مجله علمی- پژوهشی "الکترومغناطیس کاربردی"
سال اول، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۲،ص ۸-۱

تحلیل و شبیه‌سازی لنز چندلایه عرضی دی‌الکتریک

محمد مهدی تسخیری[۱*]، محمد خلج امیر حسینی[۲]

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲- استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت ۹۲/۷/۳۰ ، پذیرش ۹۲/۱۰/۱۷)

چکیده

روش‌های متعددی برای افزایش بهره آنتن وجود دارد. این روش‌ها با استفاده از آرایه‌ای کردن آنتن و یا با تغییر در ابعاد آنتن صورت‌گرفته است. استفاده از لنز، روشی دیگر جهت افزایش بهره آنتن می‌باشد. لنزی که در این مقاله مورد بررسی و طراحی قرار می‌گیرد، از نوع لنزهای مسطح است که ضریب دی‌الکتریک آن در راستای عرضی به‌صورت چندلایه‌ای می‌باشد. شبیه‌سازی این ساختار با استفاده از نرم‌افزار تمام موج HFSS انجام شده است. در این مدل، نسبت‌های بین دی‌الکتریک‌لایه‌های مختلف و عرض هر لایه به‌صورتی تعیین گردیده که زاویه خروجی تا حد امکان عمود بر سطح لنز باشد. این لنز مسطح، بهره آنتن موجبر دایروی را به اندازه ۵/۵dB افزایش می‌دهد. این لنز مستقل از فرکانس بوده و برای پهنای باند وسیع، عملکرد قابل قبولی دارد.

واژه‌های کلیدی:

لنز، لنز دی‌الکتریک، زاویه بحرانی، بهره آنتن

۱- مقدمه

روش‌های متعددی برای افزایش بهره آنتن وجود دارد. این روش‌ها با استفاده از آرایه‌ای کردن ساختار آنتن یا با تغییر در ابعاد آنتن صورت‌گرفته است. روش دیگری که سبب افزایش بهره آنتن می‌گردد استفاده از لنز می‌باشد. لنز ایده‌آل به این صورت عمل می‌کند که پرتوهای تابیده‌شده با زوایای مختلف بر ساختار آن را به زاویه عمود بر ساختار خود انتقال می‌دهد. اگر چنین ساختاری در مقابل یک آنتن قرار گیرد، سبب افزایش بهره آن می‌گردد.

لنزها به‌صورت ساختارهای متنوعی از جمله، مسطح و غیر مسطح و همچنین به‌صورت ساختارهای صفحه‌ای متامتریالی[۱] طراحی شده‌اند[۱]. نوع دیگری از لنزها به‌صورت ساختارهای پچ آرایه‌ای است، که با قرار گرفتن آرایه‌ها در فواصل معین از یکدیگر سبب افزایش بهره آنتن می‌گردد[۲].

روش دیگر، استفاده از لنزهای غیر همگن است که با ایجاد غیرهمگنی در راستای طولی و عرضی در ساختار لنز، سبب ایجاد خمیدگی پرتوی نور توسط لنز می‌گردد. ساخت چنین لنزی بسیار دشوار و تقریبا غیر ممکن است[۳].

یک نمونه از لنزهای غیرهمگن که برای افزایش بهره و همچنین موازی‌سازی پرتوهای موج تابشی استفاده می‌گردد، لنز لونبرگ است. لنز لونبرگ به‌صورت ساختار کروی می‌باشد. در این لنز، ماده تشکیل‌دهنده کره از ضریب دی‌الکتریکی تشکیل شده است که مقدار آن با نسبت توان دوم شعاع از سطح تا مرکز کاهش می‌یابد و نقطه کانونی لنز بر روی سطح مقطع بیرونی کره قرار دارد. مقدار این ضریب دی‌الکتریک برابر با $\varepsilon_r=2-(r/R)^2$ است.

شکل (۱ - ب) نشان‌دهنده لنز لونبرگ است. این لنز به علت ساختار کروی آن و همچنین مشکل بودن تهیه ماده غیر همگن با ضریب دی‌الکتریک خاص، استفاده از این نوع لنز را با دشواری همراه می‌کند[۲].

