

طراحی تغییردهنده فاز فریتی تنظیم‌پذیر مبتنی بر فرا مواد

میثم شفاعی^۱، دانشجوی دکتری؛ سید محمدجواد رضوی^۲، دانشیار؛ عماد حمیدی^۳، استادیار

۱- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران

۲- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - razavismj@mut.ac.ir

۳- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران

چکیده: در این مقاله، یک تغییردهنده فاز باند X در قالب موج‌بر مستطیلی معرفی شده است. برای بهره‌بردن از خواص فرا مواد در ساختار تغییردهنده‌های فاز، از میله‌های مسی پرپودیک پرینت‌شده روی زیر لایه برای ساخت محیطی با نفوذپذیری الکتریکی معادل منفی، ENG و به‌وسیله بایاس فریت در مُد غیرعادی برای ایجاد تراوایی مغناطیسی معادل منفی، MNG، استفاده شده است. با تغییر جریان بایاس تغییردهنده فاز، خواص انتشاری فریت و ثابت انتشار موج عوض شده و فاز موج عبوری تغییر می‌یابد که در نتیجه باعث تنظیم‌پذیر بودن تغییردهنده فاز خواهد شد. با توجه به استفاده از فرا مواد در این تغییردهنده فاز و بایاس فریت در مُد غیرعادی، این ساختار ذاتی متحمل تلف عبوری زیادی خواهد بود. یکی از نوآوری‌های عمده‌ی این مقاله، پیشنهاد روشی در طراحی MNG بوده که تلف عبوری تغییردهنده فاز فرا ماده را کاهش می‌دهد. به‌علاوه، در این تغییردهنده فاز از مزیت کوچک‌سازی فرا ماده نیز استفاده شده، به‌طوری‌که ابعاد بخش مؤثر در تغییر فاز، در مقایسه با انواع معمولی حدود ۱۲ برابر کاهش یافته است. تغذیه این تغییردهنده فاز هم به‌صورت منعطف برای تحریک مُد زوج و فرد طراحی شده است. طبق نتایج شبیه‌سازی تمام-موج به‌وسیله نرم‌افزار CST، تغییر فاز ساختار پیشنهادی حدود دو برابر نسبت به تغییردهنده‌های فاز فرا موادی بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: تغییردهنده فاز، فریت، فرا مواد، تنظیم‌پذیر، تلف عبور، کوچک‌سازی، تحریک مُد زوج و فرد.

Tunable, Metamaterial Based Ferrite Phase Shifter Design

Meisam Shafaei¹, PhD Student, S. M. J. Razavi¹, Associate professor, Emad Hamid¹, Assistant professor

1- Electrical and Electronic Engineering University Complex (EEEUC), Malek-e-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, Email: meisam.shafaei@gmail.com

Abstract: In this paper, a rectangular waveguide phase shifter is introduced in X band. In order to benefit the metamaterial properties in this device, cooper wires are periodically printed on the substrate for composing effective electrical negative (ENG) permittivity and, the ferrite slabs are biased extraordinary for obtaining effective magnetic negative (MNG) permeability. By changing the phase shifter's bias current, electromagnetic properties of ferrite are varied. Therefore, propagation constant of the wave, or in the other words, phase of the propagating wave is shifted, that results in tunable phase shifter design. According to the use of ferrite slabs in the extraordinary bias mode, to compose metamaterial medium, the structure suffers from high insertion loss disadvantage. One of the significant novelties of this paper is reducing the insertion loss which is achieved by MNG design method used in metamaterial phase shifter. Moreover, the proposed phase shifter benefits the miniaturization advantage of metamaterials, such that the phase shifting part of the device is reduced about 12 times regarded to the conventional phase shifters in the same frequency band. Bias circuit of the phase shifter is designed flexibly for both odd and even excitation modes. Also, according to the full wave CST software simulation results, almost twice phase shift of similar metamaterial phase shifters has been achieved.

Keywords: Phase shifter, ferrite, metamaterial, tunable, insertion loss, miniaturization, odd and even mode excitation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۹ و ۱۳۹۷/۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۴/۵

نام نویسنده مسئول: سید محمدجواد رضوی

نشانی نویسنده مسئول: ایران-تهران-لويزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

۱- مقدمه

داشته‌باشد. که در تمام این موارد با تغییر خواص مداری، منجر به تغییر فاز موج عبوری گردند.

