

کوچک سازی آنتن ریزنوار با استفاده از رولایه مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی

وحید امیری گوشکی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد هاشم واجد سمیعی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - v_amiri@alumni.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - mh_samiei@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله از ابر سطح الکترومغناطیسی جدیدی جهت کوچک سازی آنتن ریزنوار استفاده شده است. این ابر سطح در بالای آنتن (به صورت رولایه) قرار داده شده است. هدف اصلی در اینجا، کاهش اندازه ابعاد آنتن هست. بنابراین، رولایه به طور مستقیم روی آنتن اصلی بدون هیچ فاصله هوایی قرار می گیرد. برای مقایسه و نشان دادن میزان کوچک سازی انجام شده، یک آنتن دیگر که در فرکانس آنتن کوچک سازی شده تشدید می کند (حتی الامکان با عملکردی نزدیک به عملکرد آنتن از نظر پارامترهای تشعشعی)، در نرم افزار طراحی شده و پارامترهای دو آنتن نظیر اندازه، بهره تشعشعی، بازدهی تشعشعی، پهنای باند و تطبیق باهم مقایسه شده است. با این کار امکان کوچک سازی ساختار کلی آنتن تا حدود ۵۰ درصد فراهم می شود. از آنجاکه در این روش کوچک سازی ساختار آنتن اصلی بدون تغییر می ماند (حتی تغذیه آنتن جهت تطبیق جابجا نمی شود و ابعاد آنتن نیز بدون تغییر می ماند)، می توان تغییر و بهبود پارامترهای آنتن کوچک سازی شده (با رولایه مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی) را ناشی از تأثیر مستقیم رولایه روی آنتن دانست. نتایج شبیه سازی و اندازه گیری تأثیر این رولایه را روی پارامترهای آنتن نشان می دهند.

واژه های کلیدی: کوچک سازی، آنتن ریزنوار، ابر سطح الکترومغناطیسی

Patch Antenna Miniaturization Utilizing Metasurface Superstrate

Vahid Amiri Gooshki¹, MSc Student; Mohammad Hashem Vadjed Samiei², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: v_amiri@elec.iust.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: mh_samiei@iust.ac.ir

Abstract: In this paper, a new metasurface is proposed for miniaturization of patch antenna. The metasurface is placed on top of the patch antenna (working as a superstrate). The main purpose of this paper is to reduce dimensions of antenna. So the metasurface superstrate is placed on top with no air gap and is in direct contact with the radiating patch. For affirming the reduction in size, another patch antenna, which has the same shape with primary antenna, is designed without using superstrate to operate with approximate similar performance at the frequency of the first antenna with metasurface superstrate. The results show that this method brings size reduction about 50% in the surface of antenna. In this method of miniaturization, the only factor in reducing the resonant frequency of primary antenna is metasurface superstrate (place of feed line and the values of antenna dimensions are not changed). Therefore the antenna radiating parameters are affected just by metasurface superstrate. Consequently simulation measurement results, show effects of metasurface superstrate on the patch antenna characteristic and performance parameters.

Keywords: Size reduction, microstrip patch antenna, metasurface Superstrate.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

نام نویسنده مسئول: محمد هاشم واجد سمیعی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان هنگام - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

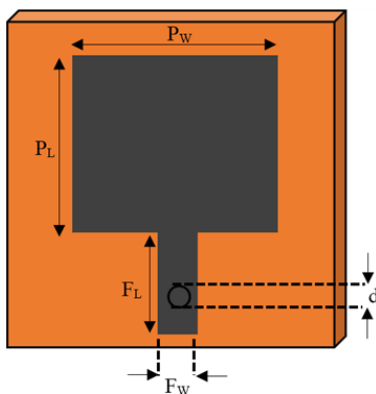
از آنجاکه در سال‌های اخیر تقاضا برای دستگاه‌های بی‌سیم فشرده بالا رفته است، آنتن‌های با طول مؤثر کوچک یکی از موضوعات مهمی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱-۳]. آنتن‌های صفحه‌ای به دلیل ساختار ساده و فشرده‌ای که دارند، گزینه مناسبی برای دستگاه‌های بی‌سیم کوچک قابل حمل مثل موبایل، تبلت و... می‌باشند. ابعاد یک آنتن با فرکانس تشدید آن رابطه عکس دارد. برای یک آنتن ریزنوار ابعاد پچ حدود $0.4\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$ هست که λ_0 طول موج مربوط به فرکانس کار آنتن است [۴]. خط تغذیه و صفحه زمین آنتن، از عوامل اصلی بزرگ شدن ساختار آنتن و در نتیجه عدم تناسب برای استفاده در دستگاه‌های بی‌سیم فشرده می‌شوند. بنابراین، تلاش‌های زیادی به روش‌های متفاوت در راستای کوچک‌سازی ساختار آنتن‌های صفحه‌ای انجام شده است [۵].

ابر سطح الکترومغناطیسی یک ساختار فراماده ی دوبعدی (صفحه‌ای) هست [۶]. این سطوح به دلیل داشتن ساختار دوبعدی، دارای قابلیت ترکیب با آنتن‌های صفحه‌ای مثل آنتن پچ، آنتن روزنه‌ای و آنتن دوقطبی جهت بهبود خصوصیات تشعشعی آن‌ها با حفظ اندازه آنتن می‌باشند. برخی محققان ساختارهای EBG را نیز جزو این سطوح دسته‌بندی می‌کنند ولی در این مقاله منظور همان سطوح فراماده‌ای است. در مراجع [۷-۹] برخی از کاربردهای این سطوح و ساختارهای EBG به‌عنوان رو لایه و زیر لایه در بهبود پارامترهای آنتن مثل بهره تشعشعی، تغییر قطبی شدگی، کوچک‌سازی، تنظیم فرکانس و... معرفی شده‌است. درواقع ابعاد یک آنتن بر اساس کوچک‌ترین فرکانس تشدید آن مشخص می‌شود و هرچه ابعاد آن بزرگ‌تر باشد، فرکانس تشدید پایین‌تری خواهد داشت. بنابراین، اگر بتوان به هر روشی موجب کاهش فرکانس تشدید آنتن شد، کوچک‌سازی انجام شده است.