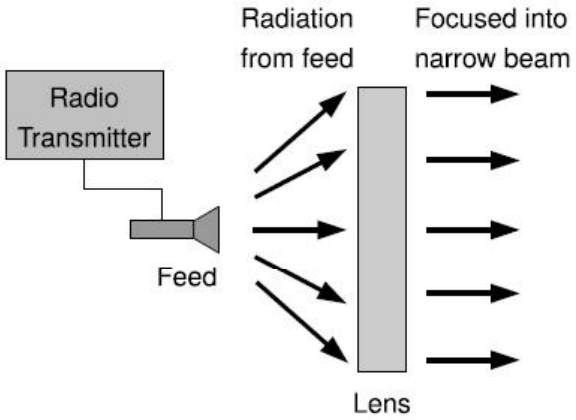
در مقالهٔ [۴]، لنز استوانه‌ای‌شکل، تشکیل‌شده از مواد

• رایانامه نویسنده پاسخگو: mm.taskhiri@ee.iust.ac.ir

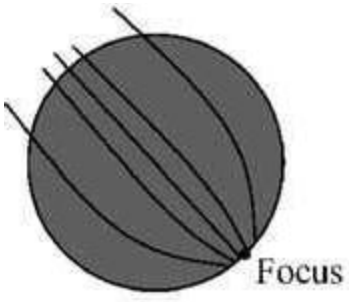
1- Metamatrial

متامتریالی است، که در پهنای باند وسیعی به افزایش بهره می‌پردازد. در مقالهٔ [۵] نیز با استفاده از ساختارهای متامتریالی با ضریب دی‌الکتریک نزدیک به صفر در درون یک هورن، به افزایش بهره در گستره وسیعی از پهنای باند می‌پردازد.

لنزی که در این مقاله مورد بررسی و طراحی قرار گرفته است از نوع لنزهای مسطح است که ضریب دی‌الکتریک آن در راستای عرضی به‌صورت چندلایه می‌باشد. شبیه‌سازی این ساختار با استفاده از نرم‌افزار تمام موج HFSS انجام گردیده است[۶]. شبیه‌سازی و ساخت یک قطعه غیر همگن امری دشوار است، لذا برای اینکه بتوان امکان ساخت آن را برای قطعه فراهم کرد، آن را به‌صورت چندلایه با ضرایب دی‌الکتریک متفاوت بایستی تقریب زد.



شکل ۱ -الف- لنز ایده‌آل



شکل ۱ -ب- لنز لونبرگ

در بخش دوم از این مقاله، روش طراحی لنز چندلایه عرضی دی‌الکتریک بیان می‌گردد. در این بخش، تئوری و روابط لازم برای طراحی لنز موجود است. در بخش سوم با استفاده از روابط بخش دوم، به طراحی لنز مورد نیاز برای یک آنتن موجبری دایروی پرداخته شده است. در این بخش، نمودارها و جداول ناشی از شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار تمام موج HFSS موجود است و در انتها در بخش چهارم از این مقاله، به نتیجه‌گیری از آنچه که در مقاله آمده است، پرداخته‌شده است.

۲- طراحی لنز

تحلیل دی‌الکتریک چندلایه با استفاده ازخاصیت هندسی نور صورت می‌گیرد. همان طور که می‌دانیم، در صورتی که موج تابشی از یک ناحیه چگال به یک ناحیه رقیق تحت یک زاویه معینی از خط عمود بر صفحه بین این دو محیط بتابد - در صورتی که از زاویه بحرانی بیشتر باشد - موج انتقالی به ناحیه رقیق تحت زاویه‌ای نزدیک به ۹۰ درجه از خط عمود، از محیط رقیق خارج می‌شود.

ساختار لنز در شکل (۲) نشان داده شده است. باید نسبت بین دی‌الکتریک‌لایه‌های مختلف و عرض هر لایه به نحوی تعیین گردد، که زاویه خروجی، عمود بر سطح لنز و یا در حوالی آن باشد.

