

استفاده از ساختارهای HIW و بهینه سازی آنها با استفاده از AMC به منظور کوچک سازی آنتن های مایکرواستریپ

امیر جعفرقلی^۱

منوچهر کامیاب^۲

چکیده

فرامواد ساختارهایی مصنوعی هستند که به دلیل خواص و کاربردهای متنوع در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. فرامواد اشاره به موادی دارد که به صورت طبیعی موجود نیستند و می بایست به صورت مصنوعی ساخته شوند. از جمله فرامواد معرفی شده در سال های اخیر، سطوح با امپدانس بالا^۳ هستند. این سطوح در مقابل تابش امواج الکترومغناطیسی به صورت مصنوعی بر حسب فرکانس کاری طراحی شده امپدانس بالایی از خود نشان می دهند. اخیرا ساختاری تحت عنوان خطوط امپدانس بالا^۴ پیشنهاد شده است که این ساختار عملکرد مشابهی برای حالت تک بعدی ایجاد می نماید. در این مقاله ابتدا به معرفی آنتن مایکرواستریپ می پردازیم که با استفاده از تکنیک شکافدهی در خط تغذیه، نسبت به محل تغذیه غیر حساس شده و به راحتی تطبیق می گردد. در ادامه با استفاده از خطوط HIW به کوچک سازی آنتن مایکرواستریپ معرفی شده می پردازیم و در نهایت با رفع مشکل اصلی این خطوط در کوچک سازی آنتن، نمونه بهینه سازی شده ای با استفاده از ساختارهای AMC ارائه خواهیم نمود.

کلیدواژه

فرامواد، AMC، HIW، کوچک سازی آنتن، آنتن مایکرواستریپ

۱. دانش آموخته دکتری برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی Jafargholi@ee.kntu.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی

3.High Impedance Surface (HIS)

4.High Impedance Wire (HIW)

مقدمه

مفهوم تشعشع کننده های میکرواستریپ اولین بار توسط Deschamps در سال ۱۹۵۳ مطرح شد [۱]. در دهه هفتاد با فراهم شدن زیرلایه هایی با تلفات کم و خصوصیات مکانیکی و حرارتی مناسب، و نیز با ارائه الگوی های تئوری، ساخت این گونه آنتن ها وارد مرحله جدیدی شد. اولین آنتن های کاربردی توسط Howell و Munson ساخته شد [۲]. از آن زمان تاکنون تحقیقات گسترده ای بر روی این آنتن ها صورت گرفته است. مزایایی آنتن های میکرواستریپ موجب شده تا در گستره وسیعی از محدوده فرکانسی $100\text{MHz} \sim 100\text{GHz}$ به کار گرفته شوند: وزن و حجم کم؛ هزینه پایین ساخت؛ قابلیت ساخت تعداد انبوه؛ کاربرد برای انواع پلاریزاسیون خطی و دایره ای؛ قابلیت های کاربردی دو یا چند بانده و دو پلاریزاسیون همزمان؛ قابلیت مجتمع شدن آسان با مدارات مجتمع؛ مسطح بودن^۱ و امکان پیاده سازی بر انواع سطوح منحنی^۲. دو قابلیت اخیر جذابیت این آنتن ها را برای کوچک سازی به شدت افزایش داده و از این رو مقالات متعددی در خصوص نحوه کوچک سازی این نوع آنتن ها ارائه شده است [۳-۵].

گرچه روش های معرفی شده به طور مؤثری در کاهش ابعاد آنتن قابل استفاده می باشد، ولی کاهش شدید بهره و پهنای باند را می توان از جمله موارد محدود کننده این روش ها نام برد. به همین دلیل گروهی از محققین به بررسی اثر تغذیه آنتن و تاثیر آن بر تطبیق و پهنای باند موثر آنتن پرداخته اند [۶]. به طور کلی می توان روش های ارائه شده در تغذیه آنتن را به سه دسته کلی تقسیم بندی نمود: تغذیه توسط خط میکرواستریپی، تغذیه توسط کابل هم محوری و تغذیه توسط کوپلینگ پنجره^۳ یا مجاورتی^۴. در بخش دوم این مقاله، روش جدیدی برای تغذیه آنتن میکرواستریپی ارائه شده که طی آن، علاوه بر استفاده از مزایای روش های کوپلینگ در افزایش پهنای باند موثر آنتن، تطبیق آنتن در هر دو بعد مستقل از محل قرار گیری خط تغذیه است و در کاربردهای عملی نیاز به دقت در ساخت را به طور کامل برطرف می نماید. بنابراین از مزایای مهم این روش کاهش شدید هزینه ساخت با توجه به عدم نیاز به دقت در عملیات ساخت می باشد. نکته بسیار مهم دیگری که در این روش وجود دارد، کاهش شدید زمان طراحی آنتن است. با این توضیح که، در آنتن های میکرواستریپی، بعد از انتخاب اولیه ابعاد آنتن، نوع زیرآیند و ضخامت آن؛ بیشترین زمان صرف تطبیق آنتن می گردد (بهینه سازی محل قرار گیری خط تغذیه و ...). این در حالی است که در روش پیشنهادی، طراح، صرف انجام