در این مقاله می‌خواهیم به روش اشاره‌شده در بالا روی یک آنتن صفحه‌ای ریزنوار توسط رولایه مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی کوچک‌سازی انجام دهیم. در اینجا یک آنتن ساده ریزنوار که روی یک زیرلایه با ابعاد $0.5\lambda_0 \times 0.5\lambda_0$ ، که λ_0 طول موج فضای آزاد در فرکانس تشدید آنتن است، در نظر گرفته شده‌است. یک‌راه کاهش اندازه آنتن، بارگذاری ماده‌ای آن است، که یکی از راه‌های ساده برای کوچک‌سازی آنتن می‌باشد. ابعاد آنتن با جذر ضریب دی‌الکتریک رابطه عکس دارد؛ یعنی هرچه میزان ضریب دی‌الکتریک بالاتر رود، ابعاد می‌تواند برای عملکرد در همان فرکانس تشدید، کوچک‌تر انتخاب شود. به‌عبارت‌دیگر با ثابت نگه‌داشتن ابعاد آنتن و بارگذاری آن، فرکانس تشدید آن را کم‌تر کرد، تا بتواند به‌جای یک آنتن بزرگ‌تر بارگذاری نشده، عمل کند. بنابراین، ابرسطحی که به‌عنوان رولایه جهت کوچک‌سازی استفاده می‌شود، طوری طراحی شده که دارای ضریب دی‌الکتریک بالایی در فرکانس‌های پایین‌تر و نزدیک به فرکانس تشدید آنتن کوچک‌تر باشد. با قرارگرفتن سطح درست‌شده از این سلول واحد روی آنتن کوچک‌تر، فرکانس تشدید آن با از دست دادن کم‌ترین هزینه پهنای باند و بهره تشعشعی، تا فرکانس تشدید آنتن بزرگ‌تر پایین می‌آید.

۲- طراحی آنتن و ابر سطح الکترومغناطیسی

آنتن ریزنواری که در اینجا مورد مطالعه قرار گرفته است، از یک زیر لایه با ابعاد $T \times T = 20 \times 20$ mm و جنس Rogers, RO4003C، ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 3.38$ ، ضریب تلفات $\tan\delta = 0.0027$ و ضخامت 0.8128 mm تشکیل شده‌است (شکل ۱). تغذیه این آنتن از طریق کانکتور SMA است که از زیر آنتن به آن وصل شده است. این کانکتور از یک هادی داخلی به قطر 1.27 mm و یک هادی خارجی به قطر 4.13 mm تشکیل شده و ماده‌ایزوله کننده بین هادی داخلی و خارجی، از جنس تفلون با ضریب دی‌الکتریک $\epsilon_r = 2.1$ می‌باشد. امپدانسی که از دهانه‌ی این کانکتور مشاهده می‌شود، تقریباً با 50 اهم تطبیق است [۴]. در جدول ۱ ابعاد مشخص شده روی آنتن، و در جدول ۳ پارامترهای تشعشعی آن را در فرکانس تشدید مشاهده می‌کنید که در بخش نتایج شبیه‌سازی به‌طور کامل‌تر درباره نتایج بحث شده‌است.



شکل ۱: آنتن اولیه جهت کوچک‌سازی با رولایه ی مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی که آن را آنتن ۱ در نظر می‌گیریم.

جدول ۱: مقادیر ابعاد مشخص شده روی آنتن ۱

مقدار	پارامتر (mm)
12	P_w
9.4	P_L
20	T
2.25	F_w
6	F_L
1.27	D

رولایه ی ابر سطح الکترومغناطیسی که برای کوچک‌سازی آنتن معرفی شده، از سلول واحد‌های مستطیل شکل تشکیل شده‌است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سلول‌های سازنده این ساختار دارای ابعاد به طول b و $a = 0.6$ mm بوده که در فاصله 0.5 mm از هم قرار گرفته‌اند. زیر لایه‌ای که برای این سلول واحد استفاده شده‌است، همان زیر لایه آنتن یعنی Rogers, RO4003C با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 3.38$ و ضریب تلفات $\tan\delta = 0.0027$ و ضخامت 0.8128 mm می‌باشد. مکانیزم و طراحی اولیه این ابر سطح با توجه به ابر سطح معرفی شده در [۸] است که در آنجا از ابر سطح موردنظر جهت طراحی آنتن باقابلیت

شونده و انتقال یافته به ترتیب با ضریب انعکاس S_{11} و ضریب S_{21} تبدیل می شود. ضریب S_{21} با ضریب انتشار T رابطه ای به صورت $S_{21} = Te^{jk_0d}$ دارد که در این رابطه k_0 عدد موج اولیه در فضای آزاد می باشد. پارامترهای S با ضریب شکست n و امپدانس z به صورت زیر رابطه دارند [۱۱]:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{j2nk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{j2nk_0d}} \quad (۳)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{jnk_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{j2nk_0d}} \quad (۴)$$

که در این روابط:

$$R_{01} = \frac{z - 1}{z + 1} \quad (۵)$$

ضریب شکست n و امپدانس z با معکوس کردن معادلات ۴ تا ۶ به دست می آیند.