در ابتدا معادلات اصلی بین سه محیط موجود که ناشی از قانون پیوستگی فاز می‌باشد، برابر است با:

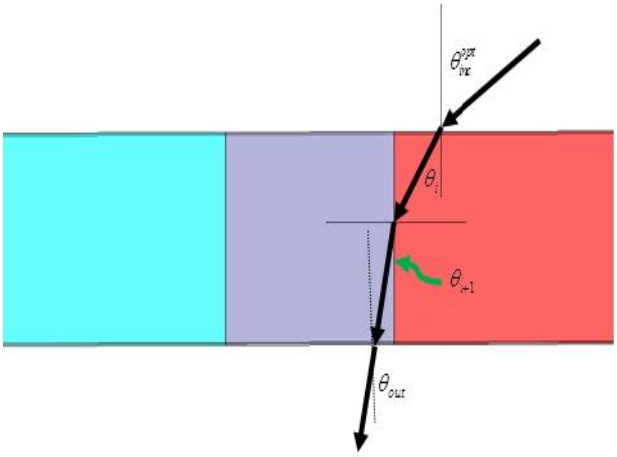
$$\sqrt{\varepsilon_0}\sin(\theta_{inc}) = \sqrt{\varepsilon_i}\sin(\theta_i) \qquad (۱)$$

$$\sqrt{\varepsilon_i}\cos(\theta_i) = \sqrt{\varepsilon_{i+1}}\cos(\theta_{i+1}) \qquad (۲)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{i+1}}\sin(\theta_{i+1}) = \sqrt{\varepsilon_0}\sin(\theta_{out}) \qquad (۳)$$

امکان ایجاد زاویه بحرانی برای هر یک از سه معادله (۱) و (۲) و (۳) بررسی می‌شود. در رابطه اول، وجود زاویه بحرانی، امری بی‌معنی است. به این دلیل که باید موج از هوا وارد ناحیه i تحت هر زاویه‌ای شود. به همین دلیل باید ضریب دی‌الکتریک ناحیه iام از ضریب دی‌الکتریک هوا بیشتر باشد. نسبت دی‌الکتریک ناحیه i+1 و i و همچنین عرض و ضخامت هر ناحیه، باید به نحوی تنظیم گردد که زاویه θ_i نزدیک به زاویه بحرانی برای ناحیه i ام گردد.

در این صورت، موج بازتابش از ناحیه i+1 ام در حدود ۹۰ درجه و زاویه θ_{i+1} در حدود صفر درجه است. در صورتی که زاویه تابشی به سطح بین ناحیه i+1 ام و هوا نزدیک به صفر درجه باشد، زاویه خروجی θ_{out} در حدود صفر درجه خواهد بود.



شکل ۲- قانون اسنل بین مرزهای لنز چندلایه عرضی دی‌الکتریک

برای اینکه زاویه خروجی θ_{out} مقدار بسیار کمی باشد بایستی زاویه تابش از ناحیه i ام به i+1 ام نزدیک به زاویه بحرانی باشد. پس به همین دلیل بایستی داشته باشیم:

$$\theta_{i+1}>\simeq 0^0 \qquad (۴)$$

$$\cos(\theta_i) \le \frac{\sqrt{\varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i}} \qquad (۵)$$

$$\sin(\theta_i) \ge \frac{\sqrt{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i}} \qquad (۶)$$

با قرار دادن رابطه (۶) در رابطه (۱) نتیجه می‌شود که :

$$\sin(\theta_{inc}) \ge \frac{\sqrt{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_0}} \qquad (۷)$$

$$\theta_{inc}^{opt} \ge \sin\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_0}}\right)^{-1} \qquad (۸)$$

زاویه تابش باید از مقدار θ_{inc}^{opt} بیشتر بوده و حداکثر مقدار آن می‌تواند برابر با ۹۰ درجه باشد.

از روی معادله ۷ بایستی:

$$\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1} < \varepsilon_0 \qquad (۹)$$
$$\varepsilon_{i+1} < \varepsilon_i$$

اگر معادله موج تابشی برای زاویه تابشی $\theta_{inc}=90$ در نظر گرفته شود در این صورت داریم:

$$\varepsilon_0 < \varepsilon_{i+1} \qquad (۱۰)$$

باید سعی شود که زاویه تابشی از مقدار θ_{inc}^{opt} فاصله نگیرد تا منجر به زاویه خروجی θ_{out} با فاصله زیاد از صفر درجه نگردد.

