مجله علمی پژوهشی «الکترومغناطیس کاربردی»
سال چهارم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵؛ ص ۴۳- ۳۱

طراحی و ساخت آرایه آنتن میکرواستریپ با پهنای باند بالا به روش آرایه متناوب لگاریتمی با تغذیه Inset و Proximity

جعفرخلیل‌پور[۱]، اسماعیل زارع‌زاده[۲*]، مریم حاجبی[۳]

۱- استادیار، دانشکده برق دانشگاه خاتم الانبیاء(ص)، ۲ و۳- دانشجو دکتری برق مخابرات، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۶/۰۷/۲۳، پذیرش: ۹۷/۰۲/۱۱)

چکیده: در این مقاله نحوه طراحی و ساخت آرایه لگاریتمی با استفاده از روش‌های تغذیه Inset و Proximity مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها و نتایج آزمایشگاهی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و نشان دادند که با استفاده از تغذیه Inset پهنای باند افزایش یافته و تطبیق امپدانسی بهتر از ترمینال ورودی حاصل می‌شود. به‌علاوه، با استفاده از تغذیه Proximity به دلیل حذف اتصالات T شکل و لحیم‌کاری‌ها، تشعشعات ناخواسته از بین رفته و در نتیجه بهره و پهنای باند بیشتر و ابعاد کوچکتری نسبت به آنتن با تغذیه Inset به‌دست آمد. فرکانس تشدید و امپدانس مشخصه خط تغذیه به ترتیب ۳/۰۳ GHz و ۵۰ Ω در نظر گرفته شدند. با استفاده از آرایه متناوب لگاریتمی پهنای باند امپدانسی و بهره آنتن میکرواستریپ به ترتیب از ۲/۷ ٪ و حدود ۲ dB برای تک عنصر به ۲۷/۴ ٪ و ۸ dB برای ۵ عنصر افزایش یافت.

کلید واژه‌ها: آنتن میکرواستریپ، آرایه متناوب لگاریتمی، تغذیه Inset، تغذیه Proximity، تطبیق امپدانسی

۱- مقدمه

ارتباطات بی‌سیم در دهه‌های گذشته به سرعت رشد یافته و تاثیر بسزایی بر روی زندگی بشر داشته است به نحوی که در چند سال گذشته توسعه شبکه‌های محلی بی‌سیم (WLAN) یکی از عمده جذابیت‌های میدان ارتباطات و مخابرات محسوب می‌شود و از آنجایی که آنتن‌های پچ میکرواستریپ دارای ویژگی‌های مناسبی برای کاربرد در این زمینه می‌باشند هر روز بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرند. هندسه ساده و متنوع آنتن‌های پچ مزیت‌های بسیاری نسبت به پیکربندی آنتن‌های دیگر دارد، برای مثال بسیار سبک و ساده هستند و قابلیت ساخت با استفاده از برد مدارهای چاپی (PCB) را دارند. همچنین این آنتن‌ها با مدارات مجتمع میلی‌متری و مایکروویو (MMIC) و ساختارهای غیر هم‌صفحه‌ای هم تطابق دارند [۱-۲]. در کاربردهای نظامی نیز، آنتن‌های پچ که یک شکل[۱] بوده و فرم و اندازه کوچکی دارند برای استفاده و نصب در سکوهای پرتاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر موارد فوق، آنتن‌های پچ دارای ویژگی‌های جذابی مانند قیمت پایین، وزن کم و سادگی در ساخت هستند.

با وجود مزیت‌های زیاد آنتن‌های پچ، این آنتن‌ها معایبی نیز دارند که اصلی‌ترین آن‌ها پایین بودن پهنای باندشان می‌باشد. این عامل محدودکننده از طبیعت تشدید[۲] این آنتن‌ها به وجود می‌آید. از معایب دیگرشان می‌توان به بازدهی[۳] پایین، گنجایش توان محدود، تشعشع ناخواسته از تغذیه، قطبش کم و مشکلات ناشی از خطاهای ساخت اشاره کرد [۴-۳].

اخیراً پیشرفت‌های زیادی برای افزایش پهنای‌باند آنتن‌های میکرواستریپ صورت گرفته است. در[۵] برای افزایش پهنای باند این نوع آنتن‌ها از رو لایه فرامواد استفاده شده است. یک آنتن فراپهن باند تک قطبی با استفاده از شکاف‌های ایجادشده در سطح آنتن پچ ارائه شده است [۶]. برخی از روش‌های افزایش پهنای باند آنتن شامل تنظیم موقعیت قرار گرفتن المان‌ها برای استفاده در تغذیه آنتن می‌باشد. یک روش ساده و متداول دیگر برای افزایش پهنای باند افزایش ضخامت زیرلایه[۴]، با استفاده از یک زیرلایه با ضخامت کم می‌باشد. این روش تا حدی پهنای باند آنتن را افزایش می‌دهد اما تلفات توان به علت تلفات امواج سطحی گلبرگ‌های کناری[۵] در این روش افزایش پیدا می‌کند.

* نویسنده پاسخگو: zarezadeh@aut.ac.ir

1- Conformal

2 -Resonant
3 -Efficiency
4 -Substrate
5- Side Lobe

محدودیت تلفات بالای امواج سطحی، ما را مجبور به پیدا کردن روشی جایگزین برای به‌دست آوردن پهنای باند بیشتر با کمترین تلفات می‌کند [۷]. البته روش‌های متداولی مانند کاهش ثابت گذردهی زیرلایه با ضخامت زیاد برای افزایش پهنای باند موثر می‌باشند اما این روش‌ها وزن و مقطع عرضی آنتن را افزایش می‌دهند [۸].

۱-۲- آرایه متناوب لگاریتمی میکرواستریپی

استفاده از آرایه متناوب لگاریتمی میکرواستریپی[1] (LPMA) یکی از روش‌های بسیار موثر و در عین حال ساده به‌منظور جبران پهنای باند باریک در آنتن‌های میکرواستریپ است. در این روش بدون اینکه تغییری در کلیات و شکل ساختار آنتن ایجاد شود، می‌توان المان‌های آنتن را به‌صورت متناوب لگاریتمی با فواصل مشخص در کنار یکدیگر قرار داد و پهنای باند وسیعی را به دست آورد. از این رو، آرایه‌ای از المان‌های پچ میکرواستریپ بر روی ساختاری ساده و سبک که دارای ویژگی‌های پهن‌باند با حجم و وزن کم می‌باشد، به‌دست می‌آید که می‌تواند در ارتباطات مخابراتی پهن باند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ایده استفاده از روش آرایه بسیار شبیه به آنتن متناوب لگاریتمی ذوزنقه‌ای یا آنتن دوقطبی است که در فضای آزاد دارای الگوی همه سو یکسان[2] می‌باشد. از این رو، می‌توان با ترکیب چندین المان تشعشعی که در مقیاس لگاریتمی فرکانس آرایش می‌یابند پهنای باند را افزایش داد. هر المان در یک باند مشخصی تشعشع می‌کند و با انجام این فرایند یک تشعشع با همپوشانی فرکانسی را ناشی می‌شود که پهنای باند مطلوب و مورد نظر را فراهم می‌آورد. در مقایسه با آنتن‌های همه سو یکسان معمول به کار رفته مانند آنتن حلزونی[3]، آرایه LPMA الگوی تشعشعی پهن باندی دارد که باعث می‌شود این آنتن‌ها برای کاربردهای نظامی مناسب باشند. از طرفی المان‌های آرایه LPMA قادرند بر روی همان زیر لایه‌ای که یک پچ باند باریک قرار دارد جای بگیرند، بنابراین استفاده از آرایه LPMA منجر به ساختار جدیدی نمی‌شود به‌علاوه اینکه تغذیه آن نیز کاملاً مشابه تغذیه یک تک‌المان است [۹].

در روش آرایه متناوب لگاریتمی از یک تغذیه تکی به‌عنوان یک خط انتقال استفاده می‌شود و المان‌های پچ به‌صورت موازی و یک در میان در دو طرف این خط تغذیه از طریق خطوط شاخه‌ای[4] یا فاصله شکافی به خط تغذیه متصل می‌شوند. ابعاد المان‌ها با یک ضریب ثابت τ که به ضریب نسبت[5] معروف است به‌صورت تابعی از لگاریتم فرکانس نسبت به یکدیگر و با دوره تناوب $|\log(\tau)|$ مقیاس می‌شوند. این المان‌ها با فاصله مشخصی نسبت به یکدیگر که لزوماً متناوب لگاریتمی نیستند به شکلی قرار می‌گیرند که کمترین اثر تزویج بر روی یکدیگر را داشته باشند. بنابراین با جمع پهنای باند هر یک از المان‌های آرایه، پهنای باندی وسیع به‌دست می‌آید. آنتن‌های با این شکل از آرایه، آنتن‌های مستقل از فرکانس محسوب می‌شوند. از ویژگی‌های آنتن‌های مستقل از فرکانس این است که مشخصه‌های الگوی تشعشعی مانند بهره، امپدانس ورودی و پهنای باند در فرکانس‌های مربوط به دوره تناوبشان به شکل لگاریتمی از فرکانس تکرار می‌شوند [۱۰-۱۱].

