-Al-Saud, and A. B. Numan, "Directive stacked patch antenna for UWB applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, 2013.
- [6] R. Jian, Y. Chen, T. Chen, and Z. Li, "Efficient design of compact millimeter wave microstrip linear array with bandwidth enhancement and sidelobe reduction," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, p. e21881, 2019.
- [7] W. Swelam, A. A. Mitkees, and M. M. Ibrahim, "Wideband planar phased array antenna at Ku frequency-band for synthetic aperture radars and radar-guided missiles tracking and detection," *IEEE Conference on Radar*, April 2006.
- [8] S. Moeini, A. R. Omidvar, and S. H. Mohseni Armaki, "Design and Construction of a Wide Band Antenna with Circular Polarization," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 7, no. 1, pp. 83-88, 2019. (In Persian)
- [9] J. Khailpour, E. Zarezadeh, and M. Hajebi, "Design and Fabrication of Microstrip Antenna Using Log-Periodic Array for Bandwidth Enhancement with Inset and Proximity Feed," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 4, no. 3, pp. 31-43, 2016. (In Persian)
- [10] F. Croq and D. M. Pozar, "Millimeter-wave design of wide-band aperture-coupled stacked microstrip antennas," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 39, pp. 1770-1776, 1991.

Design, Simulation and Fabrication of a Wideband Microstrip Antenna Using Multilayered Structure and Parasitic Element in Ku-Band

R. Kazemi¹, M. Fallah^{2*}, B. Abbasi Arand³, S. H. Mohseni Armaki⁴

* Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 06/06/2020; Accepted: 13/09/2020)

Abstract

In this paper, a new design of a wide band rectangular microstrip patch antenna in Ku-band using multilayered dielectric structure is presented for broadband RADAR and satellite applications. In this compact design, a conductor pin is used to excite the radiating patch. The parasitic patch is separated from the radiating one by air gap. The obtained 10-dB impedance bandwidth of the antenna is improved to more than 22%. The variations in the measured gain of the proposed antenna are less than 1 dB in the whole bandwidth. The simulation and fabrication results of the proposed antenna are in a good agreement.

Keywords: Wideband Microstrip Antennas, Ku-band Antenna, Impedance Bandwidth, Radiating Patch, Parasitic Patch

* Corresponding author E-mail: mohsen_fallah@mut.ac.ir