یک راه حل مناسب جهت تعیین تعداد لایه‌های عرضی و ضریب دی‌الکتریک مربوط به هر لایه از هدف، قرار دادن حداکثر زاویه خروجی θ_{out} می‌باشد.

پس از تعیین عرض و ضریب دی‌الکتریک هر لایه، باید به محاسبه مقدار ضخامت لنز (L) پرداخت. مقدار ضخامت لنز صفحه‌ای را باید به نحوی محاسبه کرد که پرتو تابشی به لنز، از یک‌لایه عرضی به لایه کناری منتقل شود تا فرایندی که در فوق مورد اشاره قرار گرفت، برای آن پرتو تابشی نیز رخ دهد.

به همین منظور بایستی داشته باشیم :

$$L\sin(\theta_i) > \Delta x \qquad (۱۱)$$

$$L > \frac{\sqrt{\varepsilon_i}}{\sqrt{\varepsilon_0}}\frac{\Delta x}{\sin(\theta_{in})} \qquad (۱۲)$$

پس بایستی مقدار ضخامت از حد معینی بیشتر شود تا این پدیده رخ دهد.

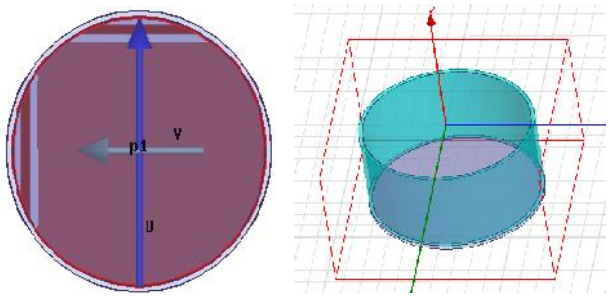
با استفاده از معادله (۱۲)، ضخامتی که برای هر لایه عرضی محاسبه می‌گردد، با مقدار محاسبه‌شده برای لایه‌های دیگر متفاوت است. در این صورت برای یک لنز مسطح، مقدار ضخامت آن را بر اساس افزایش بهره مورد نظر تعیین می‌کنیم؛ به این صورت که هرچه ضخامت لنز بیشتر شود، افزایش بهره نیز بیشتر می‌گردد. البته این مقدار ضخامت یک مقدار اشباعی نیز دارد.

نکته بسیار مهمی که در این مدل لنز قابل اهمیت است، عدم وابستگی ساختار لنز به فرکانس است. ابعاد عرضی لنز بر اساس معادله (۸) به‌دست می‌آید؛ این مقدار وابسته به فاصله لنز از سطح تشعشعی آنتن است. فاصله لنز باید به نحوی

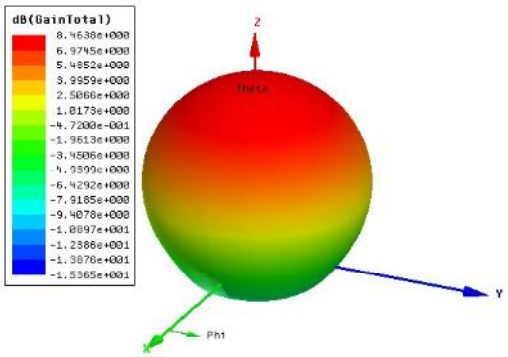
انتخاب شود که موج در ناحیه بین ناحیه دور و نزدیک آنتن باشد تا لنز بتواند بهترین عملکرد را داشته باشد.

۳-طراحی لنز برای یک آنتن موجبری دایروی

شکل(۳) یک موجبر دایروی را نشان می‌دهد که در فرکانس ۲/۴GHz تشعشع می‌کند. قطر دهانه تشعشعی این آنتن برابر ۹/۵cm است.



شکل ۳- آنتن موجبری دایروی(دو پرتی) و نحوه تغذیه مربوط به آن



شکل ۴- بهره آنتن بدون حضور لنز

این آنتن در فرکانس ۲/۴GHz دارای بهره‌ای برابر با ۸/۴dB می‌باشد که بهره کل در شکل (۴) نشان داده شده است. مقدار پارامتر پراکندگی نیز در شکل (۵) آمده است. همچنین بهره راست‌گرد و چپ‌گرد این آنتن در شکل (۶) نشان داده شده است.