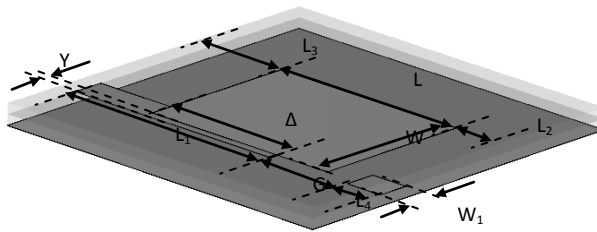
-
- 1.Low Profile
 - 2.Conformal
 - 3.Aperture Coupled
 - 4.Proximity Coupled

طراحی اولیه بدون دغدغه و با کمترین تلاش به راحتی آنتن را تطبیق می نماید. در بخش سوم، به ارائه روشی برای کوچک سازی آنتن با ساختار تغذیه پیشنهادی می پردازیم. نکته مهمی که در اینجا وجود دارد، حفظ استقلال محل خط تغذیه آنتن در فرکانس کوچک سازی شده است. به عبارت بهتر می توان به راحتی آنتن را طراحی نموده و با استفاده از روش کوچک سازی پیشنهادی، بدون تلاش برای انجام تطبیق و نیاز به دقت و یا محدود شدن تطبیق، آنتن را کوچک سازی نمود. روش پیشنهادی مبتنی بر استفاده از ساختارهای HIW می باشد. این ساختارها، با فراهم سازی بستری با ضریب مغناطیسی بالا، به کوچک سازی آنتن با حفظ بهره و پهنای باند آن می پردازند. مشکل اصلی در استفاده از این ساختارها، لزوم استفاده از ساختارهای بزرگتر برای ایجاد کوچک سازی بیشتر است که در بخش آخر و با استفاده از فنون ساده، (بارگذاری توسط مواد مغناطیسی مصنوعی^۱، AMC)، راهکاری برای حل این مشکل ارائه شده است.

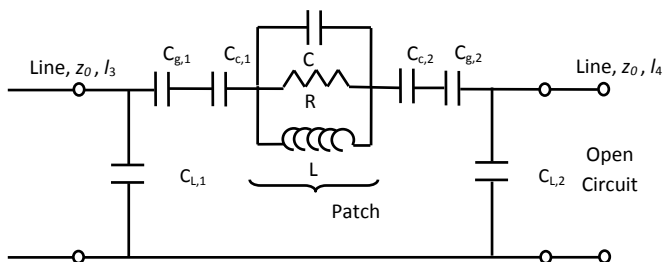
اصلاح تغذیه آنتن های مایکرواستریپی

همانطور که پیش تر اشاره شد، علاوه بر ساختارهای متداول تغذیه (استفاده از خط مایکرواستریپی و تغذیه توسط کابل هم محوری)، انواع مختلفی از ساختارهای تغذیه معرفی شده است. از مشهورترین این روشها، می توان دو روش کولپینگ پنجره و کولپینگ مجاورتی نام برد. این دو تغذیه به منظور افزایش پهنای باند و همچنین بهبود تطبیق آنتن معرفی شده اند. مشکل اصلی در هر دو ساختار تنظیم دقیق محل قرار گیری خط مایکرو استریپ زیر پیچ و به خصوص در ساختار کولپینگ پنجره در زیر محل دقیق صفحه می باشد. در این مقاله روش جدیدی برای حل این مشکل ارائه شده است. در شکل (۱) شماتیک تغذیه پیشنهادی و مدار معادل استخراج شده برای آن ارائه پیشنهاد شده است. همانطور که مشاهده می شود، خط تغذیه از دو بخش تشکیل شده است که توسط یک شکاف از هم جدا شده اند. این شکاف توسط حلقه خازنی در الگوی مداری دیده می شود. در جدول شماره (۱) مقادیر انتخاب شده برای هر یک از پارامترهای آنتن نشان داده شده است. مقادیر سلف و خازن الگوی پیشنهادی مداری محاسبه و ارائه شده است. در شکل (۲) مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی عددی و الگوی مداری پیشنهادی برای امپدانس ورودی آنتن انجام شده است که از تطابق خوب این دو حکایت دارد.