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (۶)$$

$$e^{jnk_0d} = X \pm j\sqrt{1 - X^2} \quad (۷)$$

که در اینجا X به صورت $X = \frac{1}{2S_{21}}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)$ است. از آنجاکه ساختار فراماده ای به صورت یک ماده غیرفعال در نظر گرفته می شود، دو شرط زیر باید برقرار باشد:

$$\text{Re}\{z\} \geq 0 \quad (۸)$$

$$\text{Im}\{z\} \geq 0 \quad (۹)$$

مقدار ضریب شکست با توجه به معادله (۸) به صورت زیر درمی آید:

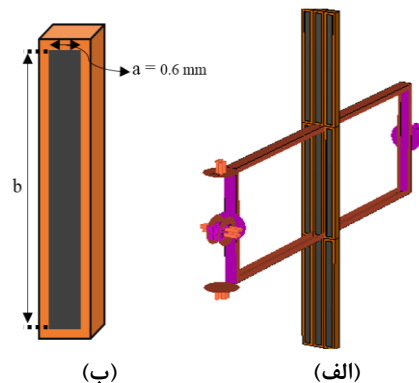
$$n = \frac{1}{k_0d} \{ [\text{Im}[\ln(e^{jnk_0d})]] + 2m\pi - j\text{Re}[\ln(e^{jnk_0d})] \} \quad (۱۰)$$

که m یک مقدار صحیح بوده و قسمت حقیقی ضریب شکست وابسته به تغییرات این مقدار است ولی قسمت موهومی ضریب شکست یک مقدار یکتا می باشد.

از آنجاکه ابر سطح ساختار نامحدودی دارد، در نرم افزار یک سلول واحد را با شرایط مرزی متناوب در نظر گرفته شده است. با این کار سرعت شبیه سازی با همان دقت قبل بیشتر می شود. با استفاده از روابط بالا برای شکل ۲، نمودارهای مربوط به ضرایب گذردهی الکتریکی (۴) و نفوذپذیری مغناطیسی (۵) به صورت نشان داده شده در شکل های ۳ و ۴ خواهد بود. از نمودار شکل ۳ می توان این برداشت را کرد که هرچه طول سلول واحد بزرگ تر باشد، قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی آن بزرگ تر خواهد بود که برای کوچک سازی آنتن مناسب تر است. از طرفی مشاهده می شود که با افزایش طول سلول واحد قسمت موهومی ضریب گذردهی آن نیز زیاد می شود و این باعث افزایش تلفات آنتن و در نتیجه کاهش بهره تشعشی آنتن می شود.

همان طور که در شکل های ۳ و ۴ مشاهده می شود، ابر سطح با طول سلول واحد $b = 8.33 \text{ mm}$ در مقابل موج تابش دارای میدان الکتریکی با قطبش در جهت y ، دارای قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی

تنظیم فرکانس استفاده شده است. خاصیت این سطح و ابعاد سلول واحد به گونه ای است که در تابش یک موج با قطبش شدگی و فرکانس خاص (قطبش شدگی و فرکانس کار آنتن اولیه)، ضریب دی الکتریک بالایی از خود نشان می دهد. اساس کار کوچک سازی نیز در این مقاله همین می باشد که با بارگذاری یک آنتن با یک ماده با ضریب دی الکتریک بالا، ضریب دی الکتریک مؤثر فضای آنتن بالا رفته و این باعث می شود که فرکانس کار آنتن پایین آمده و کوچک سازی انجام شود. خصوصیت بارزی که این سلول واحد را از سایر ساختارهای فراماده ای متمایز می کند این است که با تغییر طول این سلول واحد، ضریب گذردهی الکتریکی ابر سطح حاصل نیز به طور دلخواه تغییر می کند. این نکته را به خوبی می توان در شکل ۳ مشاهده کرد. برای تحلیل این ابر سطح، سلول واحد را در نرم افزار CST MICROWAVE STUDIO 2015 رسم کرده و شرایط مرزی را برای آن متناوب در نظر می گیریم (شکل ۲-الف). پس از آماده سازی ساختار جهت تحلیل، یک موج تخت با قطبش شدگی آنتن به آن تابانده و پارامترهای S این ساختار محاسبه می شود.



شکل ۲: ساختار سلول واحد پیشنهادی. (الف) در تحلیل ابر سطح در نرم افزار، یک سلول واحد را با شرایط مرزی متناوب تحلیل می کنیم. (ب) ابعاد سلول واحد پیشنهادی

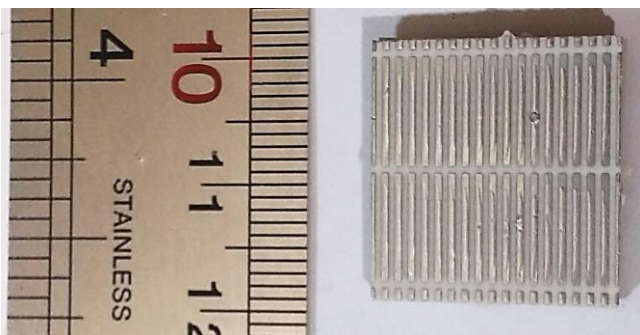
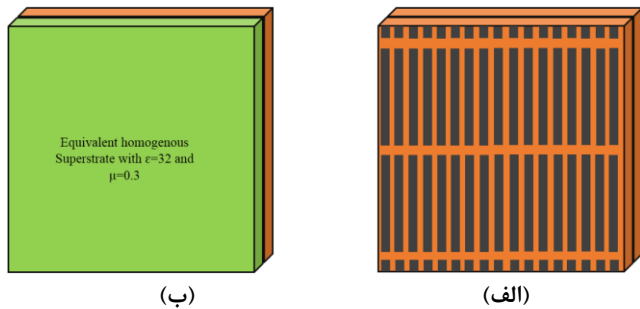
ضرایب گذردهی الکتریکی (۴) و نفوذپذیری مغناطیسی (۵)، برای یک ساختار متناوب تشکیل شده از سلول واحدهای تشکیل دهنده ساختار فراماده ای، با پارامترهای S به دست آمده از موج تابیده شده به آن ساختار رابطه دارد. این روابط به طور مفصل در مرجع [۱۰] آورده شده است. در این حالت ابتدا به کمک پارامترهای S ، ضریب شکست n و امپدانس z را یافته و به کمک روابط زیر ضریب گذردهی الکتریکی (۴) و نفوذپذیری مغناطیسی (۵) به دست می آید.

