

کاهش ابعاد آنتن شیپوری مخروطی در حضور لنز فرامواد

عاطفه صداقت^۱، کارشناس ارشد؛ فرزاد مهاجری^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران - asedaghat90@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران - mohajeri@shirazu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک آنتن شیپوری مخروطی در باند x و در حضور لنزی از جنس فرامواد معرفی می‌شود. لنز فرامواد در دهانه‌ی آنتن شیپوری کوتاه که طول آن نصف حالت بهینه مربوطه است، قرار می‌گیرد. سرعت فاز در محیط لنز فرامواد بیشتر از سرعت فاز در محیط بدون لنز است، بنابراین توزیع فاز در دهانه‌ی آنتن شیپوری یکنواخت می‌شود و بهره‌ی آنتن شیپوری کوتاه، افزایش می‌یابد. سلول‌های فرامواد به صورت برد مدار چاپی که ساخت آسان و هزینه‌ی مناسب دارند، طراحی شده‌اند. مشخصات هندسی لنز با استفاده از فرمول‌های طراحی، محاسبه و نهایتاً از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات برای رسیدن به بهره و خصوصیات تشعشعی مناسب در باند فرکانسی مورد نظر، استفاده شده است. خصوصیات تشعشعی آنتن با لنز فرامواد، مشابه با آنتن با طول بهینه در باند فرکانسی مورد نظر است، با این تفاوت که وزن و حجم این نوع آنتن‌ها، کاهش یافته پس عملکرد بهتری در سیستم‌های ماهواره‌ای و رادارها دارند.

واژه‌های کلیدی: آنتن شیپوری مخروطی، لنز فرامواد، توزیع فاز یکنواخت.

Size Reduction of Conical Horn Antennas in Presence of Metamaterial Lens

Atefe Sedaghat¹, MSc; Farzad Mohajeri², Associate professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of shiraz, shiraz, Iran, Email: asedaghat90@yahoo.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of shiraz, shiraz, Iran, Email: mohajeri@shirazu.ac.ir

Abstract: In this paper, a conical horn antenna is introduced in the X-band and in the presence of a metamaterial lens. The metamaterial lens is located at the aperture of a short horn antenna that the length of the horn is half the one of the corresponding optimum versions. The phase velocity in the metamaterial lens is more than the phase velocity in an environment without lens, so the phase distribution in the aperture of antenna is uniform and the gain of the short horn antenna increases. Metamaterial cells are designed in the form of printed circuit board that have easy to build and suitable cost. The geometrical characteristics of metamaterial lens is calculated by designed formulas and finally; particles swarm optimization algorithm is used to achieve proper gain and radiation characteristics in the desired frequency band. The radiation characteristics of an antenna with a metamaterial lens are similar to that of an antenna with optimum length in the desired frequency band; the difference is that the weight and volume of these antennas are reduced, so they have better performance in satellite systems and radars.

Keywords: conical horn antenna, metamaterial lens, uniform phase distribution.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸ و ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۴

نام نویسنده مسئول: فرزاد مهاجری

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه شیراز- شیراز- ایران.

۱- مقدمه

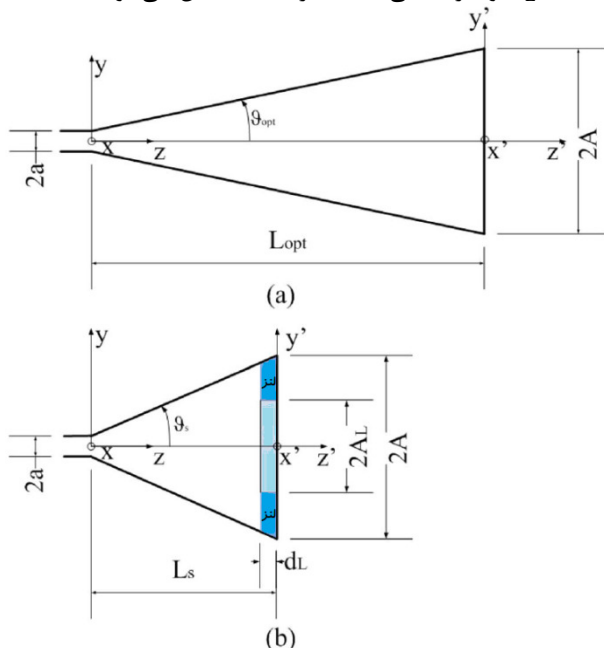
مقاله سعی کردیم، اجزای فلزی سلول فرامواد به صورت چاپ شده بر روی برد عایق باشد. برد مدار چاپی از دقت ساخت بالا و هزینه کم برخوردار است [۱۶-۱۸].

ساختار این مقاله به صورت زیر است:

در بخش ۲ شعاع داخلی و ضخامت لنز در باند X، محاسبه می‌شود؛ نحوه‌ی برخورد امواج به سلول بررسی می‌شود؛ سلول پیشنهادی طراحی و در باند مورد نظر بهینه شده است؛ در بخش ۳ ساختار آنتن در باند X، به همراه آرایه‌ای از سلول‌های فرامواد نشان داده می‌شود. آنتن تو سطر الگوریتم تجمع ذرات (PSO) بهینه شده و بهترین مقادیر بهره در پهنای باند مورد نظر حاصل می‌شود و در بخش ۴ مشخصات تشعشعی آنتن با لنز فرامواد و بدون لنز فرامواد و آنتن با ابعاد بهینه مربوطه، مقایسه می‌گردد، نهایتاً نتایج در بخش ۵ آورده شده است.