حال با استفاده از معادلات ذکرشده بایستی به محاسبه دی‌الکتریک هر لایه پرداخت. بر اساس زاویه تابش‌های مختلف، مقدار ضریب دی‌الکتریک هر لایه تعیین می‌شود. تعداد لایه‌ها را برابر با ۸ فرض می‌کنیم. بر این اساس، مقادیر ضریب دی‌الکتریک و عرض هر لایه عبارت است از:

جدول ۱- مقادیر ضریب دی‌الکتریک متناسب با هر لایه

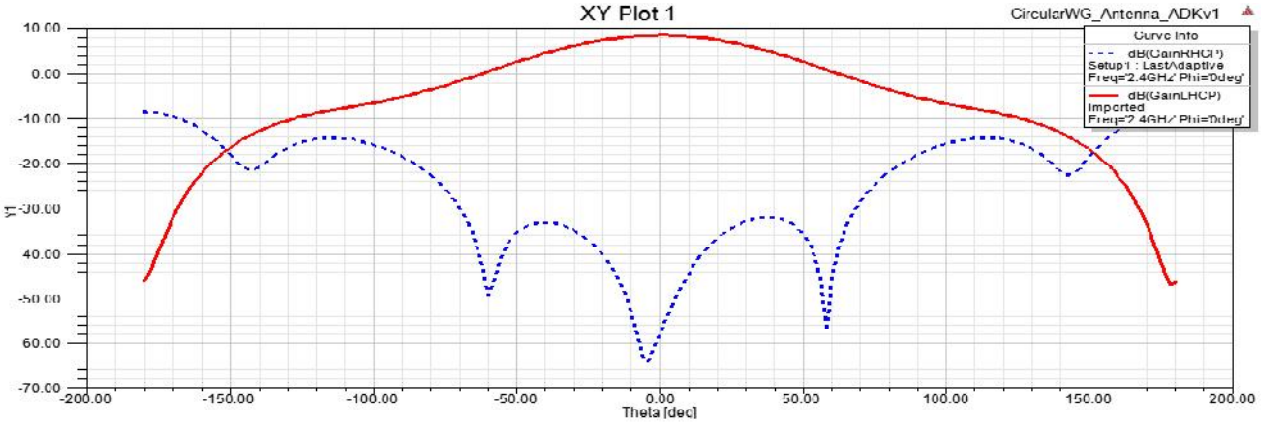
شماره لایه	زاویه تابشی	مقدار ضریب دی‌الکتریک
۱	۹	۶/۴۷۵۵
۲	۱۸	۶/۳۸
۳	۲۷	۶/۱۷۳۹
۴	۳۶	۵/۸۲۸۴
۵	۴۵	۵/۳۲۸۴
۶	۵۴	۴/۶۷۳۹
۷	۶۳	۳/۸۸
۸	۷۲	۲/۹۷۵۵

این ساختار را به‌صورت دایروی‌شکل و در فاصله ۴ سانتی‌متری از دهانه تشعشعی آنتن قرار می‌دهیم و شعاع لایه‌ها برابر می‌گردد با :

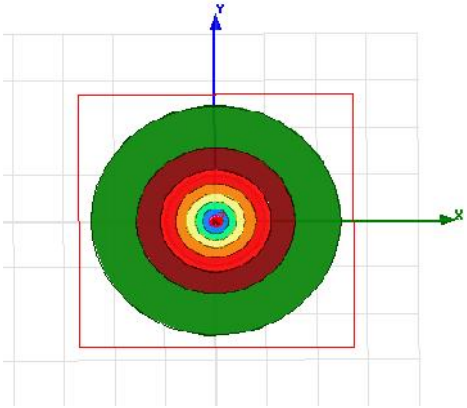
$$R_i = \Delta z \times \tan(\theta_{inc}^i) \qquad (۱۳)$$

که مقدار Δz برابر با فاصله لنز از دهانه تشعشعی آنتن می‌باشد.