در این مقاله، آرایه LPMA با روش‌های تغذیه Inset و Proximity طراحی شده است که دارای پهنای باند وسیعی می‌باشد. در ادامه آرایه متناوب لگاریتمی میکرواستریپی و پیکربندی آنتن توصیف خواهد شد و در بخش سوم مشخصه‌های المان پچ آنتن میکرواستریپ و نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

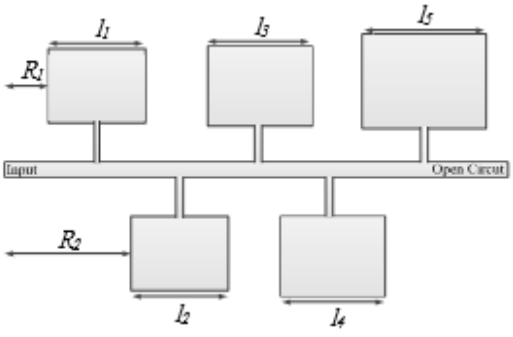
۲- توصیف آرایه متناوب لگاریتمی میکرواستریپی

با استفاده از آرایه متناوب لگاریتمی، پهنای باند وسیع با آرایه کردن تشعشع‌کننده‌هایی با پهنای باند باریک ایجاد می‌شود. آرایه LPMA شامل چندین عنصر پچ میکرواستریپ است که بر روی یک لایه دی‌الکتریک قرار گرفته و به‌طور مستقیم توسط یک خط تغذیه[6] از طریق خطوط شاخه‌ای که به هر یک از عنصرها متصل می‌شود تغذیه می‌شوند. برای تحریک تک عنصرها ابعاد و فاصله بین عنصرها با شروع از نقطه تغذیه افزایش می‌یابد که یک ویژگی مهم در طراحی آنتن LPMA است و باعث می‌شود که تغییر فرکانس در عملکرد الکتریکی آنتن اثر زیادی نداشته باشد، یعنی تغییرات الکتریکی در آنتن به آرامی با تغییرات فرکانس انجام می‌شود. با تغییر در فرکانس عملیاتی یک گذار آرامی در طول آرایه عنصرهایی که در ناحیه فعال قرار دارند صورت می‌گیرد و هرکدام از عنصرهای پچ در فرکانس کاری خود تشعشع می‌کنند. در عمل به‌دست آوردن یک تطبیق امپدانس برای بیشتر از دو عنصر با استفاده از تغذیه Corporate دشوار است بنابراین، از خط تغذیه سری برای آرایه استفاده می‌شود. برای آرایه‌ای با عنصرهای کم، مقداری از توان ورودی که برای

1- Log Periodic Microstrip Antenna
2- Omnidirectional
3- Spiral
4- Branch
5- Scaling Factor
6 -Feed Line

تغذیه عنصرها به کار می‌رود باقی می‌ماند، این امواج رونده[1] پس از رسیدن به انتهای خط با بازگشت به عنصرهای آرایه باعث به هم ریختگی الگوی تشعشعی، افزایش تلفات و همین‌طور کاهش بهره آنتن می‌شوند. در مقابل باز بودن انتهای خط باعث افزایش بازدهی آنتن و برطرف کردن مشکلات فوق خواهد شد اما برای آرایه‌هایی با عنصرهای بیشتر روش انتهای باز دیگر پاسخگو نخواهد بود زیرا اثر اتصالات T شکل و انتهای مدار باز و همچنین افزایش طول الکتریکی نسبت به انتهای خط تغذیه برای برخی از عنصرها موجب عدم تطبیق کافی بین خط تغذیه و عنصرهای پچ می‌شود. از این رو می‌توان از یک بار تطبیق یافته در انتهای خط برای جلوگیری از بازگشت امواج هدایتی به عنصرهای آرایه استفاده نمود، که با قرار دادن عنصر بزرگ‌تر در انتهای خط تغذیه و تطبیق مناسب آن با خط تغذیه، آرایه مناسب و مورد نظر حاصل می‌شود [۱۲].

در شکل (۱) دو نمونه اولیه از آرایه متناوب لگاریتمی نشان داده شده است. در شکل (b) برخلاف شکل (a) که عنصرها به صورت سری در یک طرف خط تغذیه قرار گرفته‌اند، عنصرها در دو طرف انتقال به صورت یک در میان با یکدیگر موازی هستند. مزیت پیکربندی شکل (b) نسبت به شکل (a) عدم تاثیر آرایه در الگوی صفحه E و همین طور متقارن[2] بودن عنصرهای این آرایه می‌باشد. در این شیوه آرایه بهتر می‌توان از فضای موجود در دو طرف خط انتقال استفاده کرد و تعداد عنصر بیشتری را با فضای کمتر در آرایه جای داد از این رو ابعاد آنتن کاهش می‌یابد.



شکل (۱): پیکربندی آرایه آنتن میکرواستریپ متناوب لگاریتمی با انتهای باز

۲-۱- مشخصه‌های آنتن LPMA

در آنتن دوقطبی متناوب لگاریتمی روابط مربوط به فواصل و طول‌های مختلف توسط عکس ضریب نسبت، به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$\frac{1}{\tau}=\frac{l_2}{l_1}=\frac{l_{p+1}}{l_p}=\frac{R_{p+1}}{R_p} \qquad (۱)$$

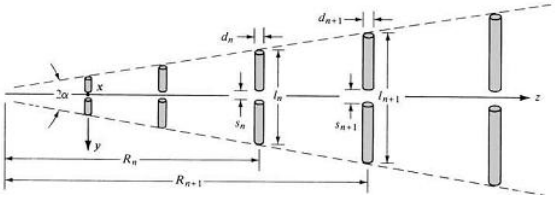
مطابق شکل (۱) در این رابطه p شماره دوقطبی، l_p طول دوقطبی p ام، R_p فاصله دو قطبی p ام از منبع تغذیه که در مجاورت کوچک‌ترین دوقطبی قرار دارد، می‌باشد.

پارامتر دیگری که در طراحی آنتن LPDA به کار می‌رود، σ (ضریب فاصله) نامیده می‌شود. از این ضریب برای به دست آوردن فاصله بین دوقطبی‌های مجاور استفاده می‌شود و مقدار آن مانند ضریب نسبت کوچک‌تر از یک است و از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\sigma=\frac{R_{p+1}-R_p}{2l_{p+1}} \qquad (۲)$$

مانند شکل (۲)، دو خط مستقیمی که در هر سمت از انتهای دوقطبی‌ها می‌گذرند یک زاویه 2α را تشکیل می‌دهند. این زاویه که زاویه راس آنتن LPDA نامیده می‌شود یکی از پارامترهای مهم در طراحی LPDA محسوب می‌شود که یک مشخصه از ساختار مستقل از فرکانس است و از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\alpha=\tan^{-1}\left(\frac{1-\tau}{4\sigma}\right) \qquad (۳)$$



شکل (۲): آنتن دوقطبی متناوب لگاریتمی

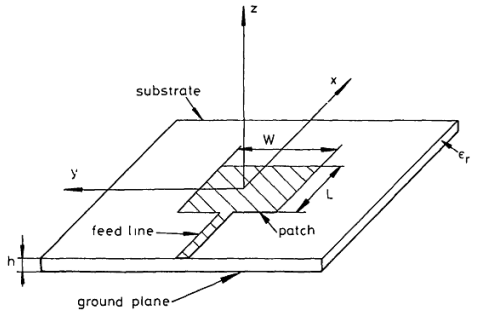
در طراحی پارامتر α باید بسیار دقت کرد زیرا اگر یک مقدار بسیار کوچک یا بسیار بزرگ باشد، پهنای باند امپدانسی آنتن را کاهش می‌دهد. اگر عناصر آنتن بسیار به هم نزدیک یا بیش از حد از هم دور باشند ضریب بازتاب به بیش از ۱۰dB- افزایش می‌یابد، بنابراین، پهنای باند امپدانسی مطلوبی نخواهیم داشت. مقادیر بزرگ‌تر α یا مقادیر کوچک‌تر τ منجر به طراحی باز می‌شود که نیازمند تعداد المان‌های کمتری با فاصله بیشتر نسبت به یکدیگر است. در مقابل مقادیر کوچک‌تر α یا مقادیر بزرگ‌تر τ نیازمند تعداد بیشتر المان‌های نزدیک به هم (فشرده) می‌باشند. بنابراین، برای طراحی با τ بزرگ‌تر المان‌های بیشتری در ناحیه فعال با طول $\lambda/2$ داریم بنابراین، تغییرات امپدانس و مشخصه‌های

1 -Traveling Wave
2- Symetric

دیگر به‌صورت تابعی از فرکانس کمتر است زیرا گذار آهسته‌تری بین المان‌ها وجود دارد و بهره بیشتر می‌شود.

۲-۱-۱- اثر لبه‌ای[1]

به علت محدود بودن طول و عرض پچ آنتن میکرواستریپ، میدان‌ها در لبه‌های پچ دچار اثر لبه‌ای می‌شوند، این اثر در راستای عرض پچ نیز می‌تواند رخ دهد. اثر لبه‌ای بستگی به ابعاد پچ و ارتفاع زیرلایه دارد و تابعی از نسبت L/h و ثابت دی‌الکتریک ε_r است. هرچه نسبت $L/h \gg 1$ باشد اثر لبه‌ای کاهش می‌یابد. این خطوط غیرهمگن ناشی از وجود محیط دولایه، زیرلایه دی‌الکتریک و هوا، می‌باشند. بیشتر این خطوط میدان الکتریکی در زیرلایه و بخشی نیز در هوا منتشر می‌شوند. هرچه نسبت $W/h \gg 1$ و $\varepsilon_r \gg 1$ باشد، خطوط میدان الکتریکی بیشتر در زیرلایه متمرکز می‌شوند. اثر لبه‌ای باعث می‌شود که خط میکرواستریپ از نظر الکتریکی در مقایسه با ابعاد فیزیکی پهن‌تر به نظر برسد. بنابراین یک ثابت دی‌الکتریک موثر برای امواج انتشاری در خط به وجود می‌آید. در شکل (۳) پچ آنتن میکرواستریپ که به عنوان المان پایه برای طراحی آرایه استفاده می‌شود، نشان داده شده است. این المان مانند المان‌های آنتن دوقطبی دارای قطبش خطی است که در نیم فضای $Z > 0$ تشعشع می‌کند.