۲- طراحی سلول فرامواد

در آنتن‌های شیپوری با طول کم، به علت عدم توزیع یکنواخت فاز در دهانه‌ی آنتن، بهره و الگوی تشعشعی خوبی مشاهده نمی‌شود. برای حل این مسأله، ساختار فرامواد به صورت لنز در دهانه‌ی آنتن شیپوری به صورت حلقوی نزدیک دیواره‌ی آنتن با شعاع داخلی مشخص، قرار می‌گیرد (شکل ۱). این ساختار به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت عبور موج را داشته و مقادیر ضریب شکست نزدیک به صفر داشته باشد. در شکل ۱ هندسه دو بعدی آنتن شیپوری در حالت بهینه و حالت کوتاه بار شده با لنز نمایش داده شده است؛ آنتن شیپوری با حجم کمتر همان ابعاد دهانه آنتن بهینه را دارد با این تفاوت که طول آن کاهش یافته است. لنز، درون آنتن واقع شده و با مشخصات ضخامت d_L و قطر داخلی دهانه لنز $2A_L$ معین می‌شود.



شکل ۱: نمایش دو بعدی آنتن در (a) حالت بهینه (b) آنتن با طول کمتر از حالت بهینه در حضور لنز فرامواد [۱۶]

در دهه‌های اخیر، دسته‌ای از ساختارهای الکترومغناطیسی مصنوعی به عنوان فرامواد ساخته شده‌اند. پارامترهای محیطی مانند ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب گذردهی مغناطیسی در فرامواد، منفی یا کوچکتر از یک است؛ بنابراین ضریب شکست در آنها منفی یا مقادیر مثبت کوچک و نزدیک به صفر است [۱،۲].

در واقع، فرامواد یک ترکیب ماکروسکوپی شامل آرایه‌ای از اجزا کوچک تکرار شونده‌ی فلزی در محیطی با ضریب عایقی مشخص می‌باشند. اندازه‌ی سلول‌های فرامواد بسیار کوچکتر از اندازه طول موج هدایت است، بنابراین فرامواد به عنوان مواد همگن شناخته می‌شوند و با ضرایب نفوذپذیری نسبی تو صیف می‌گردند [۲]. برای دست‌یابی به ضریب نفوذپذیری الکتریکی مؤثر کوچکتر از یک، ساختار فرامواد شامل آرایه‌ای از سیم باریک فلزی است [۳،۱]؛ در حالی که آرایه‌ای از حلقه‌ی شکافدار فلزی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی کوچکتر از یک را نتیجه می‌دهد [۴،۱].

فرامواد کاربردهای زیادی دارند؛ به عنوان مثال بهبود خصوصیات تشعشعی در آنتن‌های میکرواستریپ با پوشاندن آرایه‌ای از سلول‌های فرامواد در مقابل آنتن میکرواستریپ [۴،۵]، افزایش بهره در آنتن‌های مونوپل [۷]، افزایش بهره در برخی آنتن‌های سر-آتش خاص [۲۱]، کاهش سطح گلبرگ‌های فرعی در آنتن‌های شیپوری که به عنوان سطح امپدانس بالا، در دیواره داخلی آنتن شیپوری مستطیلی قرار می‌گیرند [۶]، بهبود عملکرد ساختارهای فیلتری [۲۲] و...

آنتن‌های شیپوری کاربردهای بسیار زیادی در سیستم‌های ماهواره‌ای و رادارها دارند. این کاربردهای فراوان به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این آنتن‌ها مانند پهنای باند مناسب، تطبیق پذیری، تغذیه‌ی نسبتاً آسان، ساخت آسان، بهره‌ی بالا و سمت‌گرایی خوب می‌باشد. بهره‌ی آنتن شیپوری رابطه‌ی مستقیم با ابعاد فیزیکی آنتن دارد، بنابراین آنتن‌های شیپوری معمولاً سنگین و حجیم هستند؛ آنتن‌های شیپوری با حجم و وزن کمتر کاربرد مؤثرتری در سیستم‌های ماهواره‌ای و رادارها می‌توانند داشته باشند [۸].

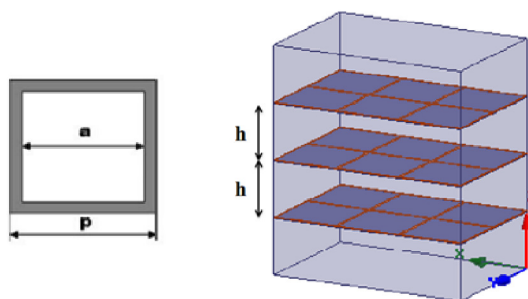
در مقالات مختلفی سعی شده است ابعاد فیزیکی آنتن شیپوری کاهش یابد. در این مقالات لنز فرامواد به صورت محیط سیمی [۱۲-۱۵] یا به صورت برد مدار چاپی [۹-۱۱]، به طور کامل در دهانه آنتن قرار گرفته است؛ اما سمت‌گرایی و بهره‌ی آنتن شیپوری با حجم کمتر، تنها در پهنای باند باریکی، افزایش یافته است.