1. Artificial Magnetic Conductor (AMC)



(الف)

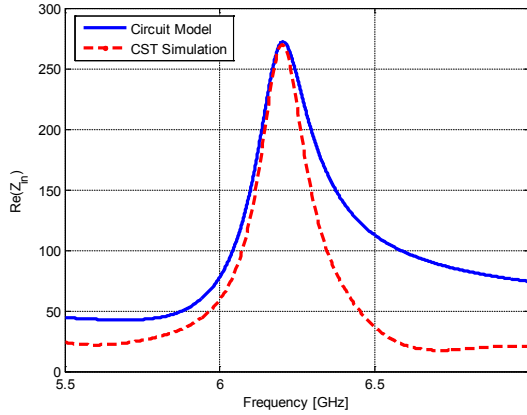


(ب)

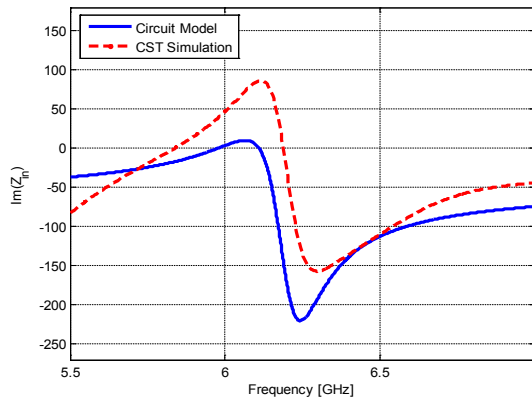
شکل ۱ (الف) شماتیکی از نحوه تغذیه پیشنهادی و (ب) الگوی مدارای ارائه شده.

Antenna Parameters	Design 1
Antenna Length, L	16 mm
Antenna Width, W	12.45 mm
Feed Point, Y	0.9 mm
Gap Length, G	7 mm
Line Width, W_1	2.46 mm
Effective Length of Feed Line, $\Delta = L_1 - L_3$	12 mm
L_2	4 mm
L_3	8 mm
Parasitic Line Length, L_4	1 mm (0.02 λ)
$h_1 = h_2$	30 mil (0.762 mm)
$\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2}$	2.2, RT5880
Total Length	28 mm
Total Width	28 mm

جدول ۱: پارامترهای آنتن



(الف)



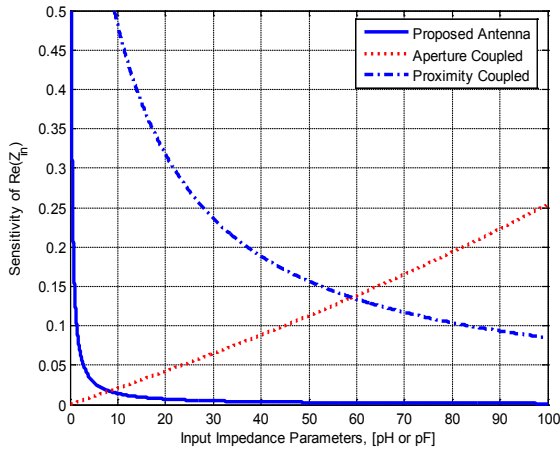
(ب)

شکل ۲) مقایسه شبیه سازی عددی و الگوی مداری پیشنهادی برای (الف) بخش حقیقی

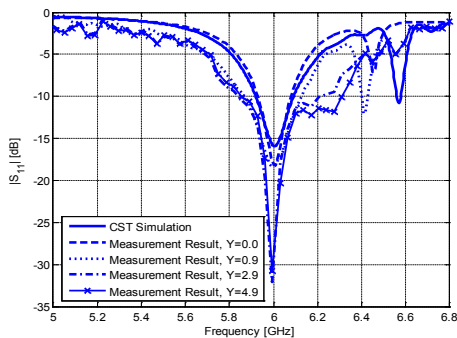
(ب) بخش موهومی امپدانس

در شکل (۳) نتایج مقایسه حساسیت امپدانس ورودی آنتن مایکرواستریپ برای هر سه نوع تغذیه کوپلینگ پنجره، کوپلینگ مجاورتی و تغذیه پیشنهادی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، کمترین حساسیت امپدانس در تغذیه پیشنهادی فراهم می شود. بر اساس یافته های نظریه مدار، وجود یک حلقه خازنی موجب کاهش یک مرتبه از مرتبه پاسخ فرکانسی مدار می گردد. علاوه بر این همان طور که در نتایج اندازه گیری شکل (۴) نشان داده شده است، این حلقه از حساسیت امپدانس