شکل (۳): المان پچ آنتن متناوب لگاریتمی میکرواستریپی

به طور کلی روابط بین پهنای پچ (W)، ارتفاع زیرلایه (h)، ثابت دی‌الکتریک موثر (ε_{reff}) و ثابت دی‌الکتریک زیرلایه (ε_r) به صورت رابطه (۴) است.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\frac{1}{(1 + 12\frac{h}{w})^{\frac{1}{2}}} \quad W/h > 1 \qquad (۴)$$

به دلیل اثر لبه‌ای طول فیزیکی پچ در هر انتها به اندازه ΔL افزایش خواهد یافت. رابطه تخمین‌یافته و پرکاربردی که برای این افزایش طول پچ میکرواستریپ به کار می‌رود به‌صورت رابطه (۵) است. طول موثر پچ در هر طرف به اندازه ΔL افزایش می‌یابد. از این‌رو طول موثر پچ از رابطه (۶) محاسبه خواهد شد.

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258)}\frac{(\frac{W}{h} + 0.264)}{(\frac{W}{h} + 0.8)} \qquad (۵)$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \qquad (۶)$$

در طراحی آنتن میکرواستریپ انتخاب پهنای پچ (W) بسیار مهم است. اگر این مقدار کوچک باشد باعث کاهش بازدهی آنتن می‌شود و اگر بزرگ انتخاب شود مودهای مرتبه بالاتر انتشار خواهند یافت، لذا باید به شکل بهینه‌ای پهنای پچ انتخاب شود. با مشخص شدن فرکانس تشدید ثابت دی‌الکتریک و ضخامت زیرلایه، طول و پهنای پچ میکرواستریپ از روابط (۷) و (۸) به‌دست می‌آید [۱۳].

$$w = \frac{\lambda_0}{2}\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)^{\frac{-1}{2}} \qquad (۷)$$

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \qquad (۸)$$

۲-۱-۲- پهنای باند آنتن

پهنای باند امپدانس آنتن میکرواستریپ طبق تعریف برابر رنج فرکانسی است که تحت آن کارایی آنتن بر حسب تطبیق امپدانس، رضایت‌بخش قلمداد شود. پهنای باند با ضریب کیفیت رابطه عکس دارد و به‌صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$BW = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \qquad (۹)$$

که در آن، VSWR بر حسب ضریب بازتابش ورودی و به‌صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، Γ میزان سیگنال بازگشتی در نقطه تغذیه آنتن را مشخص می‌کند که بر حسب امپدانس ورودی آنتن Z_{in} و امپدانس مشخصه Z_0 خط تغذیه به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌گردد.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \qquad (۱۱)$$

۲-۱-۳- مدل امپدانسی پچ آنتن میکرواستریپ

برای مدل کردن امپدانس ورودی برای پچ میکرواستریپ از یک مدار ساده تشدید موازی (شامل یک مقاومت، خازن و سلف)

1- Fringing

استفاده می‌شود، که به‌وسیله فرکانس تشدید f_r مقاومت R و ضریب کیفیت Q تشکیل شده است. با فرض مشخص بودن فرکانس تشدید، مقاومت R از مدار موازی R_{rad} ، R_{di} و R_{cu} تشکیل شده است که به ترتیب تلفات تشعشعی، تلفات دی‌الکتریک و تلف مس نامیده می‌شوند. این تلفات در اثر انتشار امواج سطحی به‌وجود می‌آیند که با استفاده از رابطه‌های (۱۹- ۱۲) محاسبه می‌شوند.

$$R_{rad} = \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)^{1/2} \times \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\alpha \sin^2\left(\eta\frac{W}{2}\right)\cos^2\left(\xi\frac{L}{2}\right)\left\{\tan^2\alpha + \frac{\left(k\frac{L}{2}\right)^2+\left(\xi\frac{L}{2}\right)-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2}{\left[\left(\xi\frac{L}{2}\right)^2-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]^2}\left(\xi\frac{L}{2}\right)^2\right\} d\beta d\alpha\right]^{-1} \quad (۱۲)$$

و پارامترهای ξ، η ،k ،R_{di} و R_{cu} به‌ترتیب بر اساس رابطه‌های (۱۵-۱۳) بیان می‌شوند.

$$\xi = k\sin\alpha\sin\beta, \eta = k\cos\alpha, k = 2\pi/\lambda \quad (۱۳)$$

$$R_{di} = \frac{h}{\pi\varepsilon_{0}\varepsilon_r f_r \tan\delta LW} \quad (۱۴)$$

$$R_{cu} = \frac{4Lh^2(\mu_{0f_r})^{3/2}}{W(\pi\rho_{cu})^{1/2}} F_{SR} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۶)، F_{SR} میزان زبری سطح است. ظرفیت خازن و ضریب کیفیت نیز از رابطه‌های (۱۷-۱۶) محاسبه می‌شود.

$$c = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r WL}{2h} \quad (۱۶)$$

$$Q_{rad} = \omega_r R_{rad} c \quad (۱۷)$$

با توجه به رابطه‌های بالا، مقاومت کل و امپدانس ورودی از رابطه‌های (۱۹-۱۸) به‌دست می‌آیند [۱۴].

$$R^{-1} = {R_{rad}}^{-1} + {R_{di}}^{-1} + {R_{cu}}^{-1} \quad (۱۸)$$

$$Z_{in} = \frac{R}{1 + jQ\left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}\right)} \quad (۱۹)$$

۲-۲- روش‌های تغذیه آنتن‌های میکرواستریپ

آنتن میکرواستریپ می‌تواند به‌طور مستقیم با استفاده از خط میکرواستریپ، پروب و یا به‌صورت تزویج الکترومغناطیس مانند روش Aperture coupled تغذیه شود. روش تغذیه بر روی امپدانس ورودی و مشخصه‌های الگوی تشعشعی آنتن تاثیرگذار می‌باشد بنابراین از پارامترهای بسیار مهم در طراحی آنتن است.

تغذیه با استفاده از پروب دارای مزایایی از جمله سادگی طراحی و همچنین امکان تنظیم نقطه تغذیه برای داشتن تطبیق امپدانس مناسب می‌باشد. اما دارای معایبی از جمله نیازمند بودن به تعداد زیادی اتصالات لحیم برای تغذیه از طریق کواکسیال می‌باشد که ساخت آن را مشکل می‌سازد. علاوه بر این، در آنتن‌های میکرواستریپ، برای داشتن پهنای باند بیشتر نیاز به استفاده از لایه دی‌الکتریک ضخیم است. بنابراین، باید از یک پروب بلندتر استفاده شود که این خود نیز باعث افزایش اندوکتانس خط می‌شود و تشعشع نادرست از خط را افزایش می‌دهد.

تغذیه با استفاده از خط انتقال میکرواستریپ یک روش مناسب برای تغذیه آنتن‌های میکرواستریپ می‌باشد چون در این روش پچ و خط تغذیه می‌توانند بر روی یک لایه دی‌الکتریک مشابه قرار بگیرند و به‌طور همزمان ساخته شوند. البته، این شیوه تغذیه نیز محدودیت‌های خاص خود را دارد. تغذیه آنتن در برخی از روش‌ها دارای محدودیت‌هایی در تطبیق امپدانس است به‌دلیل این‌که امپدانس ورودی پچ در لبه بسیار بیشتر از امپدانس خط تغذیه بوده بنابراین، یک مدار تطبیق امپدانس بین لبه پچ و خط تغذیه برای ایجاد تطبیق امپدانس مناسب مورد نیاز است. مدارات تطبیق نیز تشعشع نادرست از خط را به دنبال دارند. هم‌چنین، ساخت آرایه آنتن به‌دلیل نداشتن فضای کافی در روی لایه دی‌الکتریک با مشکل مواجه خواهد شد و زمانی که عرض پچ قابل مقایسه با عرض خط تغذیه باشد، آنگاه در فرکانس امواج میلی‌متری خط میکرواستریپ باعث کاهش تشعشع از پچ می‌شود[۱۵].