در مقاله [۱۶] بهره‌ی آنتن در پهنای باند گسترده‌ای افزایش یافته است؛ در این مقاله لنز تنها در نزدیکی دیواره‌ی آنتن قرار گرفته است، سرعت فاز موج در محیط لنز بیشتر از سرعت فاز، در طول محور آنتن است، بنابراین فاز در دهانه‌ی آنتن یکنواخت می‌شود. لنز در این آنتن، از محیط سیمی تشکیل شده است، اما محیط سیمی از دقت ساخت بالایی برای این گونه لنزها، برخوردار نیست؛ به همین خاطر ما در این

هنگامی که امواج به محیط لنز در صفحه میدان الکتریکی می‌رسند، شامل مؤلفه‌ی مماسی میدان مغناطیسی و مؤلفه‌ی مایل (مؤلفه‌ی مماسی و عمودی) میدان الکتریکی هستند، بنابراین با زاویه‌ای برابر با زاویه باز شدگی آنتن به کناره‌های لنز می‌رسند. برای طراحی سلول فرامواد در صفحه میدان الکتریکی (صفحه $x-z$) باید یک موج TM به صورت مایل، به سلول تابانده شود، به همین دلیل از شرایط مرزی *master-slave* به منظور تابش موج، به صورت مایل، استفاده می‌کنیم. به صورت مشابه، در صفحه میدان مغناطیسی (صفحه $y-z$) باید یک موج TE کمتر از زاویه باز شدگی دهانه‌ی آنتن، به سلول برخورد داده‌شود. با توجه به نتایج مقاله [۱۶] می‌توان تصور کرد که با افزایش تعداد لنزهای فرامواد بتوان به نتایج بهتری دست یافت.

ساختار پیشنهادی به صورت شکل ۲ است. لنز از سه لایه برد عایق همراه با خطوط هادی متقاطع و به فاصله مساوی از هم تشکیل شده است که مقدار اولیه ضخامت لنز به اندازه ۲۰ mm محاسبه شد.

به دلیل محدودیت‌های ساخت، عایق راجرز RO4003 با ثابت عایق ۳/۳۸ و تناژت تلفات ۰/۰۰۲ انتخاب شد. هرچه ضخامت عایق کمتر باشد، مسلماً عبور موج با تلفات کمتری روبرو می‌شود. اما ضخامت‌های ۸mm و ۱۰ mm به دلیل انعطاف پذیری و خم شدگی مناسب نبودند؛ بنابراین ضخامت ۲۰ mm انتخاب شد. ضخامت فلز نیز ۰/۰۱۷ mm می‌باشد.



شکل ۲: هندسه سلول فرامواد

ابتدا a و p مربوط به هر سلول و فاصله h بین لنزها را در نرم افزار HFSS برای ضریب بازگشت S_{11} کمتر از -10 dB و اندازه ضریب انتقال S_{12} در حدود صفر دسیبل (جهت انتقال موج و عدم بازگشت موج از سطح لنز) و مقدار ضریب شکست نزدیک به صفر، تغییر دادیم تا به مقادیر مورد نظر رسیدیم. اعداد به صورت $p=12,58$ mm، $a=12,67$ mm و $h=12,13$ mm حاصل شد. طبق نمودار شکل ۳ موج به صورت کامل از محیط لنز عبور می‌کند.

با استفاده از روش اسمیت [۱۹] در نرم افزار متلب، مقادیر n ، ϵ و μ محاسبه و رسم شد. (شکل‌های ۴ تا ۶) قسمت موهومی ضرایب گذردهی تقریباً برابر صفر است که نشان دهنده تلفات ناچیز ساختار

در مقاله [۱۶] فرمول‌هایی برای طراحی لنز مسطح آورده شده که از مطالعات تئوری بر روی خصوصیات انتقال موج از ورقه ENZ ($\epsilon \approx 0$) به دست می‌آید، سپس درستی فرمول‌ها با شبیه سازی های تمام موج، تحقیق می‌شود. یک ماده ENZ و ضخامت d_L توسط تمام موج صفحه‌ای به صورت عمود مورد تابش قرار می‌گیرد. T ضریب انتقال موج در محیط سه‌گانه‌ی هوا، محیط لنز و هوا از رابطه (۱) به دست می‌آید. [۲۰].

$$T = \frac{\tau_1 \tau_2 e^{-jk_{ENZ} d_L}}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_{ENZ} d_L}} \quad (1)$$

که K_{ENZ} عدد موج در محیط لنز و τ_1, ρ_2, ρ_1 و τ_2 به ترتیب ضرایب انتقال و انعکاس در ابتدای ورود موج به محیط لنز و انتهای خروج موج از لنز است. φ نشان دهنده‌ی توزیع فاز روی دهانه‌ی آنتن شیپوری مخروطی است و برای هر نقطه روی دهانه‌ی آنتن شیپوری مطابق رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

$$\varphi(y', L) = \frac{k_0 A}{A - a} L \left(1 - \sqrt{1 + \frac{y'^2}{\left(\frac{A}{A-a}\right)^2 L^2}} \right) \quad (2)$$

که L طول آنتن شیپوری، k_0 عدد موج در فضای آزاد، A شعاع دهانه آنتن و a شعاع دهانه ابتدایی آنتن است.