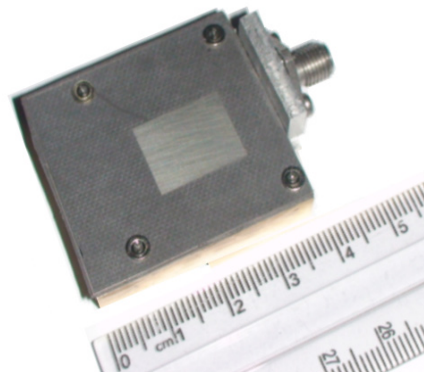
ورودی آنتن به محل تغذیه می‌کاهد و عملاً موجب بهبود در شرایط تطبیق می‌گردد. در این شکل، افت بازگشتی برای محل‌های مختلف قرارگیری تغذیه آنتن مقایسه شده است. در شکل (۵)، نتایج اندازه‌گیری پترن تشعشعی آنتن، برای صفحات E و H نشان داده شده است همانطور که مشاهده می‌شود، میزان مولفه کراس پلاریزاسیون این آنتن در لوب اصلی بیش از ۱۵dB است که نشان دهنده کیفیت مناسب پلاریزاسیون در آنتن طراحی شده است.



شکل ۳) مقایسه حساسیت امپدانس ورودی آنتن میکرواستریپ به روش‌های مختلف تغذیه.

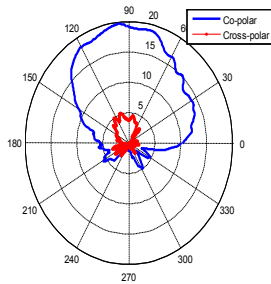


(ب)

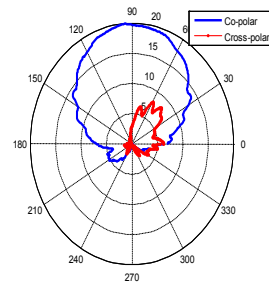


(الف)

شکل ۴) (الف) نمونه آنتن ساخته شده، و (ب) افت بازگشتی اندازه‌گیری شده برای مقادیر مختلف Y.



(ب)



(الف)

شکل ۵) نتایج اندازه گیری پترن تشعشی آنتن، (الف) صفحه E و (ب) صفحه H.

کوچک سازی آنتن پیشنهادی با استفاده از ساختار HIW

حال به بررسی نحوه کوچک سازی آنتن پیشنهادی با استفاده از ساختارهای HIW، می پردازیم. بر اساس [۷]، ساختارهای HIW، به طور مصنوعی بستری با ضریب مغناطیسی به دلخواه بزرگ را فراهم می سازند. در این مقاله فرکانس رزونانس ساختار بر اساس پارامترهای آن ارائه شده است، رابطه (۱)، که d_s طول صفحه و ϵ_{eff} گذردهی الکتریکی موثر زیرآیند میکرواستریپ می باشد. همانطور که در این رابطه مشاهده می شود، با افزایش ابعاد صفحه فرکانس کاری ساختار کاهش می یابد.

$$f_c \approx \frac{c}{4d_s \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

بر اساس [۸]، پهنای باند و فرکانس رزونانس آنتن های میکرواستریپ با جنس زیرآیند مورد استفاده در رابطه اند:

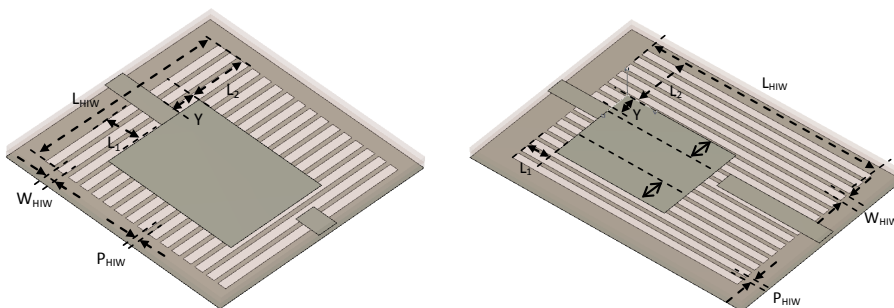
$$BW \propto \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad f_r \propto \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2)$$

همانطور که مشاهده می شود، با استفاده از ضرایب بزرگ مغناطیسی در آنتن های میکرواستریپی، می توان همزمان هم فرکانس کاری آنتن را کاهش داد و هم پهنای باند را حفظ نمود. بنابراین با فراهم سازی بستری مغناطیسی با ضریب مغناطیسی به دلخواه بزرگ توسط ساختارهای HIW، امکان کاهش ابعاد آنتن فراهم می شود. در شکل (۶) دو نوع نحوه پیاده سازی ساختار بر روی

آنتن پیشنهادی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. جهت قرار گرفتن صفحه های HIW در این دو ساختار، در یکی هم جهت با خط تغذیه و در دیگری عمود بر خط تغذیه می باشد.