۲-۲-۱- تغذیه Inset

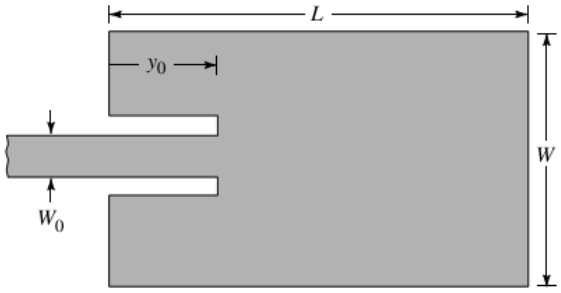
مقاومت ورودی تشدید آنتن میکرواستریپ را می‌توان با استفاده از تغذیه Inset برای به‌دست آوردن بیشترین توان انتقالی تغییر داد. تغذیه Inset به‌طور موثر برای تطبیق امپدانس بین پچ میکرواستریپ و خط انتقال به‌کار می‌رود. این روش تغذیه می‌تواند مقاومت ورودی تشدید را مطابق شکل (۴) به‌وسیله بریدگی[1] فیزیکی تغییر دهد. این بریدگی معادل با یک اتصال خازنی است. بریدگی فیزیکی و مطابق با آن اتصال خازنی، تاثیر اندکی بر روی فرکانس تشدید می‌گذارند، که این تغییرات در حدود ۱٪ است. بیشترین مقدار مقاومت ورودی تشدید در لبه‌های پچ ($y_0 = 0$) جایی که ولتاژ بیشترین و جریان کمترین

1- Notch

مقدار خود را دارد رخ می‌دهد [۱۶]. کمترین مقاومت تشدید در مرکز پچ ($y_0 = L/2$) رخ می‌دهد. هنگامی که نقطه تغذیه Inset از لبه پچ به طرف مرکز پچ حرکت می‌کند امپدانس ورودی تشدید به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد و در مرکز پچ به صفر می‌رسد.

امپدانس مشخصه تغذیه خط میکرواستریپ نیز از رابطه (۲۰) به‌دست می‌آید.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \ln\left[\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right] & \frac{w}{h} \le 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}}\left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right)\right] & \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (۲۰)$$



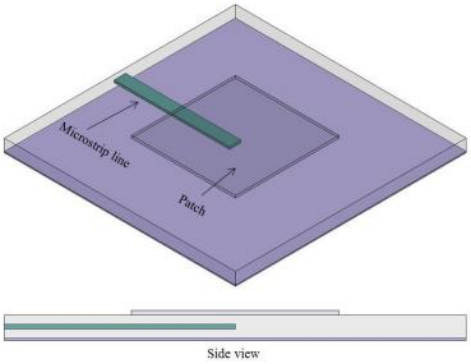
شکل (۴): المان پچ مربعی آنتن میکرواستریپ با تغذیه Inset

۲-۲-۲- تغذیه Proximity

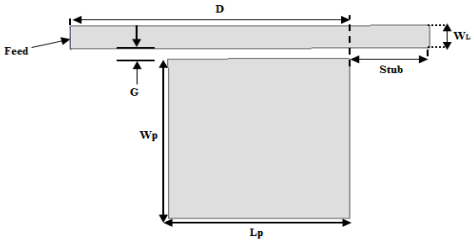
در این روش تغذیه، از دو زیر لایه دی‌الکتریک استفاده می‌شود، شکل (۵)، که خط میکرواستریپ بر روی لایه پایینی و پچ روی لایه بالایی قرار می‌گیرد. مزیتی که این روش نسبت به تغذیه با خط انتقال دارد این است که پچ و خط انتقال هر دو بر روی یک لایه قرار نمی‌گیرند و مشکل ناشی از اتصالات T شکل و لحیم کاری وجود ندارد که در بعضی از موارد اطمینان مکانیکی بهتری دارد.

اگرچه ساخت چنین آنتنی به‌دلیل استفاده از دو زیرلایه مشکل است، اما این روش پهنای باند بیشتری (نزدیک به ۱۳٪) نسبت به روش‌های دیگر دارد و تشعشع کاذب[۲] کمتری در مقایسه با روش‌های قبلی دارد. در این روش خط میکرواستریپی که به شکل انتهای مدار باز در زیر پچ قرار می‌گیرد باعث ایجاد تزویج میدان‌ها می‌شود. این میدان‌های تزویج‌شده پچ‌های روی زیرلایه‌ی بالایی را تحریک می‌کنند و هرکدام در باند فرکانسی خود شروع به تشعشع می‌کنند. تطبیق خط با پچ‌های تشعشعی بستگی به موقعیت قرارگیری پچ‌ها نسبت به خط انتقال دارد. یک خط تغذیه با انتهای مدار باز در شکل (۶) نشان داده شده است[۱۷].

با توجه به مطالب فوق در این مقاله از بین روش‌های تشریح‌شده، روش تغذیه آنتن میکرواستریپی متناوب لگاریتمی با روش‌های تغذیه Inset و Proximity طراحی و بررسی خواهد شد و در ادامه مشخصات آنتن مورد نظر و فرمول‌های مورد استفاده تشریح خواهند شد.



شکل (۵): آنتن میکرواستریپ با تغذیه Proximity



شکل (۶): المان پچ مربعی آنتن میکرواستریپ با تغذیه Proximity

۳- مشخصه‌های عنصر پچ آنتن میکرواستریپ

برای طراحی آنتن میکرواستریپ ابتدا فرکانس تشدید برای تشعشع عنصر پچ تعیین شده و سپس با انتخاب جنس زیرلایه، ضخامت و ثابت دی‌الکتریک آن معین می‌شود. در طراحی انجام‌شده در این مقاله از یک ماده دی‌الکتریک از جنس FR4 با ضخامت ۱/۶ mm و ثابت دی‌الکتریک ε_r =۴/۴ انتخاب شده است. فرکانسی تشدید عنصر در این مقاله ۳/۰۳ GHz در نظر گرفته شده است. امپدانس مشخصه خط تغذیه نیز ۵۰ Ω فرض شده است. همچنین لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار ANSOFT HFSS انجام شده است.

با استفاده از روابطی که برای طراحی آنتن میکرواستریپ بیان شد، طول پچ (L)، عرض پچ (W)، ثابت دی‌الکتریک موثر (ε_{reff}) و همچنین عرض خط تغذیه (۳ mm) به‌دست می‌آید و

2- Spuris

این مقادیر برای عنصرهای بعدی بر حسب پارامتر τ مقیاس می‌شوند. در طراحی آرایه LPMA نیز از رابطه (۲۱) برای به‌دست آوردن فرکانس‌های بعدی آرایه استفاده شده است [۷].

$$f_n = \frac{f_1}{\tau^{n-1}} \quad n = 1,2,3,\ldots \tag{۲۱}$$

که در آن، f_1 کوچک‌ترین فرکانس آرایه و n تعداد عنصرهای آرایه است. در آرایه LPMA هر عنصر نسبت به ابعاد عنصر مجاور خود بر حسب فاکتوری که در طول آرایه ثابت باقی می‌ماند مقیاس می‌شود. درصورتی که L_n نشان‌دهنده طول عنصر n ام و L_{n+1} طول متناظر با عنصر n+1 ام باشد برای آرایه LPMA با طول پچ (L)، پهنای (W) و طول شکاف (y) بر حسب ضریب نسبت τ به‌صورت رابطه (۲۲) خواهد شد.

$$\tau = \frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{W_{n+1}}{W_n} = \frac{y_{n+1}}{y_n} \tag{۲۲}$$

از آنجایی که طول موج وابسته به فرکانس است و فرکانس‌های عنصرهای آرایه متناوب لگاریتمی هستند، بنابراین به نظر می‌رسد که فاصله بین عنصرها نیز متناوب لگاریتمی خواهد بود اما در عمل، تزویج متقابل عنصرهای آرایه بر روی یکدیگر، اثر اتصالات T شکل و تشعشعات ناخواسته موجب عدم تطبیق امپدانس بین عنصرها و خط تغذیه می‌شود بنابراین با فواصل متناوب لگاریتمی بین عنصرها پهنای باند امپدانسی مناسبی نخواهیم داشت از این رو برای دست‌یابی به فاصله مناسب بین عنصرها از روش امپدانسی استفاده شده است تا کمترین اثر تزویج متقابل بین عنصرها وجود داشته باشد و تطبیق امپدانسی مناسب بین عنصرها ایجاد شود، همچنین در این روش فاصله بین عنصرها در مقایسه با فواصل متناوب لگاریتمی کاهش می‌یابد

۳-۱- اصول کار آنتن دوقطبی متناوب لگاریتمی

پهنای باند آنتن‌ها معمولا توسط فرکانس قطع عنصرهای کوچک‌تر و بزرگ‌تر در ساختار تعیین می‌شود. بلندترین عنصر دارای طول $\lambda/2$ در فرکانس قطع پایین است و کوچک‌ترین عنصر نیز دارای طول $\lambda/2$ در فرکانس قطع بالا است معمولا برای تامین مشخصه‌های فرکانسی مناسب، در فرکانس‌های بالا عنصر بیشتری به آنتن اضافه می‌کنند [۳].

آنتن متناوب لگاریتمی از عنصرهای بسیار زیادی تشکیل شده است و بسته به فرکانس کاری آنتن به سه ناحیه اصلی یعنی ناحیه انتقال، ناحیه فعال و ناحیه تحریک‌نشده تقسیم می‌شوند. ناحیه انتقال از عنصرهای کوچک‌تر، پیش از ناحیه فعال تشکیل شده است. این عنصرها به شکل یک خط انتقال عمل می‌کنند و به‌عنوان عنصرهای هدایت‌گر[1] شناخته می‌شوند. لذا این ناحیه دارای کوتاه‌ترین عنصرها می‌باشد و این عنصرها کمترین فاصله را در بین عناصر یک آرایه دارند [۲].

علاوه بر این، این عنصرها در فاصله مجاور با نقطه تغذیه آرایه قرار دارند در این ناحیه عنصرهای مجاور دارای تقابل فاز هستند و انرژی بسیار کمی توسط آن‌ها انتشار می‌یابد بنابراین دارای جریان کمی هستند. دامنه ولتاژ در ناحیه انتقال نسبت به دامنه ولتاژ در ورودی تغییرات کمی دارد و بسیار شبیه به یک خط انتقال تطبیق یافته می‌باشد [۷].