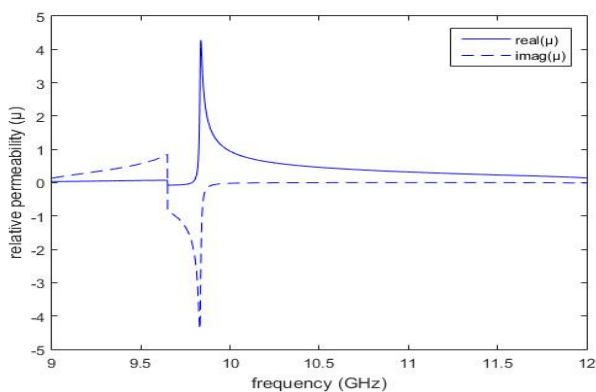
برای رسیدن به توزیع فاز بیکنواخت باید ابعاد لنز به درستی طراحی شود؛ در واقع ضخامت لنز باید به گونه‌ای به دست آید که فازدر لبه‌ها برای هر دو آنتن، یکسان باشد. فرض می‌کنیم ماده لنز بی تلف است و مقادیر ϵ و μ مربوط به لنز توسط طراح جایگزین شده است؛ ضخامت لنز (d_L) باید در رابطه (۳) صدق کند.

$$\begin{aligned} & [\varphi(y = A, L = L_s) + \text{Arg}[T(d_L)]] \\ & - [\varphi(y = 0, L = L_s) - k_0 d_L] = \\ & \varphi(y = A, L = L_{opt}) - \varphi(y = 0, L = L_{opt}) \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن L_{opt} و L_s به ترتیب طول آنتن بهینه و طول آنتن کوتاه شده هستند. سمت چپ معادله (۳) اختلاف فاز بین لبه آنتن ($y=A$) و مرکز دهانه‌ی آنتن کوتاه شده ($y=0$)، را نشان می‌دهد؛ در حالی که سمت راست معادله، همان اختلاف فاز را برای آنتن بهینه معرفی می‌کند. زمانی که ضخامت d_L تخمین زده شد، ما نیاز داریم شعاع داخلی لنز A_L را، به دست آوریم. این مقدار، تحت این مفهوم که پیشینه‌ی مجاز فاز در $y=A_L$ قبل از لنز، حداقل مساوی فاز در لبه‌ی آنتن بهینه می‌باشد، می‌تواند محاسبه شود. بنابراین شعاع داخلی لنز (A_L) توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۶].

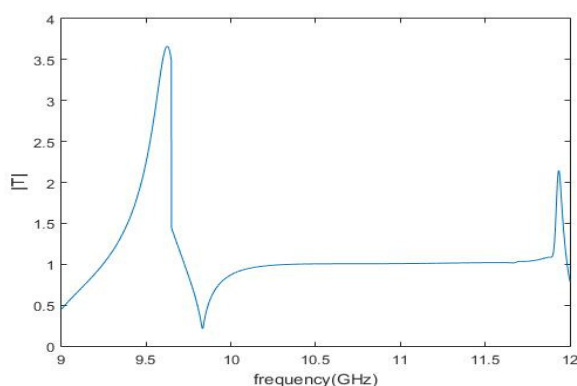
$$\varphi(y = A_L, L = L_s - d_L) = \varphi(y = A, L = L_{opt}) \quad (4)$$

مقادیر d_L و A_L برای بانده x در فرکانس مرکزی، به ترتیب ۲۰ mm و ۶۰/۵ mm حاصل شد. این اعداد با فرض $\epsilon = 0/1 \epsilon_0$ و $\mu = \mu_0$ به دست آمده است. ضمناً فرض شده که لنز از مواد ایده آل بی تلف ساخته شده است بنابراین مقادیر به دست آمده، تنها تقریبی از مقدار ضخامت لنز و شعاع داخلی لنز خواهند بود.

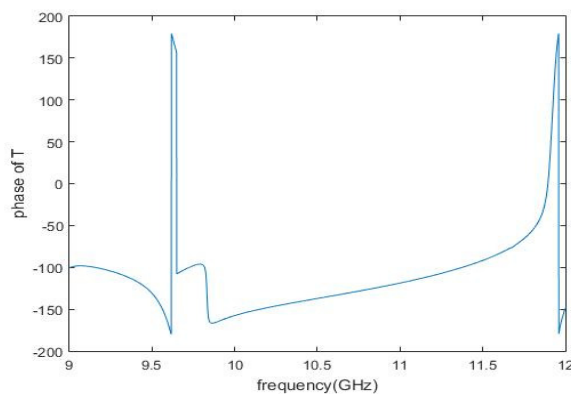


شکل ۶: مقادیر حقیقی و موهومی ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی سلول فرامواد

هم چنین با استفاده از رابطه‌ی (۱) اندازه و فاز ضریب انتقال محاسبه و رسم شد. (شکل‌های ۷ و ۸)
 همان طور که مشاهده می‌شود، اندازه T تقریباً برابر یک، در بازه‌ی فرکانسی ۱۰-۱۲ گیگاهرتز نشان‌دهنده انتقال کامل موج و فاز T به صورت میانگین در حدود ۱۰۰ درجه، در بازه‌ی فرکانسی ۱۰-۱۲ گیگاهرتز، نشان‌دهنده‌ی این است که جابه‌جا شدن فاز موج در محیط لنز کمتر از جابه‌جا شدن فاز موج در محیط آزاد، در نزدیکی محور آنتن، رخ می‌دهد.