با ظهور و معرفی فرا مواد در الکترومغناطیس، به سبب ویژگی‌های خاص و مزایای منحصر به فرد این ساختارها، اخیراً تلاش‌هایی برای طراحی و به‌کارگیری مواد چپ‌گرد در تغییردهنده‌های فاز صورت پذیرفته است [۱۲-۱۶]. از مزایای به‌کارگیری فرا مواد در تغییردهنده‌های فاز می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- افزایش پهنای باند
- کوچک‌سازی
- رسیدن به فاز صفر درجه با طول کوتاه

در توضیح آخرین خاصیت قیدشده در بالا، که "رسیدن به فاز صفر درجه با طول کوتاه" عنوان شده است، لازم به ذکر است که در برخی آنتن‌های آرایه فازی، به‌منظور داشتن بیشترین بهره در دید مقابل، باید فاز تغذیه تمامی آنتن‌ها برابر صفر درجه باشد. از آنجاکه تغییردهنده‌های فاز متداول (بارگذاری شده با مواد راست‌گرد)، با افزایش طول ساختار، فازی تولید می‌کند که از صفر درجه شروع شده و با افزایش طول ساختار، منفی‌تر می‌شود. بنابراین طول قطعه، هراندازه هم که کوتاه باشد، فاز موج را از صفر درجه جابه‌جا می‌کند. پس برای رسیدن به فاز معادل صفر درجه، از فاز -360° درجه استفاده می‌شود که با توجه به طول موج کاری، طول تغییردهنده فاز، نسبتاً طویل می‌شود. به‌علاوه، با افزایش طول تغییردهنده فاز، تلف گذر آن هم به‌همین نسبت افزایش می‌یابد. این مشکل در تغییردهنده‌های فازی که با فرا مواد بارگذاری می‌شوند قابل حل است. همان‌طور که در رابطه (۱) دیده می‌شود، ثابت انتشار موج در محیط‌های چپ‌گرد، β_{BW} ، منفی بوده و با گذر موج در این مواد، فاز موج افزایش یافته و مقداری مثبت است.

$$\begin{aligned} \Phi_{BW} = -\{\beta_{BW}\}l &= -\left\{\omega\sqrt{(-\mu_{eff})(-\varepsilon_{eff})}\right\}l \\ &= -\left\{-\omega\sqrt{\mu_{eff}\varepsilon_{eff}}\right\}l > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

بنابراین برای رسیدن به اختلاف فاز صفر درجه، طبق رابطه (۲)، کافی است در تغییردهنده فاز که از دو بخش چپ‌گرد و راست‌گرد تشکیل می‌شود، اندازه فاز موجی که در مدل خط انتقال راست‌گرد تولید می‌شود، Φ_{TL} ، با فاز تولیدی موج بخش چپ‌گرد، Φ_{BW} ، باهم برابر باشند [۱۲، ۱۳].

$$|\Phi_0| = \Phi_{TL} + \Phi_{BW} \quad (2)$$

با توجه به این‌که علامت فاز تولیدی آن‌ها مخالف یکدیگر است، فاز نهایی که مجموع فاز بخش چپ‌گرد و بخش راست‌گرد است، صفر خواهد بود، که در طولی بسیار کمتر از 360° درجه، قابل حصول است. با استفاده از به‌کارگیری این تکنیک در یک نمونه عملی، در فرکانس 900 مگاهرتز، طول تغییردهنده فاز معمولی از $283/5$ میلی‌متر به 16 میلی‌متر کاهش پیدا کرده است [۱۲، ۱۳].

با توجه به کاربرد فراوان تغییردهنده فاز برای اسکن الکترونیکی آرایه آنتن‌ها، برای چرخش گلبرگ اصلی پرتو آرایه آنتن‌های رادار برای پوشش ترافیک هوایی یک منطقه و یا ردگیری اهداف نظامی و یا ایجاد صفر در پرتو آرایه آنتن‌ها در راستای انتشار بمب الکترومغناطیسی در جنگ الکترونیک، این دستگاه جزء لاینفک سیستم‌های مخابراتی به‌حساب می‌آید. علاوه بر این از تغییردهنده فاز در طراحی مدولاتورها و دمدولاتورهای دیجیتال و آنالوگ استفاده می‌شود [۱]. از دیگر کاربردهای تغییردهنده فاز می‌توان به ادوات اندازه‌گیری آنتن و مایکروویو و تجهیزات کالیبراسیون آرایه آنتن‌ها [۲] اشاره کرد. در حالت کلی، فاز تغییردهنده‌های فاز، هم به‌صورت مکانیکی [۵] و هم به‌صورت الکتریکی قابل کنترل است. از تغییردهنده‌های فاز کنترل‌پذیر مکانیکی بیشتر در موارد خاص و محدود آزمایشگاهی استفاده می‌شود. واضح است که کاربرد تغییردهنده‌های فاز قابل تنظیم به‌وسیله سیگنال الکتریکی بسیار گسترده‌تر بوده و برای مثال راداری با ده هزار المان (آنتن)، ناگزیر باید به‌صورت الکتریکی کنترل‌پذیر باشد.