ناحیه فعال نیز از عنصرهایی تشکیل شده است که دارای طولی نزدیک به $\lambda/2$ در فرکانس کاری خود می‌باشند. نقش این عنصرهای فعال گذار از عنصرهای بلندتر به سمت عنصرهای کوتاه‌تر با افزایش فرکانس است. هدف اصلی طراحی یک آنتن به‌دست آوردن مشخصه‌های مناسب برای آن است. در طراحی آنتن LPDA سه پارامتر مهم برای طراحی α، τ و σ هستند که در صورت مشخص بودن دو پارامتر، پارامتر سوم به‌دست می‌آید.

۳-۲- شبیه‌سازی و ساخت آنتن با روش تغذیه Inset

برای آرایه عنصرهای مستطیلی از روش Inset برای تطبیق امپدانس بین پچ و خط تغذیه استفاده شده است که در آن با ایجاد شکافی به طول و عرض مشخص طبق روابط طراحی پچ میکرواستریپ فواصل مشخص می‌شود. عرض این شکاف در این مقاله در طول کلی آرایه ثابت و برابر ۱/۲ mm در نظر گرفته شده است اما طول شکاف برای عنصرهای بعدی بر اساس ضریب نسبت τ = ۰/۹۵ تعیین می‌شود از این رو طول خط شاخه‌ای در این حالت تاثیر چندانی بر روی عملکرد آرایه نداشته و با تعیین مقدار مناسب برای شاخه اول طول شاخه‌های بعدی با استفاده از فاکتور τ به‌دست می‌آیند. هرچه تعداد عنصرهای آرایه بیشتر شود طول الکتریکی خط تغذیه و تطبیق امپدانس ورودی بین عنصرهای پچ و خط تغذیه کاهش می‌یابد از این رو تنظیم عنصرها برای تشدید در فرکانس معین شده سخت‌تر می‌شود. آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Inset به صورت دید از بالا و دید سه‌بعدی در شکل (۷) نشان داده شده است. پهنای باند امپدانسی برای این آرایه در حدود ٪۲۷/۴ است و اندازه این آنتن ۱۳۵ ×۹۰mm می‌باشد که ابعاد و فواصل اجزاء آن در جدول (۱) آورده شده است. عنصرهای آرایه LPMA در این روش به سه ناحیه مقاومتی (فعال)، خازنی (هدایتی) و القایی

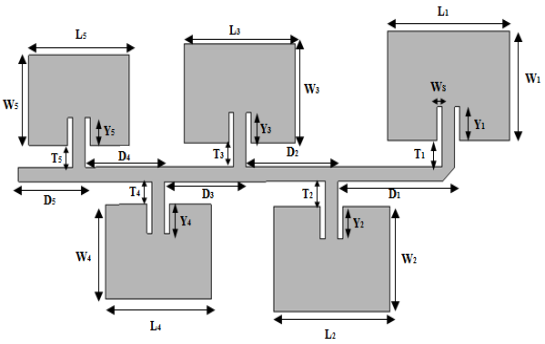
2 -Reflector

(بازگشتی) بسته به توزیع شکل جریان در عنصرها تقسیم بندی می‌شوند. سامانه تغذیه‌ای Inset که برای این آرایه استفاده می‌شود توان را به‌صورت مستقیم بین تک‌تک عنصرها توزیع می‌کند. بنابراین هرکدام از این عنصرها به صورت مستقیم تحریک می‌شوند.

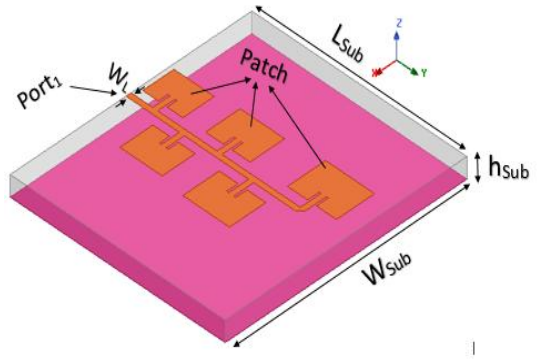
جدول (۱): ابعاد آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Inset

Delt fm	Freq GHz	W mm	L mm	T mm	Y mm	Dm mm
f1	۳/۰۳	۲۲/۸۳	۲۹/۳۲	۵/۵	۷	۲۸
f2	۳/۱۸	۲۱/۷۴	۲۷/۹۲	۵/۲۳	۶/۶۶	۲۲
f3	۳/۳۴	۲۰/۷	۲۶/۵۹	۴/۹۹	۶/۳۵	۱۹/۶
f4	۳/۵	۱۹/۷۲	۲۵/۳۲	۴/۷۵	۶/۰۵	۱۹
f5	۳/۶۸	۱۸/۷۸	۲۴/۱۲	۴/۵۲	۵/۷۵	۱۶/۲

توزیع جریان آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Inset و امپدانس ورودی آنتن در شکل (۸) آورده شده است. جریان توزیع‌شده در عنصرهای پچ دارای قسمت‌های حقیقی و موهومی است. قسمت حقیقی جریان در مولفه‌های مقاومتی امپدانس عنصری که در ناحیه فعال قرار دارد جریان یافته و این عنصر در باند فرکانسی خود شروع به تشعشع می‌کند اما مولفه‌های موهومی جریان در عنصرهای غیرتشعشعی انتشار می‌یابند. این عنصرها بسته به نحوه توزیع جریان در آن‌ها به عنوان هدایت‌کننده یا انعکاس‌دهنده عمل می‌کنند. در ادامه با توزیع جریان و افزایش فرکانس عنصرهای بعدی که دارای ابعاد کوچک‌تری هستند به ترتیب در ناحیه فعال قرار می‌گیرند و تشعشع می‌کنند. از این رو ناحیه فعال با افزایش فرکانس از عنصرهای بزرگ‌تر به سمت عنصرهای کوچک‌تر جابجا می‌شود. مولفه‌های جریان خازنی در عنصرهای کوچک‌تر بر مولفه‌های هدایتی غالب می‌شوند از این رو این عنصرهای کوچک‌تر توان کمتری از خط تغذیه دریافت کرده و به عنوان هدایت‌کننده‌های پارازیتی[1] عمل می‌کنند. همچنین در عنصرهای بزرگ‌تر مولفه‌های جریان القایی غالب شده و به عنوان بازتابنده‌های پارازیتی[2] عمل می‌کنند.

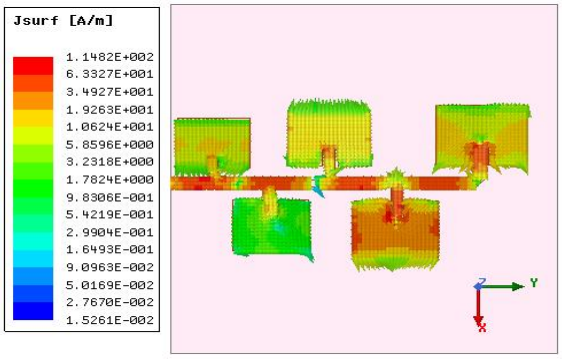


(الف)

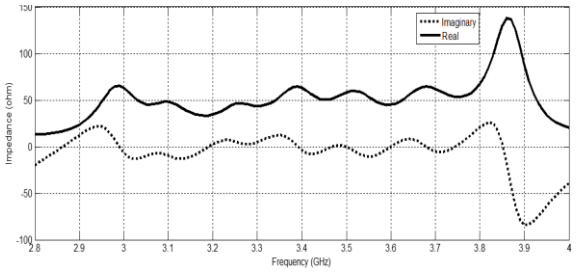


(ب)

شکل (۷): آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Inset: (الف) دید از بالا، (ب) دید سه بعدی



(الف)



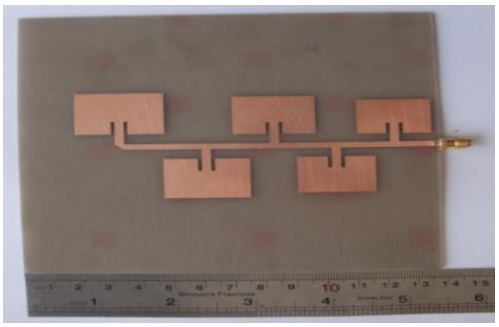
(ب)

شکل (۸): آرایه LPMA ۵ عنصری پچ مستطیلی با تغذیه‌ی Inset: (آ) توزیع جریان در فرکانس مرکزی، (ب) نمودار امپدانس ورودی

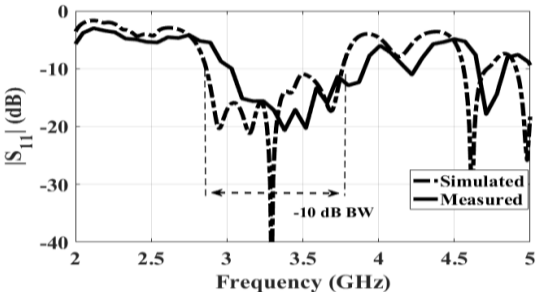
در شکل (۹) نمونه ساخته‌شده و آزمایش‌شده در آزمایشگاه آورده شده است. همچنین در این نمودار، نمودار تلفات بازگشتی

1-Parasitic Director
2- Parasitic Reflector

شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده، برای آرایه‌ی LPMA با روش تغذیه Inset نمایش داده شده است. در شکل (۱۰) الگوی تشعشی سه‌بعدی آنتن در سه فرکانس ابتدایی، میانی و انتهایی باند فرکانسی آورده شده است. همچنین در شکل (۱۱) نیز الگوهای تشعشی آنتن رسم گردیده‌اند به‌گونه‌ای که الگوهای سمت راست تشعشع آنتن در صفحه E-plane (صفحه $\varphi = 0$) و الگوهای سمت چپ H-plane (صفحه $\varphi = 90$) را نشان می‌دهند. باید توجه داشت که در اشکال ذکرشده، خطوط توپر co-polar و خطوط تیره cross polar را نمایش می‌دهند. در شکل (۱۲) ابعاد قسمت‌های مختلف آرایه‌ی LPMA نشان داده شده است.