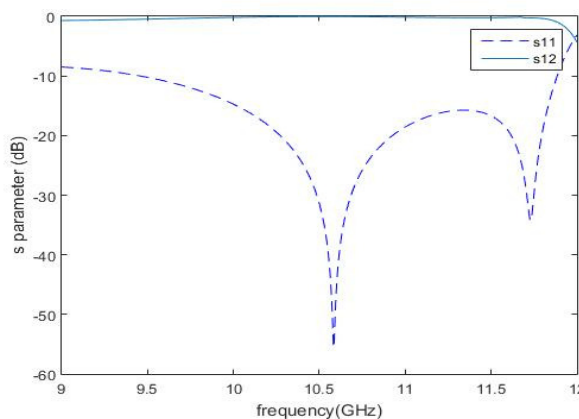
شکل ۷: اندازه ضریب انتقال موج در فرامواد



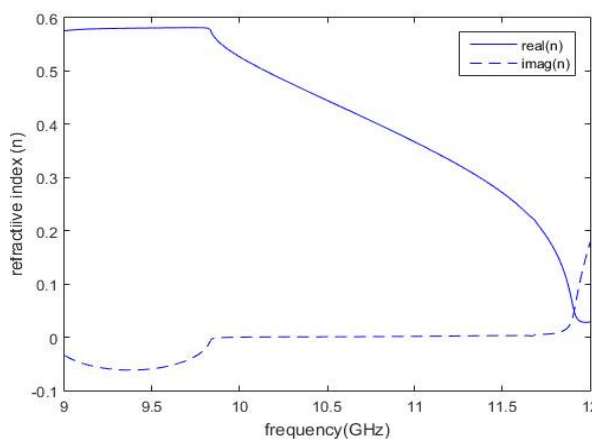
شکل ۸: فاز ضریب انتقال موج در ماده فرامواد

فرامواد می‌باشد. (شکل‌های ۵ و ۶) ضریب شکست نزدیک صفر طبق رابطه‌ی (۵) حاکی از افزایش سرعت موج در محیط لنز است.

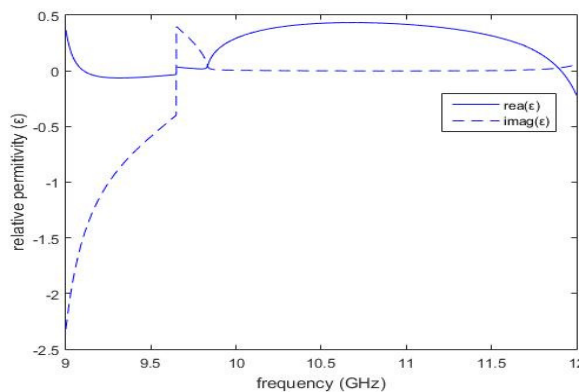
$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{n} \quad (5)$$



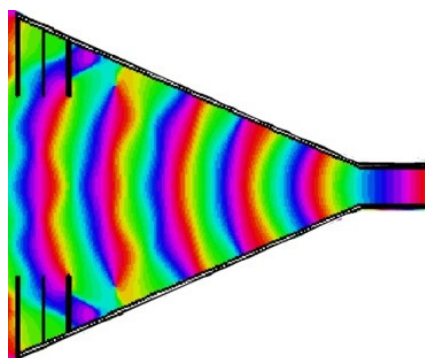
شکل ۹: اندازه پارامترهای پراکندگی سلول فرامواد بر حسب دسیبل



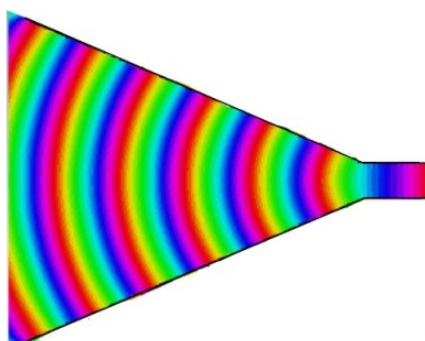
شکل ۱۰: مقادیر حقیقی و موهومی ضریب شکست سلول فرامواد



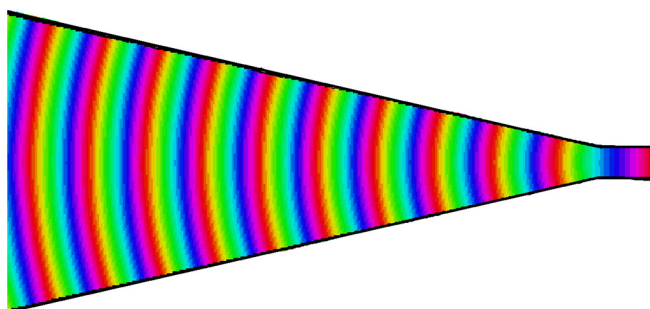
شکل ۱۱: مقادیر حقیقی و موهومی ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نسبی سلول فرامواد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰: توزیع فاز الکتریکی در حالت الف) آنتن مخروطی کوتاه شده با طول $L_s = 0.5L_{opt}$ در حضور لنز فرامواد، ب) آنتن مخروطی کوتاه شده با طول $L_s = 0.5L_{opt}$ بدون حضور لنز فرامواد ج) آنتن مخروطی در حالت بهینه با طول L_{opt}