با توجه به اصول عملکرد تغییردهنده‌های فاز سنتی متداول، آن‌ها در خانواده ادوات مایکروویو مبتنی بر فریت از قبیل جداسازها، گرداننده‌ها و ژیراتورها جای دارند [۳، ۴]. در تغییردهنده‌های فاز فریتی، از فریت برای تنظیم فاز موج خروجی استفاده می‌شود. به‌طور کلی برای ساخت تغییردهنده‌های فاز تنظیم‌پذیر، از یک بخش قابل کنترل با جریان یا ولتاژ استفاده می‌شود. تغییردهنده‌های فاز از دیدگاه بخش قابل تنظیم به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- تغییردهنده‌های فاز فریتی
- تغییردهنده‌های فاز فرو الکتریکی
- تغییردهنده‌های فاز حالت جامد (دیودی، ترانزیستوری)

در تغییردهنده‌های فاز فریتی، با تغییر جریان بایاس خارجی، میدان مغناطیسی اعمال شده به فریت تغییر می‌یابد که این امر موجب تغییر تانسور تراوایی مغناطیسی فریت شده و در نتیجه ثابت انتشار موج و فاز آن تغییر می‌یابد.

سازوکار تنظیم فاز تغییردهنده‌های فاز فرو الکتریکی، دوگان الکتریکی تغییردهنده‌های فاز فریتی است. طرز کار آن‌ها بدین‌گونه است که با تغییر ولتاژ DC بایاس خارجی، میدان الکتریکی اعمال شده به ماده فرو الکتریک تغییر می‌یابد. با توجه به منحنی غیرخطی قطبش الکتریکی برحسب میدان الکتریکی این نوع مواد، خواص نفوذپذیری الکتریکی آن‌ها تغییر می‌یابد و در نهایت منجر به تغییر ثابت انتشار فاز موج می‌گردد. پارامتر کنترلی تغییردهنده‌های فاز حالت جامد، ولتاژ بایاسی است که به پایانه یک عنصر نیمه‌هادی مثل دیود یا ترانزیستور اعمال می‌شود. نحوه کنترل تغییردهنده‌های فاز الکترونیکی بسیار گسترده است، برای مثال سیگنال فرمان می‌تواند نقش خاموش و روشن کردن یک پین-دیود و یا تغییر خاصیت خازنی یک ماسفت را

تحلیل می‌گردد. در حالت کلی رابطه تانسوری، که شدت میدان مغناطیسی B را به چگالی میدان مغناطیسی H مربوط می‌سازد، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) = \vec{\mu} \vec{H} \quad (4)$$

به طور مثال اگر فریت در راستای محور z بایاس شود، تانسور تراوایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{\mu} = \mu_0(\vec{U} + \vec{\chi}) = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن \vec{U} ماتریس همانی و $\vec{\chi}$ ماتریس حساسیت تراوایی است و μ و κ برحسب فرکانس زاویه‌ای کاری ω ، فرکانس زاویه‌ای لارمور فریت ω_0 و فرکانس زاویه‌ای ژیرومغناطیسی فریت ω_m ، در حالت اشباع (یعنی در حالتی که میدان مغناطیسی بایاسی فریت H_0 در حدود قطبش اشباع مغناطیسی M_s و یا بزرگتر از آن باشد) به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\mu = \left(1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \mu_0 \quad (6-1)$$

$$\kappa = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \mu_0 \quad (6-2)$$