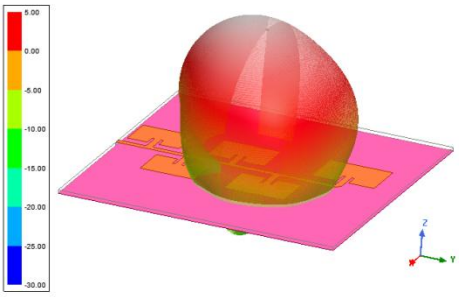


(الف)

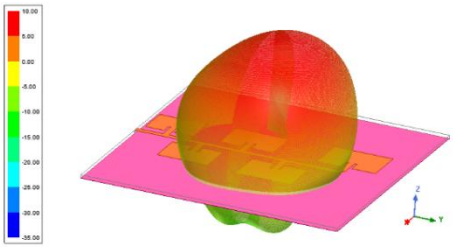


(ب)

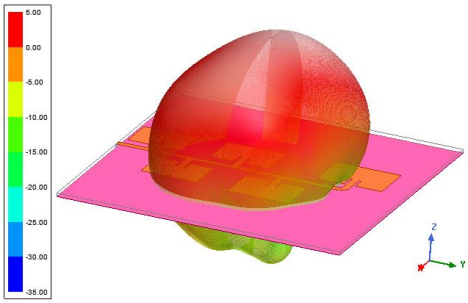
شکل (۹): آرایه LPMA ۵ عنصری پچ مستطیلی با تغذیه Inset: (الف) نمونه ساخته‌شده، (ب) تلفات برگشتی



(الف)

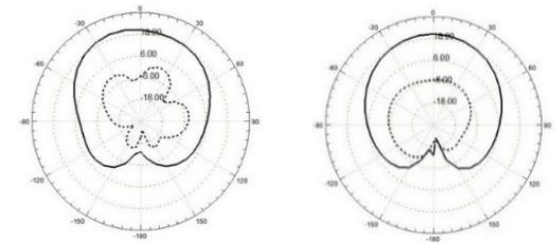


(ب)

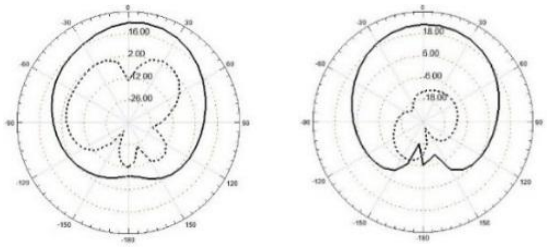


(ج)

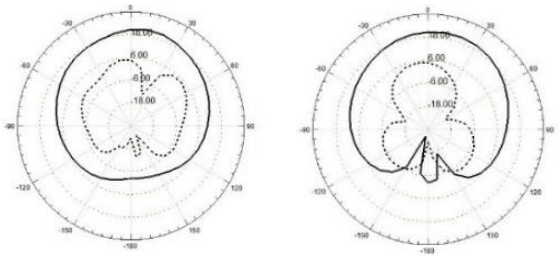
شکل(۱۰): الگوی تشعشی سه بعدی آنتن در: (الف) ابتدای باند، (ب) فرکانس مرکزی و (ج) انتهای باند



(الف)

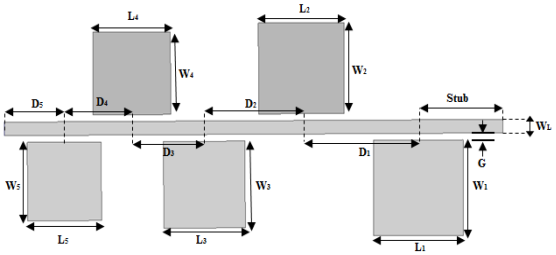


(ب)

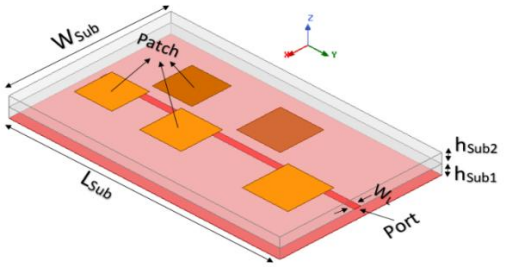


(ج)

شکل (۱۱): الگوهای تشعشی آرایه LPMA با ۵ عنصری با تغذیه Inset در: (الف) ابتدای باند، (ب) فرکانس مرکزی و (ج) انتهای باند



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Proximity: (لف) دید از بالا، (ب) دید سه بعدی

۳-۳- شبیه‌سازی و ساخت آنتن با روش تغذیه Proximity

آرایه متناوب لگاریتمی با ۵ عنصر با روش تغذیه Proximity در شکل (۱۴) نشان داده شده است. ابعاد این آنتن ۱۲۷×۶۰mm می‌باشد که ابعاد و فواصل اجزاء آن در جدول (۲) آورده شده است. هرچه تعداد عنصرها بیشتر می‌شود بهره و پهنای باند افزایش می‌یابد اما تطبیق امپدانس بین خط و عنصرها سخت‌تر و ابعاد آنتن نیز بزرگ‌تر می‌شود برای این آنتن نیز τ = ۰/۹۵ انتخاب شده است. باند فرکانسی که این آنتن LPMA پوشش می‌دهد ۲/۸۵-۳/۷۵ GHz است که ٪۲۷/۲۷ پهنای باند دارد. در این آنتن از پچ مربعی استفاده شده است. پچ مربعی $(w = L)$ برای جلوگیری از انتشار مدهای مرتبه بالاتر (باعث به هم ریختگی الگوی تشعشعی و قطبش می‌شود) و همچنین بازدهی تشعشعی بالاتر (ضریب کیفیت پایین‌تر) کارایی بهتری دارد. اولین مود مرتبه بالاتر در پچ مربعی در حدود دو برابر فرکانس تشدید مود پایه انتشار می‌یابد. این فرکانس با یک پچ مستطیلی کاهش می‌یابد. یک پچ تشدیدکننده مستطیلی بازدهی تشعشعی کمتری نیز دارد زیرا ضریب کیفیت تشعشعی Q_{rad} نسبت W/L را کاهش می‌دهد[۱۴].

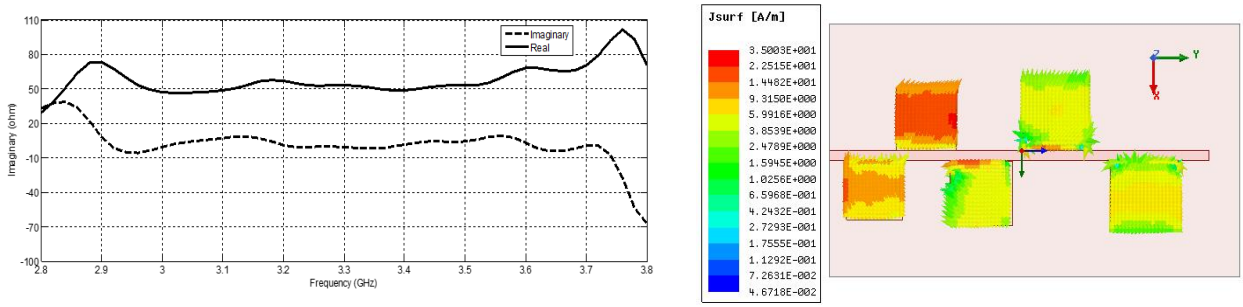
برای تنظیم فاصله بین عنصرها از روش تطبیق امپدانس ورودی بین عنصرها و خط تغذیه استفاده می‌شود طوری که امپدانس ورودی از دید عنصر mام در فرکانس fm برابر ۵۰Ω باشد در حالی که این امپدانس از دید ورودی تغذیه و عنصر (m+1)ام مقدار بالایی باشد. در این حالت از دید عنصر m ام یک خط بدون بار دیده می‌شود.