شکل۵- پارامتر پراکندگی معکوس برای آنتن



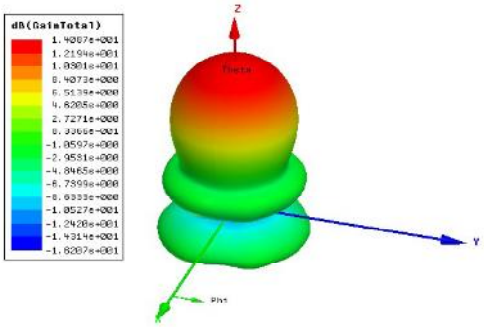
شکل ۶- بهره راست‌گرد و چپ‌گرد آنتن



شکل ۷- الف) لنز از نمای بالا

شکل ۷- ب) لنز در مقابل آنتن در فاصله ٤cm

این لنز در شکل (۷) به نمایش در آمده است. هر یک از رنگ‌ها بیانگر یک‌لایه جدا از هم است و استوانه داخلی، بیشترین مقدار و استوانه خارجی کمترین مقدار ضریب دی‌الکتریک را دارد. همان‌طور که بیان گردید، بایستی ضخامت استوانه لنز را بر اساس نیاز تعیین کرد. در اینجا این مقدار را برابر با ۶ سانتی‌متری فرض می‌کنیم. این ساختار در فرکانس ۲/۴GHz دارای بهره‌ای برابر با ۱۳/۹dB می‌باشد، که بهره کل در شکل (۸) نشان داده شده است.



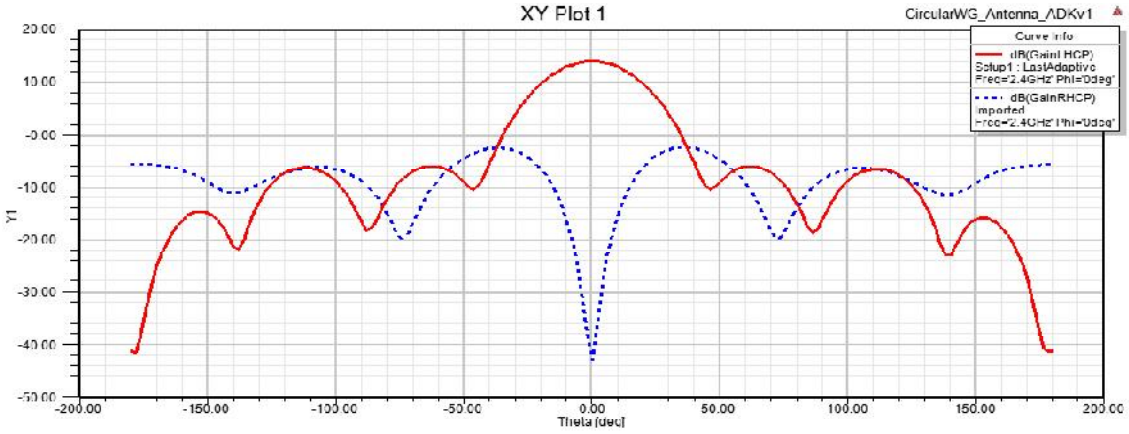
شکل ۸- بهره ی آنتن به همراه لنز

بهره راست‌گرد و چپ‌گرد این آنتن نیز در شکل (۹) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌گردد، در پهنای بیم پرتو تشعشعی آنتن، نسبت بین بهره راست‌گرد و چپ‌گرد، نشان‌دهنده این امر است که این ساختار خاصیت قطبش[1] دایروی را حفظ کرده است. مقدار پارامتر پراکندگی برای این حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مقدار پارامتر پراکندگی این ساختار در فرکانس ۲/۴GHz برابر با ۶/۲dB- است.