$$\epsilon = \frac{n}{z} \quad (۱)$$

$$\mu = nz \quad (۲)$$

برای استفاده از روابطی که در اینجا برای به دست آوردن ضرایب گذردهی الکتریکی (۴) و نفوذپذیری مغناطیسی (۵) معرفی خواهد شد، یک شرط اساسی باید رعایت شود. و آن همگن بودن مؤثر ابعاد ساختار سلول واحد، در جهت تابش موج در فرکانس مورد نظر است. وقتی که موج با یک صفحه همگن با ضخامت d مواجه می شود، به دو موج منعکس

تعامل موج و رولایه، آنتن در فرکانس پایین‌تر از فرکانس تشدید آنتن اولیه تشدید کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اگر طول سلول واحد سازنده ابر سطح روی آنتن را 8.33 mm انتخاب کنیم، فرکانس تشدید آنتن با رولایه ی ابر سطح، حدود 2 GHz از فرکانس تشدید آنتن اولیه بدون رولایه پایین‌تر می‌آید.



(ج)

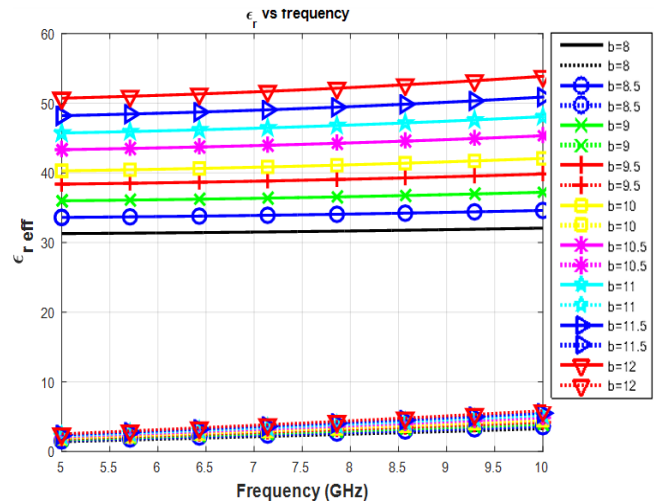


(د)

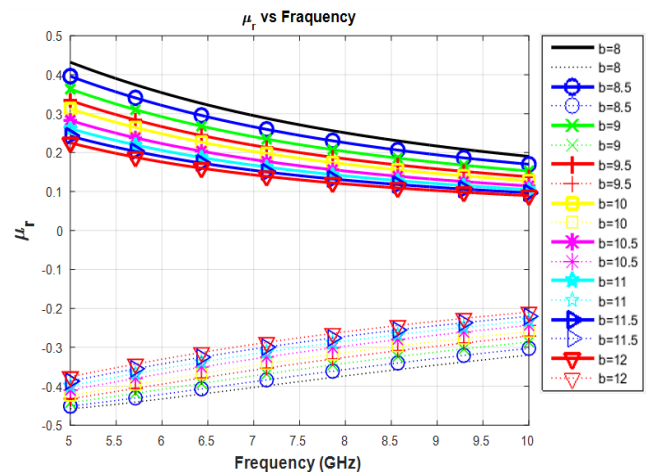
شکل ۵: آنتن اولیه به همراه یک رولایه. (الف) رولایه مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی. (ب) یک رولایه معادل با ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی ایجاد شده توسط ابر سطح $\epsilon=32$ و $\mu=0.3$. (ج) نمای روی نمونه آنتن ساخته شده. (د) نمای پشت نمونه آنتن ساخته شده.

این نتایج نشان می‌دهند که رولایه ی مبتنی بر این ابر سطح می‌تواند برای این آنتن مانند یک ساختار با ضریب گذردهی الکتریکی بالا عمل کند. اگر به جای رولایه مبتنی بر ابر سطح از یک ساختار رولایه ی معادل با ضریب گذردهی الکتریکی بالا ($\epsilon = 32, \mu = 0.3$) در نرم‌افزار، روی آنتن استفاده و شبیه‌سازی (شکل ۵-ب) و فرکانس تشدید با آنتن با رولایه ی ابر سطح مقایسه شود، نتیجه نشان داده شده در شکل ۶ حاصل خواهد شد. در اینجا همچنین میزان کوچک‌سازی انجام شده توسط

حدود ۳۲ و قسمت حقیقی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بین ۰ و ۱ است. همچنین مشاهده می‌شود که قسمت موهومی ضرایب گذردهی الکتریکی (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) نزدیک صفر است و این یعنی این که تلفات ابر سطح ناشی از آرایش این نوع سلول واحد بسیار کم است.



شکل ۳: قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی برای سلول واحد پیشنهادی به ازای تغییرات طول سلول واحد. منحنی‌های ممتد مربوط به قسمت حقیقی و منحنی‌های خط چین مربوط به قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی می‌باشند.