آنتن با طولی نصف حالت بهینه و در نتیجه حجم کمتر، مشخصات تشعشعی مطلوبی در فرکانس مرکزی ۱۰/۵ گیگاهرتز دارد (شکل ۱۱). همان طور که مشاهده می‌شود بهره‌ی آنتن در حدود ۴dB الی ۶dB در پهنای باند گسترده‌ای در مقایسه با آنتن کوتاه بدون لنز افزایش یافته و بهره‌ی آنتن در حدود بهره‌ی آنتن بهینه می‌باشد (شکل ۱۲). پهنای باند، ۳ گیگاهرتز از فرکانس ۹ تا ۱۲ گیگاهرتز می‌باشد (شکل ۱۳) و سطح گلبرگ فرعی آنتن مقادیر قابل قبولی در پهنای باند مورد نظر دارد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

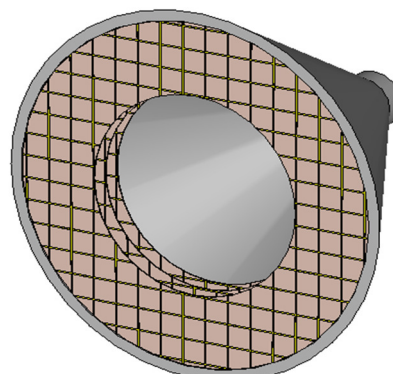
بنابراین طبق نمودارها، موج با سرعت بیشتری در محیط فرامواد، نسبت به میانه‌ی آنتن، حرکت می‌کند و انتظار داریم توزیع فاز در دهانه‌ی آنتن بعد از عبور امواج از لنز، یکنواخت شده و بهره‌ی آنتن مقادیر بیشتری را دارا شود.

در این مرحله، بازه‌ی فرکانسی ۱۰-۱۲ گیگاهرتز برای ما قابل قبول است، زیرا شبیه سازی دقیق‌تری از سلول هنگامی که در دهانه‌ی آنتن قرار می‌گیرد، انجام خواهیم داد و از ابزارهای بهینه‌سازی دقیق‌تری، استفاده خواهیم کرد.

۳- طراحی آنتن

آنتن شیپوری مخروطی در باند X در بازه‌ی فرکانسی ۹-۱۲ گیگاهرتز، با بیشترین بهره، طراحی شده و دارای طول ۳۱۳/۶۹۸ میلی‌متر و قطر دهانه‌ی خروجی ۱۸۳/۸۵۷ میلی‌متر می‌باشد. آنتن به اصطلاح در حالت بهینه قرار گرفته‌است.

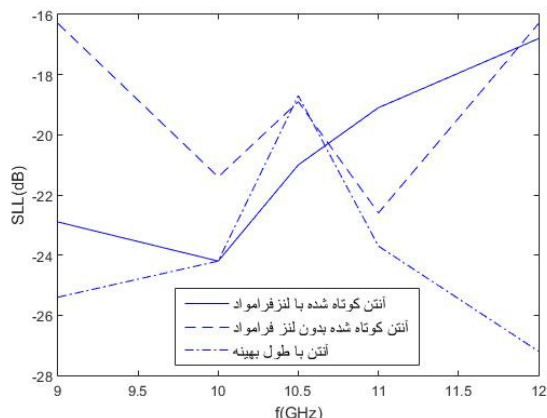
با مقادیر حاصل از بهینه‌سازی سلول در نرم افزار HFSS و مقدار محاسبه شده‌ی شعاع لنز به مقدار ۶۰/۵ میلی‌متر از رابطه‌ی (۴)، آرایه‌ای از سلول در دهانه‌ی آنتن شیپوری مخروطی با طولی نصف حالت بهینه، یعنی ۱۵۶/۸۴۹ میلی‌متر قرار گرفت (شکل ۹). سپس از نرم افزار CST جهت شبیه‌سازی آنتن استفاده شد.



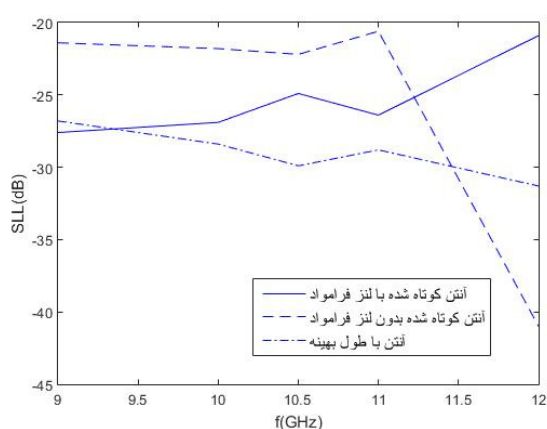
شکل ۹: نمایش سه بعدی آنتن شیپوری مخروطی با طول ۱۵۶.۸۴۹ میلی‌متر در حضور لنزهای فرامواد