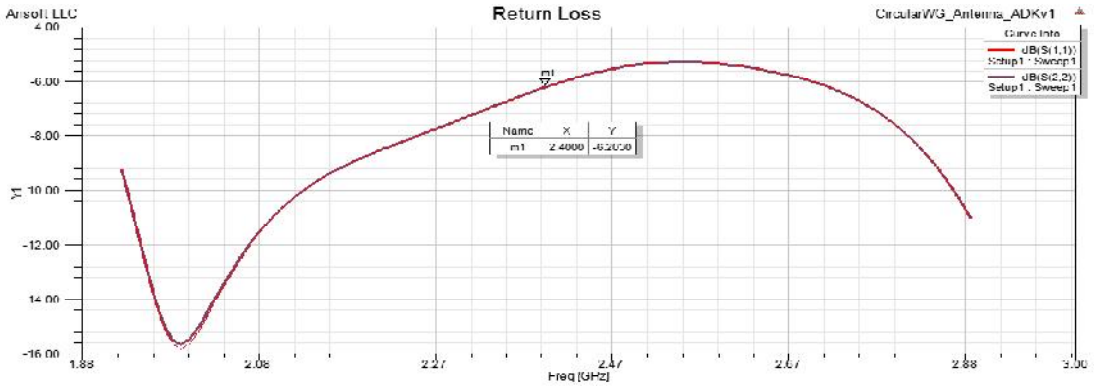
این لنز توانسته است مقدار بهره را به اندازه ۵/۵dB افزایش‌دهد که این اتفاق مؤید تحلیل صورت‌گرفته در بخش ۲ می‌باشد ولی میزان پارامتر پراکندگی بازگشتی کاهش یافته است.

بر اساس شبیه‌سازی صورت‌گرفته برای ضخامت‌های کمتر، مقدار بهره کل ساختار کمتر می‌شود. مشکلی که در این

1- polarisation



شکل ۹- بهره راست‌گردو چپ‌گرد آنتن با لنز

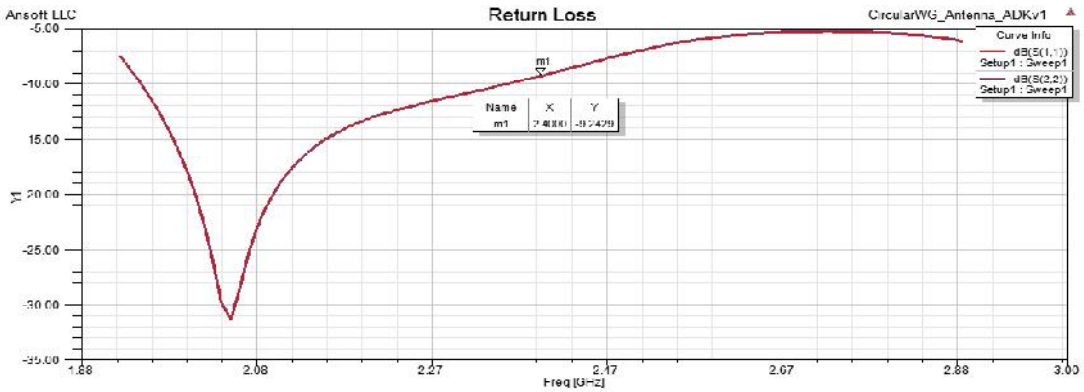


شکل ۱۰- پارامتر پراکندگی معکوس برای آنتن و لنز

ساختار وجود دارد، مقدار زیاد ضخامت است و از طرفی هم میزان کاهش زیاد پارامتر پراکندگی بازگشتی، بیانگر عدم تطبیق بین هوا و لنز می‌باشد.

برای رفع این مشکل می‌توان یک‌لایه نازک از دی‌الکتریک با ضریب دی‌الکتریکی بین ضریب دی‌الکتریک هر لایهٔ عرضی و هوا بر روی لنز در جهتی که آنتن موجود است، قرار دارد. این امر سبب افزایش تطبیق هوا و لنز شده و از طرفی هم سبب می‌شود که یک جابجایی مختصری در پرتو واردشده به ناحیه ilm ایجاد گردد. لذا به کمک این لایه، تطبیق و ضخامت بهبود می‌یابد.