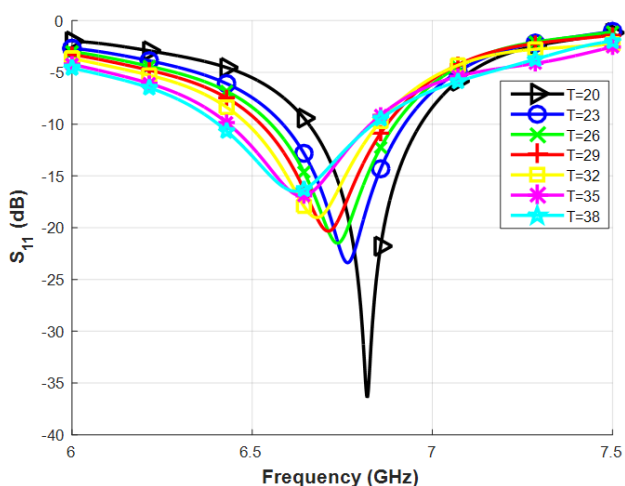


شکل ۴: قسمت حقیقی و موهومی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی برای سلول واحد پیشنهادی به ازای تغییرات طول سلول واحد. منحنی‌های ممتد مربوط به قسمت حقیقی و منحنی‌های خط چین مربوط به قسمت موهومی ضریب نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشند.

۳- ساختار آنتن به همراه رولایه

اگر ابر سطح معرفی شده را به عنوان رولایه برای آنتن استفاده شود (شکل ۵-الف)، انتظار می‌رود با ایجاد ضریب گذردهی الکتریکی بالا به دلیل

دلیلی اصلی می باشد، این است که ساختار ابر سطح به صورت یک سطح با ابعاد بی نهایت روی آنتن قرار نگرفته است و ابعاد آن به اندازه ی آنتن است ولی منحنی های نشان داده شده در شکل های ۳ و ۴ مربوط به ساختار ابر سطح با ابعاد نامحدود است. بنابراین، انتظار می رود با افزایش ابعاد زیر لایه و زمین آنتن و در نتیجه افزایش ابعاد کلی ابر سطح، منحنی S_{11} آنتن با رولایه ی ابر سطح به سمت منحنی S_{11} آنتن ۲ در نمودار شکل (۶-الف) حرکت کند. همچنین هنگام تست این آنتن که ساخت و چسباندن رولایه روی آنتن با دقت بالا انجام شد، فرکانس تشدید آنتن ساخته شده حدود ۹۵ مگاهرتز بالاتر از فرکانس تشدید آنتن شبیه سازی شده در نرم افزار ایجاد می شود. دلیل آن فاصله ۴۰ میکرونی هوایی (این مقدار فاصله را با جاروب فاصله هوایی بین ابر سطح و آنتن در نرم افزار به دست آمد) ایجاد شده بین رولایه ابر سطح و آنتن می باشد. این فاصله هوایی به دلیل فلزکاری مس روی آنتن توسط قلع است که برای جلوگیری از اکسید شدن مس آنتن روی آن کشیده می شود. با ایجاد این فاصله در نرم افزار و شبیه سازی دوباره ی ساختار، نتیجه نرم افزار به ساخت بسیار نزدیک شد (شکل ۶-ب). در نمودارهای شکل ۷ نتیجه تغییر ابعاد زمین آنتن که به تبع آن ابعاد کلی ابر سطح نیز تغییر می کند مشاهده می شود.

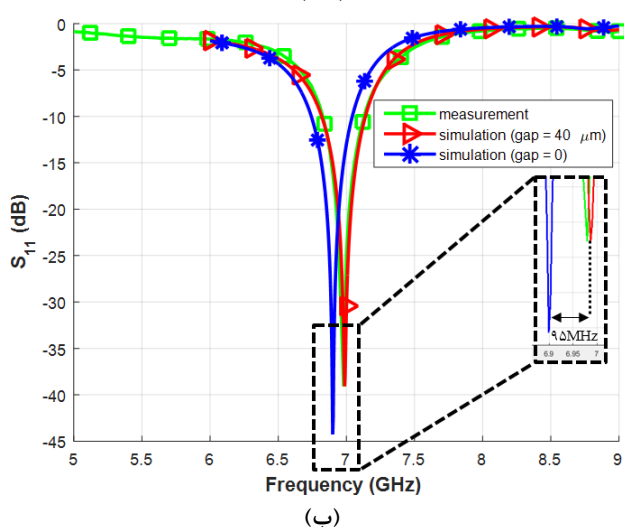
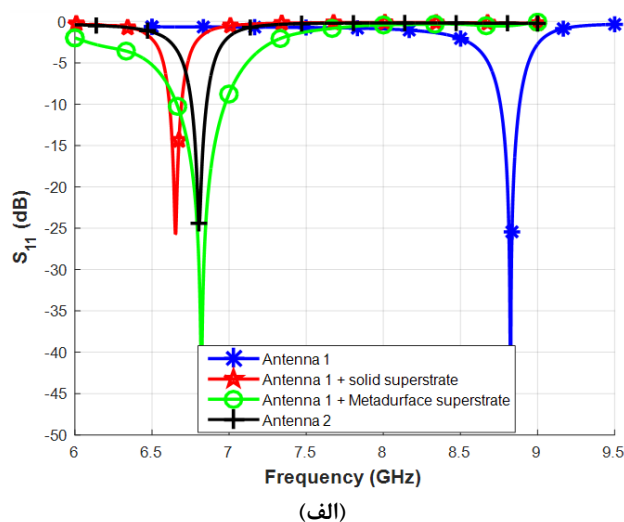


شکل ۷: بررسی تغییر ابعاد زمین آنتن و به تبع آن ابعاد رولایه ابر سطح (T نشان داده شده در نمودار، همان طول و عرض زمین آنتن و رولایه ی ابر سطح می باشد). مشاهده می کنید که با افزایش ابعاد ابر سطح، منحنی S_{11} به سمت منحنی S_{11} آنتن ۲ در شکل ۶ حرکت می کند.