در شکل (۷)، افت بازگشتی آنتن در هر دو حالت بر حسب فرکانس ارائه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، در ساختاری با صفحه های HIW هم جهت با خط تغذیه، شکل (۷-الف)، علاوه بر وجود فرکانس اصلی (5.7GHz)، فرکانس کوچک سازی آن در 2.35GHz اتفاق می افتد. نکته ای که در این ساختار دیده می شود، عدم تغییر تطبیق در فرکانس اصلی و تغییر تطبیق در فرکانس کوچک سازی شده بر حسب تغییر مکان تغذیه است. البته می بایست توجه نمود که تغییر در تطبیق تنها در ناحیه ای میانی آنتن اتفاق می افتد و در دو ناحیه کناری باز هم عدم تغییر در تطبیق بر حسب تغییر محل تغذیه صادق خواهد بود.

در حالتی که صفحه های HIW عمود بر جهت خط تغذیه قرار گرفته اند، شکل (۷-ب)، فرکانس کوچک سازی آنتن در 2.5GHz اتفاق افتاده است و عدم تغییر در تطبیق آنتن بدون محدودیت دیده می شود. البته در این حالت برخلاف نمونه قبلی که علاوه بر فرکانس اصلی فرکانس کوچک سازی هم دیده می شود، تنها فرکانس کوچک سازی وجود دارد و عملاً فرکانس اصلی آنتن به این فرکانس انتقال داده شده است. می بایست خاطر نشان نمود که آنتن در این حالت، در فرکانسی بالاتر (حدوداً 4GHz و با پهنای باند بسیار باریک) تطبیق می شود که با توجه به پهنای باند بسیار باریک به عنوان فرکانس اصلی نمی توان از آن نام برد.



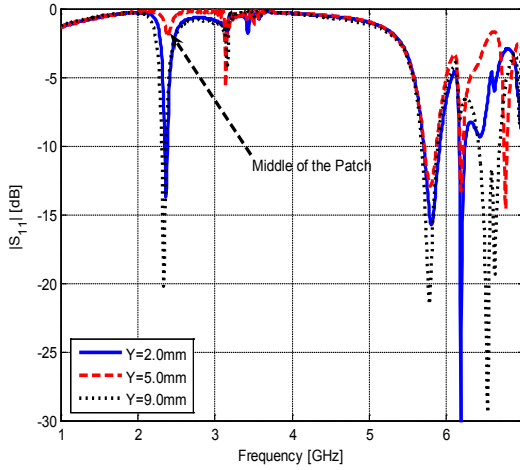
(ب)

(الف)

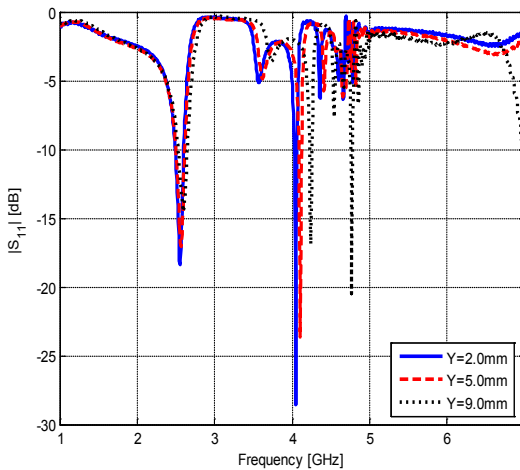
شکل ۶) ساختار آنتن در دو حالت ساختار HIW (الف) هم جهت با خط تغذیه و (ب) عمود بر خط تغذیه:

$$(الف): L_1=4.3\text{mm}, L_2=8.55\text{mm}, L_{HIW}=33\text{mm}, W_{HIW}=1\text{mm}, Y=3.7\text{mm}, P_{HIW}=0.5\text{mm}$$

$$(ب): L_1=5\text{mm}, L_2=8.1\text{mm}, L_{HIW}=33\text{mm}, W_{HIW}=1\text{mm}, Y=3.7\text{mm}, P_{HIW}=0.5\text{mm}$$



(الف)



(ب)