$$\omega_0 \triangleq \gamma \mu_0 H_0 \quad (6-3)$$

$$\omega_m \triangleq \gamma \mu_0 M_s \quad (6-4)$$

در ادامه سعی می‌شود تنها در موارد ضروری به توضیح روابط ریاضی پرداخته شود. بنابراین به مدهای قابل قبول و مقادیر تابعی فریت که نتایج ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل مشتق جزئی برداری (ترکیب معادله (۲) و معادلات ماکسول) در محیط‌های کاملاً پوشیده شده از فریت است، بیان می‌شود. مدهای انتشاری موج در محیط‌های فریتی تحت تابش موج صفحه‌ای تخت به دو مجموعه مدهای انتشاری طولی و مدهای انتشاری عرضی تقسیم‌بندی می‌شوند. مد انتشاری طولی، به مدی گفته می‌شود که در آن موج تابشی، موجی صفحه‌ای تخت به ماده فریتی بتابد که میدان مغناطیس‌کننده خارجی فریت (میدان بایاسی)، در راستای انتشار موج صفحه‌ای تخت باشد مد انتشاری قابل قبول این حالت، موجی با پلاریزاسیون دایروی راست‌گرد یا چپ‌گرد خواهد بود. در مد انتشاری عرضی، جهت میدان مغناطیسی اعمالی خارجی، عمود بر راستای انتشار موج خواهد بود. مدهای انتشاری قابل قبول این حالت نیز به دو مد معمولی و غیرمعمولی، معروف هستند. نتایج این مدها به طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

فرا ماده، معمولاً از تکرار سلول واحد در یک راستا یا حداکثر سه راستا تشکیل می‌شود و فرا ماده یک‌بعدی یا چندبعدی ساخته می‌شود. طول سلول واحد در مقایسه با طول موج باید آن قدر کوتاه باشد که محیط مستقل از وجود اجزای تشکیل‌دهنده هر سلول، از دید موج عبوری به صورت یکپارچه و تنها با یک ضریب شکست که بخش حقیقی آن منفی است، شناخته شود. طراحان معمولاً طول سلول واحد را یک‌دهم طول موج کاری یا کوچک‌تر انتخاب می‌کنند. در فرکانس‌های پایین، سلول واحد فرا ماده به وسیله قطعات ساده مداری به صورت فشرده قابل ساخت است [۱۴]. با افزایش فرکانس کاری (مثلاً در باند X)، بنا به محدودیت طول قطعات مداری در مقایسه با طول موج، ساختار خط انتقال سلول‌های واحد به وسیله مدارهای گسترده پیاده‌سازی می‌گردد، که اغلب از مدارهای میکرواستریپی استفاده می‌شوند. از آنجاکه پیکربندی تغییردهنده فازی که فقط از مدار میکرواستریپی تشکیل می‌شود، دارای مشکل محدودیت توان کاری پایین است [۱۱]، برای تحمل توان‌های بالاتر از ترکیب ساختار خط انتقال پیاده‌سازی شده با مدارهای میکرواستریپی و محمل موج‌بری استفاده می‌شود [۸].

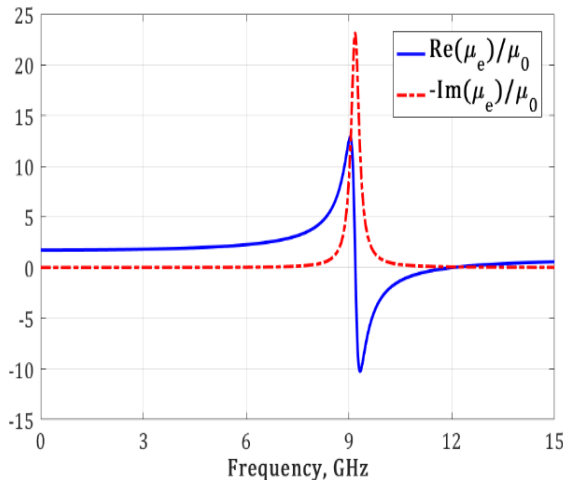
در ادامه، ابتدا تئوری الکترومغناطیسی فریت در مواجهه با موج صفحه‌ای تخت بیان می‌شود. با استفاده از مقدمات بیان شده در این بخش، مدهای انتشاری موج‌بر بارگذاری شده با فریت مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نحوه طراحی سلول واحد تغییردهنده فاز فرا ماده و چگونگی استخراج نفوذپذیری مختلط (CPE) معادل این محیط با ضریب شکست منفی توضیح داده می‌شود. در نهایت شبیه‌سازی‌های تمام موج که با نرم‌افزار CST صورت پذیرفته است ارائه شده و نتایج آن با نتایج تغییردهنده‌های فاز فریتی مبتنی بر فرا ماده‌ای که تاکنون ارائه شده‌اند، مقایسه می‌گردد.