جدول ۲: مقادیر ابعاد مشخص شده روی آنتن ۲

مقدار	پارامتر (mm)
14.6	P_{W2}
11.5	P_{L2}
28	T_2
2.25	F_{W2}
10	F_{L2}
1.27	D

رولایه ی مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی با طراحی یک آنتن جدید در فرکانس تشدید این آنتن نشان داده شده است. این آنتن، آنتن ۲ نامیده شده. در شکل ۹ این آنتن و در جدول ۲ نیز ابعاد آن را مشاهده می کنید. منحنی پارامتر S_{11} این آنتن نیز در شکل ۶ آورده شده است. مشاهده می شود که فرکانس کار آن روی فرکانس تشدید آنتن ۱ به همراه رولایه ابر سطح است.

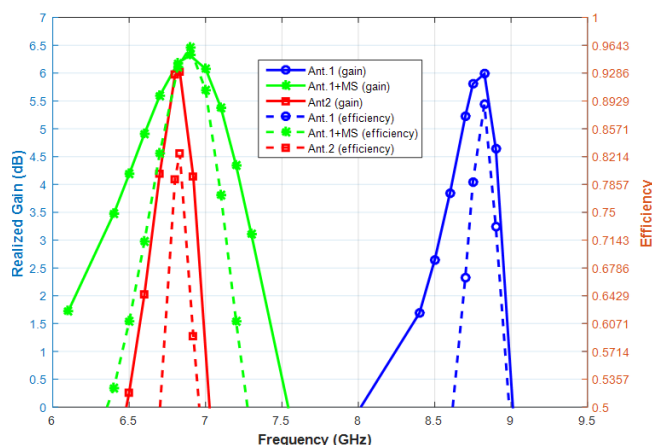


شکل ۶: (الف) نمودار S_{11} برای آنتن بدون رولایه، آنتن با رولایه مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی و آنتن با رولایه ی با ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نزدیک به پارامترهای ابر سطح. (ب) نمودار S_{11} مربوط به اندازه گیری و شبیه سازی آنتن با یک رولایه ی ابر سطح

همان طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می شود، می توان به دو دلیل اختلاف کوچک نشان داده شده در فرکانس تشدید منحنی های S_{11} آنتن با رولایه ی ابر سطح و آنتن ۲ را توجیه کرد. دلیل اول این است که برای رولایه ی نشان داده شده در شکل (۵-ب)، ضریب تلفات در نظر گرفته نشده است (چون ضریب تلفاتی که ساختار ابر سطح از خود نشان می دهد، طبق منحنی شکل ۳ خیلی کوچک است). دلیل دوم که

مقایسه نتایج شبیه‌سازی S_{11} ، بازدهی تشعشعی و بهره تشعشعی برای آنتن با رولایه ی مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی، آنتن ۱ و آنتن ۲ به ترتیب در شکل‌های ۶، ۱۰ و ۱۱ آورده شده‌است.

اگر بخواهیم میزان کوچک‌سازی با مقایسه پیچ‌های تشعشع‌کننده آنتن ۲ و آنتن جدید نشان داده شود، مشاهده می‌شود که این کاهش اندازه حدود ۳۲ درصد بوده و اگر میزان کوچک‌سازی با مقایسه ابعاد زمین و زیرلایه آنتن‌ها نشان داده شود، کاهش اندازه حدود ۴۹ درصد است. جدول ۳ اطلاعات کاملی را درباره خصوصیات تشعشعی هر آنتن و ابعاد آن‌ها در فرکانس تشدید نشان می‌دهد. با مقایسه ردیف اول و دوم جدول می‌توان اثر رولایه ی ابر سطح را بر روی پارامترهای تشعشعی آنتن ۱ مشاهده کرد. به عنوان مثال، مشاهده می‌شود که سه پارامتر پهنای باند نسبی، بهره تشعشعی و بازدهی تشعشعی برای آنتن با رولایه در فرکانس تشدید جدید بیشتر از آنتن اولیه در فرکانس تشدید قبلی است. در جدول ۴ به طور مختصر درباره مزایا، معایب و چالش‌های استفاده از این روش پیشنهادی و مقایسه آن با سایر روش‌های کوچک‌سازی آنتن ریزنواری بحث شده است. روش‌های کوچک‌سازی گفته‌شده در جدول ۴ به طور کامل در مرجع [۵] تحت عنوان یک مقاله مروری جدید مورد معرفی، بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

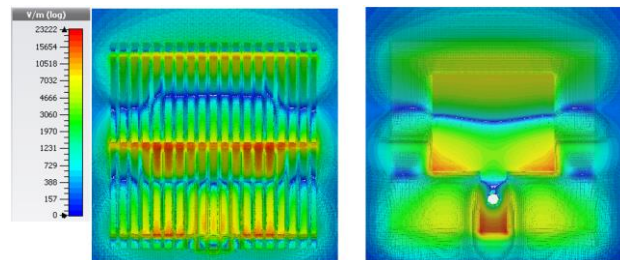


شکل ۱۰: منحنی‌های بهره و بازدهی تشعشعی برای آنتن ۱، آنتن ۲ و آنتن ۱ به همراه رولایه ابر سطح الکترومغناطیسی در فرکانس‌های حول فرکانس تشدید. منحنی‌های ممتد مربوط به بهره تشعشعی و منحنی‌های خط چین مربوط به بازدهی تشعشعی می‌باشند. در این نمودار منظور از MS همان رولایه ی ابر سطح است.