۴- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)، سلول‌های فرامواد در نرم افزار CST بهینه شد. عملیات بهینه‌سازی بر روی پارامترهای a, p, h و جهت رسیدن به بهره بالای ۲۰dB، S_{11} کمتر از -۱۲dB و سطح گلبرگ فرعی کم‌تر از -۱۷dB انجام گرفت، بهترین نتایج در مقایسه با آنتن بدون لنز با طول نصف حالت بهینه و آنتن با طول بهینه در نمودارهای ۱۱ تا ۱۵ آورده شده است. توزیع فاز در دهانه‌ی آنتن با لنز نسبت به آنتن بدون لنز با همان طول، یکنواخت‌تر شده و توزیع فاز در دهانه آنتن با لنز مشابه توزیع فاز دهانه‌ی آنتن با طول بهینه است (شکل ۱۰).



شکل ۱۴: سطح لوب فرعی آنتن در زاویه سمت $\varphi = 0^\circ$



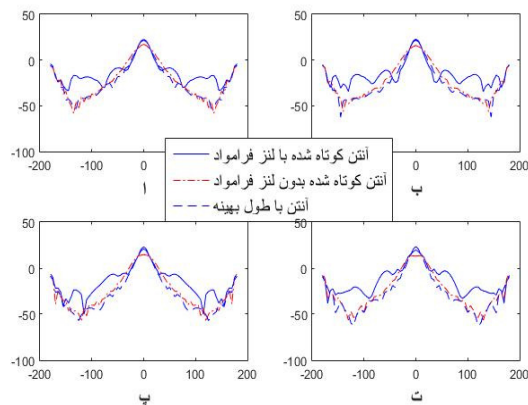
شکل ۱۵: سطح لوب فرعی آنتن در زاویه سمت $\varphi = 90^\circ$

۵- نتیجه

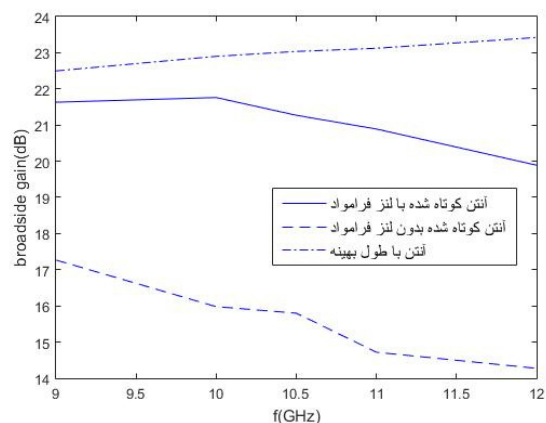
در این مقاله یک آنتن شیپوری مخروطی با طول کمتر از حالت بهینه در باند فرکانسی ۹-۱۲ گیگا هرتز، طراحی شده است. آنتن شیپوری با طول کم به دلیل توزیع فاز غیر یکنواخت در دهانه‌ی آنتن، دارای خصوصیات تشعشی نامناسب از جمله سمت گرایی و بهره‌ی کم می‌باشد.

در این مقاله یک لنز از جنس فرامواد به صورت حلقوی در نزدیکی دیواره با ضریب شکست نزدیک صفر و تلفات ناچیز، طراحی کردیم. در این طراحی لنز فرامواد شامل سه لایه برد مدار چاپی می‌باشد که این کار بهره‌ی آنتن را به صورت قابل قبولی افزایش داده است.

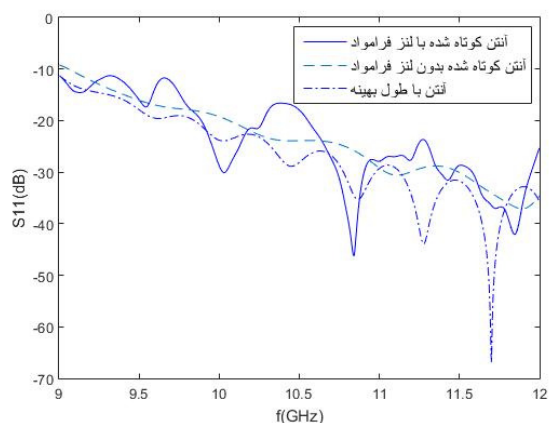
سلول فرامواد در نرم افزار HFSS طراحی شده و مقادیر پارامترهای آن، جهت عبور موج و عدم بازگشت موج از سطح ساختار لنز، تغییر داده و با محاسبه‌ی پارامترهای پراکندگی توسط روش اسمیت پارامترهای محیطی سلول محاسبه شده است مشاهده شد در تمام بازه‌ی فرکانسی، ساختار، خاصیت فراموادی با ضرائب گذردهی الکتریکی و مغناطیسی کوچکتر از یک دارد.