۲- تئوری الکترومغناطیسی فریت

برای بررسی الکترومغناطیسی فریت و به کارگیری آن باید ابتدا فیزیک آن را شناخت. ابتدایی‌ترین و اصلی‌ترین معادله مغناطیس‌شدگی فریت، رابطه لاندو-لیفشیتر نام دارد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\mu_0 \gamma \vec{M} \times \vec{H} \quad (3)$$

که در آن γ ، مقداری ثابت است و نسبت ژیرومغناطیسی نام دارد، \vec{M} بردار مغناطیس‌شدگی و \vec{H} چگالی میدان مغناطیسی اعمال شده داخلی فریت است [۳، ۴]. اهمیت این رابطه از این جهت است که در کنار معادلات ماکسول، به طور کامل به توصیف ادوات الکترومغناطیسی که در آن ماده فرو مغناطیس وجود دارد، می‌پردازد. روند حل تحلیلی و با عددی ساختار فریتی بدین گونه است که ابتدا در حالت بایاس میدان مغناطیسی اعمالی (حالت استاتیک)، تانسور تراوایی فریت به دست می‌آید، سپس در حالت تحلیل موجی (تحلیل RF) فریت تنها به عنوان ماده‌ای ناهمسانگرد که تانسور آن مشخص است، جایگزین شده و



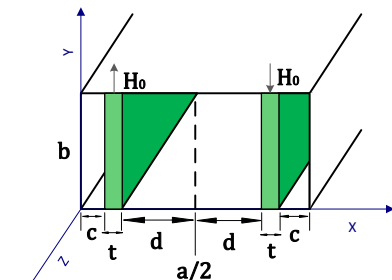
شکل ۲- نمودار تراوایی مغناطیسی ماده فریتی ذکر شده با بایاس میدان مغناطیسی ۲۵۰۰ ارستد نسبت به تغییرات فرکانس

با توجه به نمودارهای فوق، پهنای باند و محدوده میدان بایاس برای تحریک فریت که منتج به ماده MNG شود، قابل استخراج خواهد بود.

۱-۲- موج‌بر بارگذاری شده با فریت

در بخش قبل محیط فریتی تحت تابش موج صفحه‌ای تخت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی با اطلاعاتی که تا اینجا کسب شد، تا حدودی می‌توان انتشار موج در محیط موج‌بر فریتی بارگذاری شده را توجیه و توصیف کرد، ولی برای بررسی جزئی‌تر و دقیق‌تر، مدهای انتشاری محیط‌های موج‌بر مستطیلی به‌طور خاص، که به‌وسیله تیغه (قطعه مکعب مستطیلی) و یا تیغه‌های فریتی بارگذاری شده‌باشد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

از آنجاکه بارگذاری موج‌بر مستطیلی با یک تیغه فریتی کمتر تحت تأثیر میدان بایاس خارجی قرار گرفته، در نتیجه باید میدان مغناطیسی خارجی را بیشتر کرد که منجر به حجیم شدن بیش‌از حد مدار بایاس می‌شود. ما از موج‌بر مستطیلی که با دو تیغه فریتی بارگذاری شده باشد استفاده می‌شود. خود این نوع بارگذاری به دو نوع تحریک زوج و فرد تقسیم می‌شود. در تحریک زوج جهت اعمال میدان مغناطیسی DC خارجی هم‌جهت و در تحریک فرد، مخالف همدیگر خواهد بود.



شکل ۳- موج‌بر مستطیلی بارگذاری شده با فریت در حالت تحریک فرد.

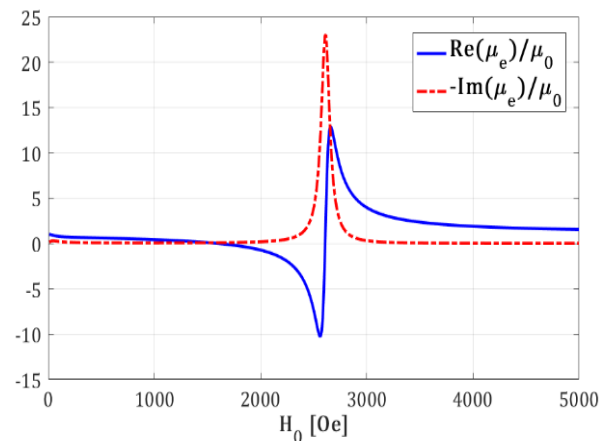
جدول ۱: مدهای انتشاری موج صفحه‌ای تخت در ماده فریتی