جدول (۲): ابعاد آرایه LPMA با ۵ عنصر پچ مربعی با تغذیه Proximity

Delt fm	Freq GHz	W mm	L mm	Dm mm
f1	۳/۰۳	۸/۲۱	۸/۲۱	۲۷/۵
f2	۳/۱۸	۲۰/۷۱	۲۰/۷۱	۲۳
f3	۳/۳۴	۱۹/۶۷	۱۹/۶۷	۱۷
f4	۳/۵	۱۸/۶۹	۱۸/۶۹	۱۶
f5	۳/۶۸	۱۷/۷۵	۱۷/۷۵	۱۴

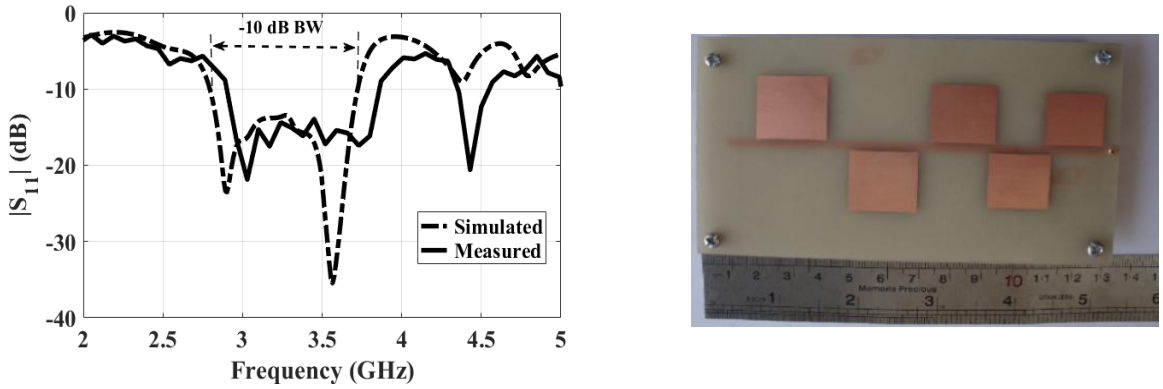
در آنتن‌های LPMA با تغذیه مستقیم (Inset) برای جذب انرژی ترمینال خروجی و جلوگیری از بازتاب موج در انتهای خط تغذیه یک بار ختم‌شده قرار می‌دهند این کار باعث تطبیق امپدانس و بهبود الگوی تشعشعی بخصوص در لبه‌های باند می‌شود اما این بارهای جذبی به طور قابل ملاحظه‌ای بازدهی آنتن را در پهنای باند مشخص به ویژه در لبه‌های باند تا ۱۰٪ یا بیشتر کاهش می‌دهد از این رو در روش تغذیه Proximity یک استاب جبران‌ساز بدون تلف[1] برای افزایش پهنای باند به کار گرفته شده است. این استاب به جای یک بار تطبیق‌یافته یا مدار باز استفاده می‌شود. شکاف G بین پچ و خط تغذیه میکرواستریپ بازدهی انتقال توان خط تغذیه را مشخص می‌کند. مقدار مناسب برای آرایه Proximity این مقاله G=۰/۱mm به‌دست آمد. در صورت انتخاب مقدار صفر برای G، موج رونده وجود نخواهد داشت و مانند یک تشدیدکننده چندگانه[2] عمل می‌کند و اگر مقدار G بیشتر باشد، عنصرهایی که در فرکانس‌های پایین‌تر تشدید کرده و در انتهای خط قرار دارند باقیمانده انرژی را که به درستی بین پچ‌های آرایه تزویج نشده است را دریافت می‌کنند، بنابراین تطبیق امپدانس کمتری در باند پایین فرکانسی خواهیم داشت. در واقع هرچه فاصله شکاف بیشتر باشد میزان عدم تطبیق و بازگشت انرژی بیشتر است. در شکل (۱۳) توزیع جریان آرایه LPMA دارای ۵ عنصر پچ مستطیلی با تغذیه Proximity و امپدانس ورودی آنتن به تصویر کشیده شده است. در شکل (۱۴) نمونه ساخته‌شده و تست‌شده در آزمایشگاه آورده شده است. همچنین در این نمودار، نمودار تلفات بازگشتی شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده، برای آرایه LPMA با روش‌های تغذیه Proximity نشان داده شده است.

1- Loss- Free Compensating Stub
2- Multi Resonator



(ب) (الف)

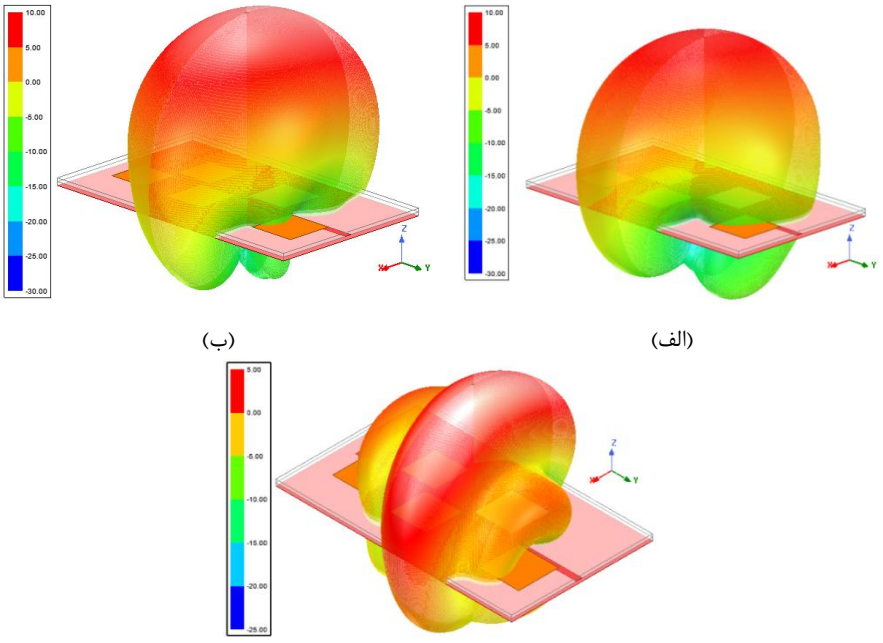
شکل (۱۳): آرایه LPMA ۵ عنصری پچ مستطیلی با تغذیه Proximity: (الف) توزیع جریان در فرکانس مرکزی، (ب) نمودار امپدانس ورودی



(ب) (الف)

شکل (۱۴): آرایه LPMA ۵ عنصری پچ مستطیلی با تغذیه Proximity: (الف) نمونه ساخته‌شده، (ب) تلفات برگشتی

نمودارهای (۱۵) و (۱۶) به ترتیب، الگوی‌های تشعشعی آرایه LPMA مستطیلی با تغذیه Proximity را در سه فرکانس ابتدایی، میانی و انتهایی باند فرکانسی به‌صورت سه‌بعدی و به‌صورت دوبعدی قطبی نشان می‌دهند.



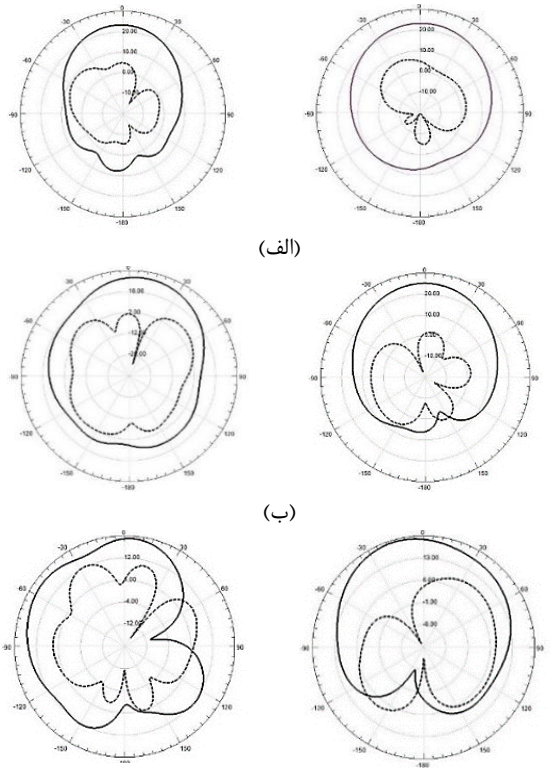
(ب) (الف)

(ج)

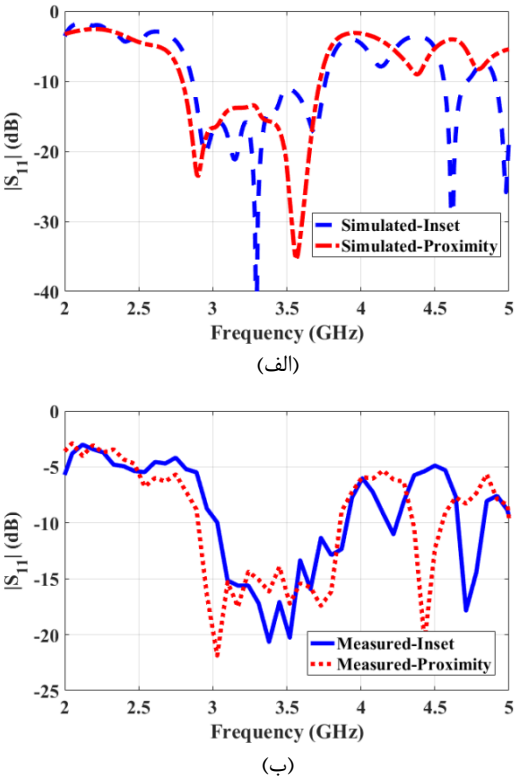
شکل(۱۵): الگوی تشعشی سه‌بعدی آنتن در: (الف) ابتدای باند، (ب) فرکانس مرکزی و (ج) انتهای باند

در شکل (۱۶) نمودارهای سمت راست و چپ به ترتیب، الگوی تشعشعی را در صفحات $\varphi = 0$ و $\varphi = ۹۰$ نمایش می‌دهند. همچنین در اشکال فوق، خطوط توپر co-polar و خطوط تیره cross polar را نمایش می‌دهند. با بررسی نمودارهای الگوی تشعشعی آرایه LPMA برای ۲ تا ۵ عنصر در فرکانس‌های f1 تا f5 مشخص شد که در همه نمودارها مشخصه‌های الگوی تشعشعی به‌صورت متناوب لگاریتمی تکرار می‌شوند این ویژگی تنها در آنتن‌های متناوب و مستقل از فرکانس رخ می‌دهد.