شکل ۱۱: الگوی تشعشی آنتن در زاویه سمت $\varphi = 0^\circ$ و در فرکانس ۹ گیگاهرتز (ب) ۱۰ گیگاهرتز (پ) ۱۱ گیگاهرتز (ت) ۱۲ گیگاهرتز



شکل ۱۲: مقایسه مقدار بهره‌ی آنتن کوتاه شده با لنز فرامواد و بدون لنز فرامواد و آنتن با طول بهینه



شکل ۱۳: نمودار S_{11} آنتن کوتاه شده با لنز فرامواد و بدون لنز فرامواد و آنتن با طول بهینه

- [10] K. Dongho, and J. Choi, "Analysis of antenna gain enhancement with a new planar metamaterial superstrate: An effective medium and a Fabry-Pérot resonance approach," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol.31,no.11, pp. 1289-1303, 2010.
- [11] Xiao, Zhigang, and Huiliang Xu, "Low refractive metamaterials for gain enhancement of horn antenna," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol.30,no.3, pp. 225-232, 2009.
- [12] Q. Wu, P. Pan, F. Meng, L. Li, and J. Wu, "A novel flat lens horn antenna designed based on zero refraction principle of metamaterials," *Appl. Phys. A*, vol. 87, no. 2 pp. 151-156, Jan. 2007.
- [13] S. Hrabar, M. Damir, and Z. Sipus, "Optimization of wire-mediumbased shortened horn antenna," In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on*, pp. 1-4. IEEE, 2010..
- [14] S. Hrabar, D. Bonefacic, and D. Muha, "Numerical and experimental investigation of horn antenna with embedded ENZ metamaterial lens," in *ICECom Int Conf.*, Dubrovnik, CR, Sep. 24-26, 2007, pp. 1-4..
- [15] S. Hrabar, D. Bonefacic, and D. Muha, "Application of wire-based metamaterials for antenna miniaturization," in *Proc. EuCAP2009*, Berlin, Mar. 23, pp. 620-623, 2009.
- [16] Davide Ramaccia, et al., "Broadband compact horn antennas by using EPS-ENZ metamaterial lens," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.61, no.6, pp.2929-2937, 2013.
- [17] Ramaccia, D., et al. "Experimental verification of broadband antennas loaded with metamaterials." *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, IEEE International Symposium on. IEEE, 2015.
- [18] Ramaccia, Davide, et al. "Exploiting intrinsic dispersion of metamaterials for designing broadband aperture antennas: Theory and experimental verification." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.64, no.3, pp.1141-1146, 2017.
- [19] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, and C. M. Soukoulis, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," *Phys. Rev. B*, vol. 65, no.19, p.195104, Apr. 2002.
- [20] Orfanidis, Sophocles J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. New Brunswick, NJ: Rutgers University, 2002.
- [21] فرزادخواجه خلیلی و محمدمامین هنرور "طراحی یک ساختار فراماده پیشنهادی در باند فرکانسی موج میلیمتری به منظور افزایش بهره یک آنتن سر-آتش" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۸، شماره ۴، صفحه ۱۵۱۷-۱۵۲۷، ۱۳۹۷.
- [22] خدیجه رضانی بلداجی، مسعود موحدی و علی غفورزاده یزدی "فیلتر میان گذر پهن باند با باند توقف وسیع براساس ساختارهای فراماده" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۹، شماره ۱، صفحه ۱۹۱-۱۹۹، ۱۳۹۸.
- ضریب شکست نزدیک به صفر نشان‌دهنده افزایش سرعت فاز موج در ساختار فرامواد و اندازه و فاز ضریب انتقال نیز گویای عبور موج و اختلاف فاز کم موج، در محیط فرامواد است.
- آنتن در نرم افزار CST شبیه سازی و از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات جهت رسیدن به حداکثر بهره، استفاده شده است. بهره‌ی آنتن حدود ۴dB الی ۶dB افزایش و پهنای باند آنتن، باند X را پوشش می‌دهد و سطح گلببرگ فرعی در پهنای باند مورد نظر، مقادیر کمتر از ۱۷dB- را دارد. آنتن قابل ساخت بوده و با حجم و وزن کم کاربرد مؤثری در صنعت ماهواره‌ای و رادار، دارد. ضمناً در آینده می‌توان پژوهش‌هایی بر روی شکل سلول و رسیدن به بهره‌ی بالاتر انجام داد.

مراجع

- [1] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. John Wiley & Sons; 2005 Nov 22.
- [2] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. Wiltshire, "Metamaterials and negative refractive index." *Science* vol.305, no. 5685, pp.788-792, 2004.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, R. D. J. Robbins, and W. J. Stewart "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena." *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, no.11, pp.2075-2084, 1999.
- [4] T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, Smith, D. R., J. B. Pendry and X. Zhang, "Terahertz magnetic response from artificial materials." *Science*, vol.303, no.5663, pp.1494-1496, 2004.
- [5] A. Jafargholi, & M. H. Mazaheri, "Broadband microstrip antenna using epsilon near zero metamaterials". *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol.9, no.14, pp.1612-1617, 2015.
- [6] A. Moradi and F. Mohajeri, "Side lobe level reduction and gain enhancement of a pyramidal horn antenna in the presence of metasurfaces," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, no. 3, pp. 295-301, Feb. 2018.
- [7] Jiang, Zhi Hao, Micah D. Gregory, and Douglas H. Werner, "Broadband high directivity multibeam emission through transformation optics-enabled metamaterial lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no.11, pp. 5063-5074, 2012.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2005.
- [9] He, Yingran, et al. "Short-Length and High-Aperture-Efficiency Horn Antenna Using Low-Loss Bulk Anisotropic Metamaterial." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, pp. 1642-1645, 2015.