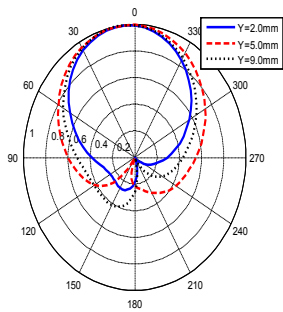
شکل ۷) افت بازگشتی آنتن در دو حالت (الف) ساختار HIW هم جهت با خط تغذیه

(ب) ساختار HIW عمود بر خط تغذیه

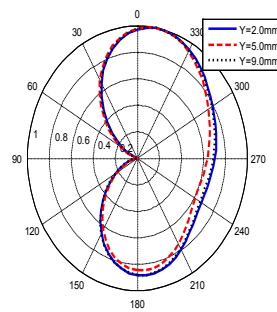
در شکل (۸) پترن تشعشعی آنتن برای ساختار صفحه های HIW هم جهت با خط تغذیه در هر دو فرکانس اصلی و کوچک سازی شده نشان داده شده است. در فرکانس کوچک سازی شده، عملاً پترن تشعشعی دو طرفه است و بهره و بهره آنتن به ترتیب -0.1 dB و 94% می باشد. این در حالی است

که در فرکانس اصلی، بهره آنتن 0.7dB و بهره 97% است.

در شکل (۹) پترن تشعشی آنتن برای ساختار صفحه های HIW عمود بر خط تغذیه در فرکانس کوچک سازی شده نشان داده شده است. پترن تشعشی در این حالت نیز دو طرفه است و بهره و بهره آنتن به ترتیب عبارتند از: 0.4dB و 96% . با مقایسه بین فرکانس کوچک سازی در این دو حالت مشاهده می شود که بهره و بهره آنتن در حالت دوم بالاتر بوده و از طرف دیگر، پترن تشعشی از تقارن بیشتری برخوردار است. نکته مهم دیگری که در استفاده از این روش وجود دارد، افزایش پهنای باند در فرکانس کوچک سازی شده است که در طراحی دوم، در حدود 15.8% (338MHz) است که در مقایسه با دیگر روش های پیشنهادی برای کوچک سازی آنتن های میکرواستریپی، پهنای باند بسیار وسیعی به شمار می رود.



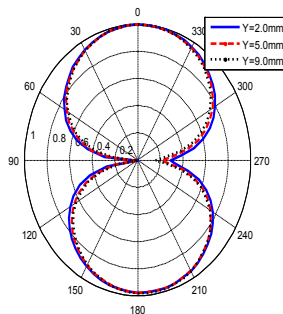
(ب)



(الف)

شکل ۸) پترن تشعشی آنتن برای ساختار HIW همجهت با خط تغذیه؛ (الف) فرکانس پایین ($f=2.35\text{GHz}$)

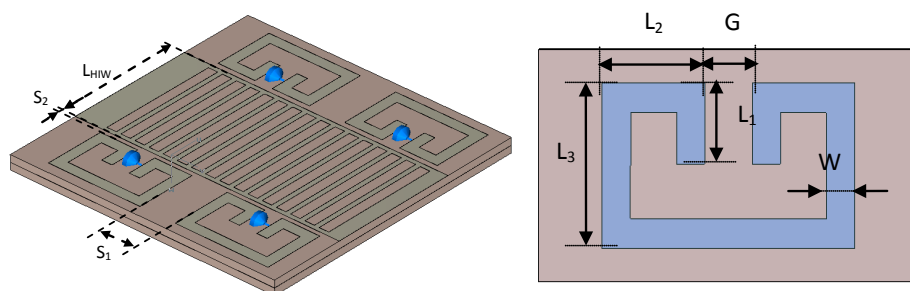
(ب) فرکانس بالا ($f=5.7\text{GHz}$)



شکل ۹) پترن تشعشی آنتن برای ساختار HIW عمود بر خط تغذیه؛ (الف) فرکانس پایین ($f=2.5\text{GHz}$)