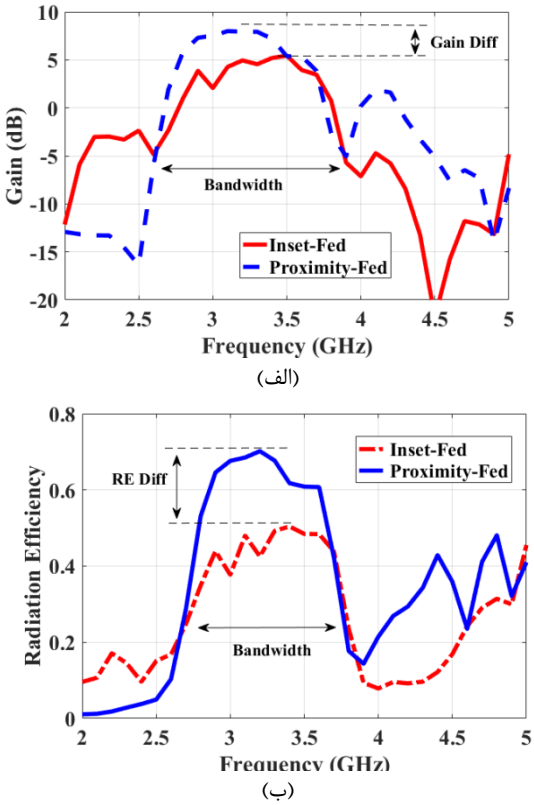
در شکل‌های (۱۸-۱۷)، با انجام مقایسه‌ای بین آرایه‌های پیشنهادشده مشخص می‌شود که پهنای باند امپدانسی برای آنتن میکرواستریپ با تغذیه Proximity در مقایسه با عنصری که به‌طور مستقیم و با روش تغذیه Inset به خط تغذیه متصل شد، دارای پهنای باند و بهره بیشتری می‌باشد زیرا اثر تشعشعات ناخواسته و همین‌طور تلفات ناشی از خط و اتصالات لحیم کاهش می‌یابد و همچنین با به کار گیری استاب جبران‌ساز بازدهی و بهره آنتن افزایش یافت. با استفاده از آرایه متناوب لگاریتمی پهنای باند امپدانسی آنتن میکرواستریپ از ۲/۷٪ برای تک عنصر به ۲۷/۴٪ برای ۵ عنصر افزایش یافت و بهره آنتن میکرواستریپ که برای یک تک عنصر در حدود ۲dB بود با استفاده از آرایه با ۵ عنصر می‌توان به ۸ dB افزایش داد. بنابراین، شیوه آرایه متناوب لگاریتمی یک روش موثر و ساده برای افزایش پهنای باند و بهره آنتن‌های مختلف می‌باشد.



شکل (۱۶): الگوهای تشعشعی آرایه LPMA با ۵ عنصری با تغذیه Proximity در: (الف) ابتدای باند، (ب) فرکانس مرکزی و (ج) انتهای باند



شکل (۱۷): مقایسه میان تلفات برگشتی آنتن‌ها: (الف) شبیه‌سازی، (ب) اندازه‌گیری



شکل (۱۸): مقایسه میان مشخصات آنتن‌ها: (لف) بهره، (ب) راندمان تشعشعی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آنتن‌های پچ میکرواستریپ برای افزایش پهنای باند آنتن آرایه متناوب لگاریتمی انتخاب شد که از ویژگی‌های برجسته این روش می‌توان به سادگی طراحی و کارایی موثر این روش و همین‌طور کاهش اندکی در ابعاد عنصرها نسبت به ابعاد واقعیشان برای افزایش پهنای باند و بهره آنتن‌های میکرواستریپ دانست. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند که با ایجاد تغذیه Inset بین پچ و خط تغذیه مشکل عدم تطبیق برطرف می‌شود. همچنین با استفاده از روش تطبیق امپدانسی از ترمینال ورودی (نقطه تغذیه) فواصل بهینه بین عنصرها به‌منظور کمترین اثر تزویج بر روی یکدیگر داشته باشند، مشخص شدند. در ادامه با مطالعه آرایه‌ی طراحی‌شده با تغذیه Proximity مشخص شد که به دلیل تزویج میدان‌ها بین خط تغذیه و عنصرها، بهره و پهنای باند بیشتری نسبت به تغذیه Inset به‌دست می‌آید زیرا تلفات ناشی از اتصالات T و لحیم و تشعشعات ناخواسته حذف شده است.

۵- مراجع

[1] X. Liu et al., "A Method of Designing a Dual-Band Sector Ring Microstrip Antenna and its Application," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 11 2016.

[2] B. Lethacumary, Sreedevi K. Menon, Priya Francis, C. A. Aanandan, K. vasudevan, and P. Mohanan, "Wideband microstrip antenna using Hook-shaped feed" Microwave and Optical Technology Letters, vol. 44, no. 2, Jan. 2015.

[3] B. Babakhani, S. Satish, and N. R. Labadie, "A Frequency Agile Microstrip Patch Phased Array Antenna with Polarization Reconfiguration," submitted to IEEE Transactions Antennas and Propagation, 2016.

[4] E. Abdo-Sánchez et al., "A novel planar log-periodic array based on the wideband complementary strip-slot element," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 11, pp. 5572-5580, 2014.

[5] A. Sharifi and J. Khalilpour, "Patch Antenna Gain Enhancement with Meta-Material Spilt Ring Resonator Radome," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 3, pp. 39-44, 2015.

[6] S. A. Mirmanafi and H. Khodabakhshi, "Design and Construction of Frequency Reconfigurable Micro-Strip UWB Antenna with Triple Controllable Notched Bands," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 3, pp. 31-37, 2015.

[7] J. J. Luther, S. Ebadi, and X. Gong, "A Low-Cost 2 2 Planar Array of Three-Element Microstrip Electrically Steerable Parasitic Array Radiator (ESPAR) Subcells," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 62, no.10, pp. 2325-2336, 2014.

[8] A. T. Almutawa and G. Mumcu, "Small artificial magnetic conductor backed log-periodic microstrip patch antenna," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 7, no. 14, pp. 1137-1144, 2013.

[9] H. Pues, J. Bogaers, R. Pieck, and A. van de Capelle, "Wideband quasi log-periodic microstrip antennas," Proc. Inst. Elect. Eng. Microw., Antennas Propag., vol. 128, no. 3, pp. 159–163, dec. 2007.

[10] X. Li et al., "Study on phase velocity tapered microstrip angular log-periodic meander line travelling wave tube," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 10, no. 8, pp. 902-907, 2016.

[11] D.-F. Guan et al., "Compact Microstrip Patch Array Antenna With Parasitically Coupled Feed," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 64, no. 6, pp. 2531-2534, 2016.

[12] H. Pues, J. Bogaers, R. Pieck, and A. van de Capelle, "Wideband quasi log-periodic microstrip antennas," Proc. Inst. Elect. Eng. Microw., Antennas Propag., vol. 128, no. 3, pp. 159–163, dec. 2007.

[13] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 619-637, 2005.

[14] H. Pues, J. Bogaers, R. Pieck, and A. van de Capelle, "Wideband quasi log-periodic microstrip antennas," Proc. Inst. Elect. Eng. Microw., Antennas Propag., vol. 128, no. 3, pp. 159–163, dec. 2007.

[15] B. Lethacumary, S. K. Menon, P. Francis, C. A. Aanandan, K. vasudevan, and P. Mohanan "Wideband microstrip antenna using Hook-shaped feed," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 44, no. 2, Jan. 2005.

[16] C. L. Mak, K. F. Lee, and K. M. Luk, "Broadband patch Antenna with a T-shaped Probe," IEEE proc Microwave antenna propag, vol. 147, no. 2, Apr. 2010.

[17] P. S. Hall, "New Wideband Microstrip Antenna Using Log-Periodic Technique," Electronics Letters, vol. 16, no. 4, pp. 127-128, Feb. 1980.

Journal of Applied Electromagnetics
Vol. 4, No. 3, 2016 (Serial No. 12)

Design and Fabrication of Microstrip Antenna Using Log-Periodic Array for Bandwidth Enhancement with Inset and Proximity Feed

J. Khailpour, E. Zarezadeh*, M. Hajebi

Amirkabir University of Technology

(Received: 15/10/2017, Accepted: 01/05/2018)

Abstract

This study deals with a design and implementation of a microstrip patch antenna array that are feeding by Inset and Proximity methods. Results showed that antenna would have high frequency bandwidth and better impedance matching in Inset feeding. Also in Proximity feeding, unwanted radiation vanished *because T-shape connections were eliminated. Simulation and experimental results cleared that antenna in the Proximity method has a smaller size, more gain and better impedance bandwidth than the Inset method. This paper chooses dielectric material FR4 with dielectric substrate permittivity of 4.4 by h=1.6mm. Therefore, operational frequency and input impedance are equal to 3.03 GHz and 50 ohm. Meanwhile, results showed impedance bandwidth and gain increased from 2.7% and 2dB for single arrays to 27.4% and 8dB for 5 arrays.*

Keywords: Microstrip Antenna, Log-Periodic Array, Inset Feed, Proximity Feed, Impedance Matching

* Corresponding author E-mail: zarezadeh@aut.ac.ir