جدول ۳: مقایسه پارامترهای آنتن ۱ با رولایه ابر سطح و آنتن ۲

آنتن	آنتن ۱	آنتن ۱+ ابر سطح	آنتن ۲ (آنتن مقایسه)
فرکانس تشدید (GHz)	8.82	6.89	6.83
ابعاد زمین (T(mm))	20×20	20×20	28×28
ابعاد پیچ (mm)	9.4×12	9.4×12	11.5×14.6
پهنای باند نسبی	1.4%	4.35%	1.4%
بهره تشعشعی (dB)	6.23	6.32	6.1
بازدهی تشعشعی	88%	96%	82%

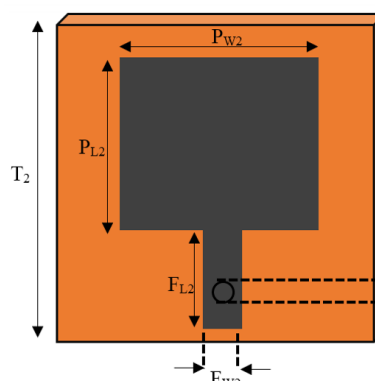
می‌توان گفت یکی از دلایل ایجاد ضریب گذردهی الکتریکی بالا در ابرسطحی که روی آنتن قرار می‌گیرد، ایجاد خازن بزرگ ناشی از تأثیر میدان آنتن بین سلول واحدهای ابر سطح به خصوص سه فاصله هوایی که به صورت افقی در ساختار ابر سطح تشکیل شده‌است، می‌باشد. در شکل (۸-الف) این میدان در سه ناحیه از فواصل هوایی ابر سطح به خوبی مشاهده می‌شود که به ترتیب ناشی از میدان‌های تشعشعی لبه بالا و پایین پیچ و لبه ی ابتدایی خط تغذیه می‌باشند.



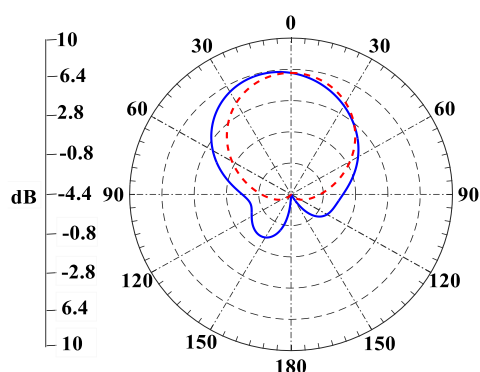
شکل ۸: (الف) توزیع میدان الکتریکی روی آنتن دارای ابر سطح الکترومغناطیسی. (ب) توزیع میدان الکتریکی روی ابر سطح. در شکل (الف) سه ناحیه اصلی تشعشع میدان از پیچ مشخص شده‌اند که تأثیر آن‌ها را در شکل (ب) بر ابر سطح به خصوص سه فاصله هوایی مشخص شده مشاهده می‌کنید.

۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عملکرد این رولایه

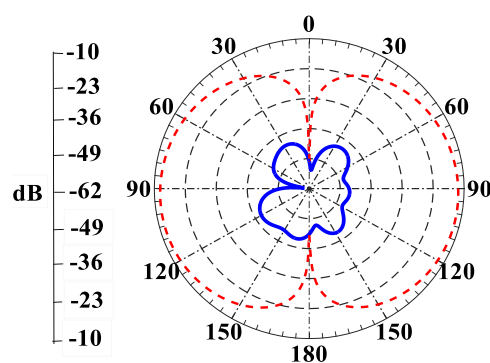
در این قسمت درباره آنتن ۲ که در بخش قبل باهدف مقایسه ابعاد و در نتیجه نشان دادن میزان کوچک‌سازی معرفی شد بحث می‌شود. در طراحی این آنتن سعی شده است خصوصیات و پارامترهای تشعشعی آن حتی‌الامکان به آنتن با رولایه ابر سطح نزدیک باشد، تا بتوان افزودن بر مقایسه ابعاد پیچ‌ها ساختار کلی آنتن‌ها را نیز عادلانه‌تر مقایسه کرد. زیرلایه این آنتن مانند آنتن ۱ مربعی شکل و از جنس Rogers RO4003C با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r=3.38$ و ضریب تلفات $\tan\delta=0.0027$ و ضخامت 0.8128mm می‌باشد. سایر خصوصیات آنتن را در شکل ۹ و جدول ۲ مشاهده می‌کنید.



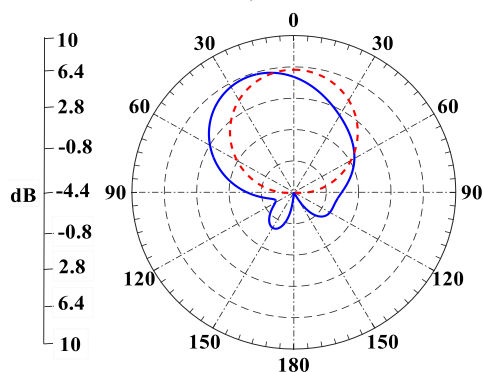
شکل ۹: ساختار آنتن ۲. این آنتن در فرکانس تشدید آنتن ۱ به همراه رولایه ی ابر سطح طراحی شده است و هدف از طراحی آن مقایسه ابعاد جهت آگاهی از میزان کوچک‌سازی است.



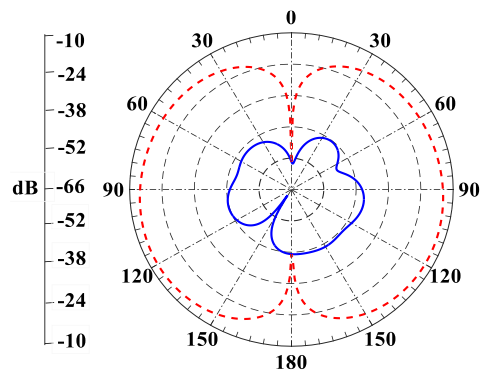
(ب)



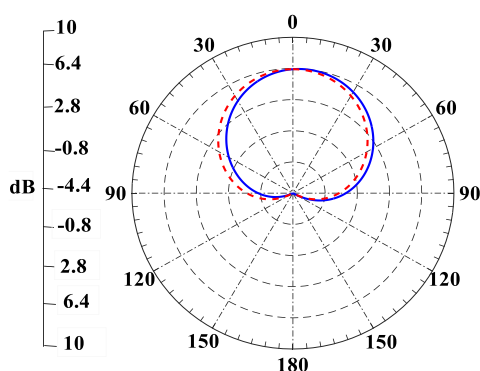
(الف)