بهینه سازی و رفع محدودیت های فیزیکی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، میزان کوچک سازی فرکانس کاری آنتن در این روش به اندازه طول صفحه ها (ds) بستگی دارد. بنابراین برای کوچک سازی بیشتر آنتن در این روش، طراح می بایست، طول صفحه ها را افزایش دهد. نکته مهمی که در این جا دیده می شود این است که در صورت افزایش طول صفحه ها، عملاً کوچک سازی آنتن دچار اشکال شده است. برای رفع این مشکل و کوچک سازی بیشتر آنتن، از ساختارهای AMC استفاده می نماییم. علت استفاده از ساختارهای AMC، استفاده از نظریه تصویر جهت افزایش مصنوعی طول صفحه بر اساس اصل دوگان الکترومغناطیسی است. وقتی یک خط فلزی وجود دارد، می توان با قرار دادن دو صفحه PEC در دو طرف آن، عملاً طول آن را بی نهایت در نظر گرفت. این مسئله همان چیزی است که در سلول های فراماد برای شبیه سازی تک سلول مورد استفاده قرار می گیرد. حال به هدف افزایش طول الکتریکی صفحه، با استفاده از دوگان آن (صفحات PMC) می توان به هدف مورد نظر دست پیدا کرد. تاکنون ساختارهای متعددی برای پیاده سازی سلول های PMC ارائه شده [۹-۱۱] که در این میان ساختار CLL از کاربردی ترین آنها به شمار می رود. در این مقاله نیز از ساختارهای CLL استفاده شده است، [۹]. همانطور که در شکل (۱۰) دیده می شود، سلول های CLL در دو طرف صفحه های HIW قرار داده شده اند. با توجه به بهره و بهره بالاتر ساختار صفحه های عمود بر خط تغذیه، برای ادامه کار از این ساختار استفاده شده است.

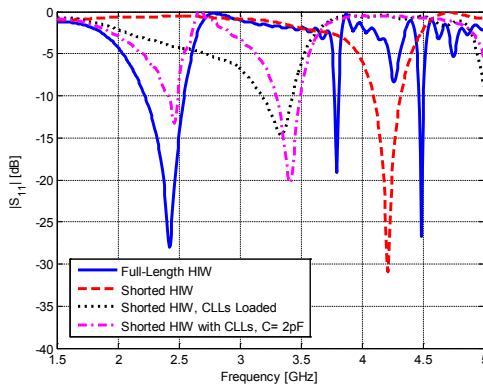


شکل (۱۰) آنتن با ساختار HIW عمود بر خط تغذیه و اصلاح شده توسط ساختارهای CLL.

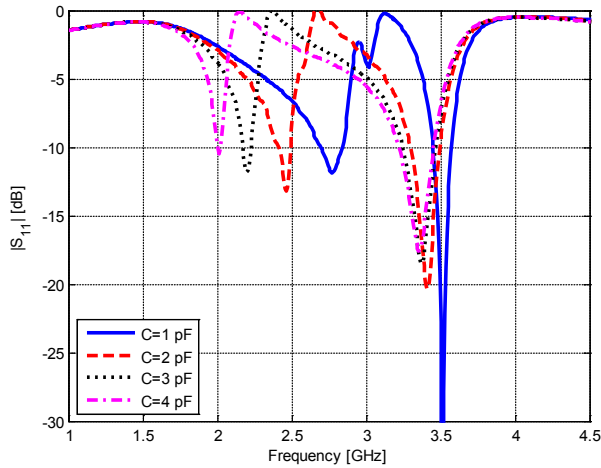
$$L_1=0.67\text{mm}, L_2=0.89\text{mm}, L_3=1.37\text{mm}, W=0.247\text{mm}, G=0.411\text{mm}, T_1=0.13\text{mm}, T_2=0.5\text{mm}, S_1=3.75\text{mm}, S_2=0.55\text{mm}, L_{HIW}=12\text{mm}.$$

در شکل (۱۱) حالت های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته اند. افت بازگشتی آنتن مایکرواستریپ کوچک سازی شده با استفاده از ساختارهای HIW با طول بزرگ، افت بازگشتی آنتن مایکرواستریپ کوچک سازی شده با استفاده از ساختارهای HIW با طول کوچک، که در این حالت فرکانس رزونانس افزایش چشم گیری داشته است. افت بازگشتی آنتن مایکرواستریپ کوچک سازی شده با استفاده از ساختارهای HIW با طول کوچک و بارگذاری شده توسط سلول های CLL. در این حالت فرکانس رزونانس کاهش یافته است. افت بازگشتی آنتن مایکرواستریپ کوچک سازی شده با استفاده از ساختارهای HIW با طول کوچک و بارگذاری شده توسط سلول های CLL و خازن 2pF ، که در این حالت فرکانس رزونانس به میزان قابل قبولی کاهش پیدا کرده و مجدداً در محدوده حالت اول قرار گرفته است. علت استفاده از خازن امکان جابجایی فرکانس کاری سلول CLL با استفاده از بارگذاری خازنی به منظور تحقق AMC می باشد [۹]. براین اساس، با وجود کاهش ابعاد صفحه ها، فرکانس کاری کوچک سازی شده (در حدود 2.5GHz) باز هم در محدوده فرکانس کاری با صفحه هایی با طول بزرگ تر قرار گرفته است.