پارامتر پراکندگی برای این حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقدار پارامتر پراکندگی این ساختار در فرکانس



شکل ۱۱- پارامتر پراکندگی معکوس برای آنتن و لنز دولایه

۲/۴GHz برابر با ۹٫۲dB- است. این ساختار در فرکانس ۲/۴GHz دارای بهره‌ای برابر با ۱۴dB می‌باشد که بهره کل همانند ساختار قبلی است. بهره راست‌گرد و چپ‌گرد این مجموعه نیز همانند ساختار قبلی است. در پهنای بیم پرتوی تشعشعی آنتن نسبت بین بهره راست‌گرد و چپ‌گرد نشان‌دهنده این امر است که این ساختار خاصیت قطبش دایروی را حفظ کرده است.

این لنز که به‌صورت دولایه طولی و چندلایه عرضی می‌باشد، مقدار بهره‌ای برابر با حالت قبلی دارد ولی میزان پارامتر پراکندگی بازگشتی را بهبود داده است. این لنز برای ساختارهای دیگر هم آزمایش شده و توانسته است بهره آنتن دی‌پل را از مقدار ۱/۷ dB به مقدار ۱۰ dB افزایش داده و همچنین بهره آنتن پچ را از مقدار ۷/۵ dB به مقدار dB ۱۳/۸ برساند.

۴- نتیجه گیری

با استفاده از یک ساختار چندلایه دی‌الکتریک که در راستای عرضی به‌صورت چندلایه است، می‌توان یک لنز ایجاد کرد. این لنز مسطح، بهره آنتن موجبر دایروی را به اندازه ۵/۵ dB افزایش داده است. این لنز مستقل از فرکانس بوده و برای پهنای باند مناسبی، عملکرد قابل قبولی دارد. مشکلی که این ساختار دارد، مقدار ضخامت بالای آن و عدم تطبیق مناسب آن با فضای آزاد است، که با قرار دادن یک‌لایه نازک در راستای طولی این مشکل رفع گردید. مزیت این لنز چندلایه نسبت به لنزهای غیر همگن موجود، در امکان ساخت آن است.

۵-منابع

[1] Engheta, N., and Ziolkowski, R. W., (editors), Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, John Wiley and Sons, New York, 2006

[2] Kao-Cheng Huang University of Greenwich, UK& David J. Edwards University of Oxford, UK "MillimetreWave Antennas for Gigabit Wireless Communications ,A Practical Guide to Design and Analysis in a System Context" A John Wiley and Sons, Ltd, Publication , 2008

[3] Awad bastawros "FLAT DISC, RADIALLY AND AXIALLY NON HOMOGENEOUS, LENS" OPTICS COMMUNICATIONS ,Department of Mathematics, Faculty of Science, Assiut University, Assiut, Egypt , Received 19 December 1985; revised manuscript received 21 February 1986

[4] HuiFeng Ma; Xi Chen; XinMi Yang; HongSheng Xu; Qiang Cheng; TieJun Cui "A broadband metamaterial cylindrical lens antenna" State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China, July 2010

[5] Davide Ramaccia, Graduate Student Member, IEEE, Francesco Scattone, Filiberto Bilotti, Senior Member, IEEE , and Alessandro Toscano, Senior Member, IEEE " Broadband Compact Horn Antennas by Using EPS-ENZ Metamaterial Lens "IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61, NO. 6, JUNE 2013

[6] HFSS, Ansoft Corp., Pittsburgh, PA.

Analysis and Simulation of the Transverse Dielectric Multilayer Lens

Mohamad Mahdi Taskhiri[*1],Mohamad Khalaj Amir Hoseini[2]

1. PhD Iran University of Science and Technology
2.Professor Iran University of Science and Technology

Abstract

There are several methods to increase gain of antennas. These methods have been provided by the array antennas or by changing their size. Lens is the other way that is used to increase gain of antennas. There are several types of lenses. The lens which is employed in this paper is a flat disc with transverse multilayer dielectric. The structure design and analysis are carried out with commercial full-wave software Ansoft HFSS V15. The output angle should be perpendicular to the flat lens surface. For this purpose, the relationship between the permittivity and width of different dielectric layers can be obtained This flat disc and transverse dielectric multilayer lens increases the gain of a circular waveguide antenna about 5.5 dB. and, therefore, is independent of frequency and has an acceptable performance in a wide bandwidth.

Keywords: lens; dielectric lens; critical angle, antenna gain

❊**Corresponding Author Email:** mm.taskhiri@ee.iust.ac.ir