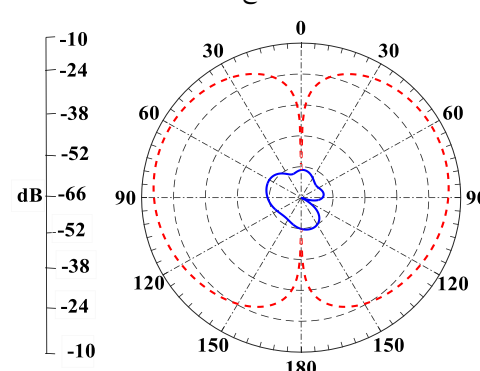
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۱: الگوی بهره تشعشی میدان E (منحنی‌های ممتد) و H (منحنی‌های خط‌چین). (الف) الگوی تشعشی متقاطع در آنتن ۱، (ب) الگوی تشعشی همسان در آنتن ۱، (ج) الگوی تشعشی متقاطع در آنتن ۲، (د) الگوی تشعشی همسان در آنتن ۲، (ه) الگوی تشعشی متقاطع در آنتن ۱ به همراه رولایه ابر سطح الکترومغناطیسی، (و) الگوی تشعشی همسان در آنتن ۱ به همراه رولایه ابر سطح الکترومغناطیسی.

جدول ۴: مقایسه طرح پیشنهادی با سایر تکنیک‌های کوچک‌سازی آنتن میکرو استریپ

تکنیک کوچک‌سازی	خصوصیات	مزایا	معایب
بارگذاری ماده‌ای	زیرلایه های سرامیکی و زیرلایه های با ضریب دی‌الکتریک بالا	طراحی آسان و درجه کوچک‌سازی بالا	ماده گران‌قیمت و پهنای باند محدود
استفاده از پست اتصال کوتاه و چندلایه کردن آنتن	پین‌ها و دیواره‌های اتصال کوتاه	قابلیت کوچک‌سازی تا ۲۵ درصد ابعاد اصلی	ساختار پیچیده، بهره و سمت دهی پایین
تغییر شکل و ایجاد شکاف در پچ	آنتن‌های فرکتالی و شکاف‌های موجود در پچ	قابلیت کوچک‌سازی تا حدود ۱۵ درصد ابعاد اصلی و دارای پهنای باند مناسب	ساختار پیچیده، تغییر خصوصیات تشعشی و تغییر در خلوص پلاریزاسیون
اصلاح صفحه زمین	استفاده از DGS و شکاف در زمین	قابلیت کوچک‌سازی تا حدود ۱۵ درصد ابعاد اصلی	بازدهی پایین و افزایش در گلبزرگ پستی

استفاده از ساختارهای فرامادی	استفاده از زیرلایه های ENG، DNG و MNG	درجه کوچک‌سازی بالا	ساختار پیچیده، پهنای باند محدود، بازدهی پایین
ساختار پیشنهادی	استفاده از رولایه ی ابر سطح الکترومغناطیسی	کوچک‌سازی ۵۰ درصدی آنتن با حفظ ساختار اصلی و اغلب پارامترهای تشعشی و ساخت آسان	کاهش میزان کمی از سمت دهی آنتن

۵- نتیجه

در این مقاله یک روش جدید کاهش اندازه آنتن با استفاده از رولایه ی مبتنی بر ابر سطح الکترومغناطیسی معرفی شد. چون هدف کاهش ابعاد آنتن است، این ابر سطح به صورت مستقیم و بدون هیچ فاصله هوایی روی آنتن قرار داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش اندازه پچ تشعشع کننده در مقایسه با آنتن مشابه بدون رولایه در این فرکانس حدود ۳۲ درصد و کاهش اندازه ابعاد کلی آنتن شامل زمین و زیرلایه حدود ۴۹ درصد است. همچنین این ابر سطح علاوه بر کوچک‌سازی باعث بهبود بهره تشعشی، افزایش پهنای باند نسبی و افزایش چشم‌گیر بازدهی تشعشی در فرکانس تشدید جدید، نسبت به آنتن اولیه در فرکانس تشدیدش شده است.

مراجع

- [3] L. Liu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Compact multiple-input-multiple-output antenna using quasi-self-complementary antenna structures for ultra wideband applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(13), pp.1021-1029, 2014.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, ed. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2003.
- [5] M. U. Khan, M. S. Sharawi, and R. Mittra, "Microstrip patch antenna miniaturization techniques: a review," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(9), pp.913-922, 2015.
- [6] C. Caloz, and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [7] C. L. Holloway, et al. "An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials," *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 54.2, 10-35, 2012.
- [8] H. L. Zhu, X. H. Liu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Frequency-Reconfigurable Antenna Using Metasurface," *Antennas and Propagation*, *IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 80-85, 2014.
- [9] فرهاد خسروی افوسی، محمدنقی آذرمنش، جواد نورینیا، "به کارگیری ساختارهای EBG به منظور افزایش پهنای باند و دایرکتیویته ی آنتن میکرواستریپ "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳، شماره ۲.
- [10] X. Chen, et al. "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials," *Physical Review E* 70.1 016608, 2004.
- [11] A. M. Nicolson, and G. F. Ross "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 19.4, 377-382, 1970.
- [1] D. F. Sievenpiper, D. C. Dawson, M. M. Jacob, T. Kanar, S. Kim, J. Long, and R. G. Quarfoth, "Experimental validation of performance limits and design guidelines for small antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(1), pp.8-19, 2012.
- [2] N. Behdad, M. Li, and Y. Yusuf, "A very low-profile, omnidirectional, ultra wideband antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, pp.280-283, 2013.