بهره آنتن در این حالت به ترتیب عبارتند از: 0.1dB و 96% استفاده از آنتن پیشنهادی موجب شده تا علاوه بر تطبیق آنتن در فرکانس کاری CLL بارگذاری شد با خازن، 2.5GHz ، فرکانس ذاتی ساختار CLL نیز موجب تطبیق آنتن گردد، 3.4GHz همان طور که اشاره شد، استفاده از خازن بارشده موجب کاهش بیشتر فرکانس کاری AMC می شود. از این ویژگی جهت افزایش میزان کوچک سازی فرکانس کاری آنتن استفاده شده است. در شکل (۱۲)، افت بازگشتی آنتن بر اساس مقادیر مختلف این خازن نشان داده شده است. در این حالت عملاً محدودیت روش استفاده از کوچک سازی با استفاده از ساختارهای HIW برداشته شده و فرکانس کاری به حدود 2GHz منتقل شده است.



شکل (۱۱) افت بازگشتی، آنتن با ساختار HIW عمود بر خط تغذیه و اصلاح شده توسط ساختارهای CLL



شکل (۱۲) افت بازگشتی، آنتن با ساختار HIW عمود بر خط تغذیه و اصلاح شده توسط ساختارهای CLL و بار گذاری شده توسط خازن

نتیجه گیری

در بخش اول این مقاله فنون شکاف دهی در خط تغذیه ارائه شد. بر این اساس، امپدانس ورودی آنتن میکرواستریپ نسبت به محل تغذیه غیر حساس شده و به راحتی تطبیق می گردد. نتایج حاصل از نظریه با خروجی های نرم افزار CST مقایسه شد و بر اساس نظریه استخراج شده به ارائه منحنی های حساسیت امپدانس پرداختیم. نتایج اندازه گیری عملی نیز علاوه بر تایید نتایج شبیه سازی، در تطابق خوبی با آنها قرار داشتند. در ادامه با استفاده از خطوط HIW از آنها در کاربرد کوچک سازی آنتن میکرواستریپی استفاده شد. مزیت استفاده از این ساختارها در کوچک سازی آنتن، حفظ بهره آنتن در فرکانس پایین و ایجاد پهنای باند وسیع در محدوده آن می باشد. در نهایت با رفع مشکل اصلی این روش در کوچک سازی آنتن، نمونه بهینه سازی شده ای با استفاده از ساختارهای AMC ارائه شد. در این نمونه با استفاده از ساختارهای CLL به کوچک سازی طول صفحه های ساختار HIW پرداخته و از این جهت به کوچک سازی بیشتر آنتن کمک شده است. امکان بارگذاری خازنی ساختارهای CLL نیز موجب افزایش ضریب کوچک سازی آنتن گردیده است.

مراجع

- [1]G. A Deschamps, “Microstrip Microwave Antennas”, 3rd USAF Symposium on Antennas, USA, 1953,pp.76-121.
- [2]Gutton, H., and G. Baissinot, “Flat Aerial for Ultra High Frequencies”, French Patent, 1995, No. 70313,pp.88-135.
- [3]D. M. Pozar and D. H. Schaubert, Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays.: IEEE Press, New York,pp1995.111-256.
- [4]A. Alù, F. Bilotti, N. Engheta, and L. Vegni, “ Subwavelength, Compact, Resonant Patch Antennas Loaded With Metamaterials,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 1, pp. 13–25, Jan. 2007.
- [5]A. Erentok and R. W. Ziolkowski, “ metamaterial-inspired efficient electrically-small antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag. , Mar. 2008, vol. 56, no. 3, pp.691–707.
- [6]J. R. James and P. S. Hall, Handbook of Microstrip Antennas...: Peter Peregrinus, London, U.K ,1989,pp.57-86.
- [7]A. M. E. Safwat, S. A. Tretyakov, and A. V. Räisänen,” High-Impedance Wire”, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. , 2007, Vol. 6, 631-634.
- [8]C. A. Balanis, Antenna theory, Analysis and design, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2005,pp.242-293.
- [9]A. Erentok, P. Luljak, and R. W. Ziolkowski, “Antenna performance near a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor,” IEEE

Trans. Antennas Propagat. , Jan. 2005, vol. 53, pp. 160–172.

[10]A. Jafargholi, M. Kamyab, and M. Veysi, “Artificial Magnetic Conductor Loaded Monopole Antenna”, IEEE Antennas Wireless Propag. Letter, 2010, vol. 9, pp.211-214.

[11]A. Jafargholi, M. Kamyab, M. Rafaei, M. Veysi, “A Compact Dual-band Printed Dipole Antenna Loaded with CLL-Based Metamaterials”, International Review of Electrical Engineering, IREE, 2010, Vol. 5, No. 6, pp. 2710-2714.