مُد انتشار	میدان مغناطیسی	میدان الکتریکی	میدان مغناطیسی
طولی، راست‌گرد	$H_0 \hat{z}$	$E_0 (\hat{x} - j \hat{y}) e^{-j\beta^+ z}$	میدان مغناطیسی قابل انتشار
طولی، چپ‌گرد	$H_0 \hat{z}$	$E_0 (\hat{x} + j \hat{y}) e^{-j\beta^- z}$	میدان الکتریکی قابل انتشار
عرضی، معمولی	$H_0 \hat{x}$	$E_0 \hat{y} e^{-j\beta_0 z}$	میدان مغناطیسی قابل انتشار
عرضی، غیرمعمولی	$H_0 \hat{x}$	$E_0 \hat{x} e^{-j\beta_e z}$	میدان الکتریکی قابل انتشار

همان‌طور که گفته شد، جهت جمع‌بندی مدهای قابل انتشار موج صفحه‌ای تخت در ماده فریتی در حالی که موج در راستای +z حرکت می‌کند، آورده شده است. خواننده جهت بررسی دقیق‌تر می‌تواند از مرجع [۴] استفاده کند. یکی از مهم‌ترین دلایل بیان مدهای انتشاری فریت در این مقاله این است که با توجه به تغییردهنده فازی فرا ماده‌ای، ما انتظار می‌رود که فریت در مدی تحریک شود که تراوایی مغناطیسی آن منفی باشد. در چهار مُد بیان شده در جدول فوق، تنها مُد انتشاری عرضی غیرمعمولی دارای این خاصیت است. روابط تراوایی مغناطیسی معادل فریت در راستای انتشار، ثابت انتشار و ادمیتانس این مُد را به‌طور ویژه در معادلات زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

$$\mu_e = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}, \beta_e = \omega \sqrt{\mu_e} \varepsilon, Y_e = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_e}} \quad (7)$$

برای درک عملی این موضوع دو نمودار برای ماده فریتی با مشخصات $\tan \delta = 0.001, \Delta H = 75 \text{ Oe}, \varepsilon_r = 14, 4\pi M_s = 1800 \text{ G}$ رسم شده است.



شکل ۱- نمودار تراوایی مغناطیسی ماده فریتی ذکر شده در فرکانس ۹/۵ گیگاهرتز نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی بایاسی

• گام دوم: استخراج ϵ و μ معادل، با استفاده از ماتریس پراکندگی به دست آمده در گام قبل.

لازم به ذکر است تاکنون روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای انجام هریک از این دو گام معرفی شده‌اند.

در گام اول، برای به دست آوردن پارامتر ماتریس پراکندگی سلول‌های واحد، معمولاً از روش‌های تحلیلی خط انتقال [۱۷، ۱۱] و یا روش شبیه‌سازی عددی تمام موج نرم‌افزاری استفاده می‌گردد. در این مرحله، ما برای انجام گام اول، از هر دو روش تحلیلی عددی که به کمک کد نویسی Matlab انجام می‌گیرد و هم از روش شبیه‌سازی تمام موج به وسیله نرم‌افزار CST برای صحنه‌گذاری آن، استفاده می‌کنیم. شبیه‌سازی سلول واحد مکعبی که به طور پرئودیک تا بی‌نهایت فرض می‌شود، به دو روش نرم‌افزاری انجام می‌گیرد: تعریف شرایط مرزی پرئودیک (PBC)، و یا تعریف شرایط مرزی PEC یا PMC وجوه مکعب؛ به طوری که وجوه عمود بر بردار میدان الکتریکی PEC و وجوه عمود بر بردار میدان مغناطیسی PMC تعریف می‌شوند.

برای انجام گام دوم، الگوریتم‌های زیادی برای برگرداندن اطلاعات ماتریس پراکندگی به پروفایل ϵ و μ برحسب فرکانس وجود دارد. برای درک عمیق‌تر نحوه کارکرد این الگوریتم‌ها، به بررسی روابط ریاضی آن‌ها پرداخته می‌شود.

پس از به دست آوردن پارامترهای پراکندگی سلول واحد، امپدانس معادل ساختار و پارامترهای X و e^{jnk_0d} به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۵].

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (9-1)$$

$$X = 1/2S_{21}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \quad (9-2)$$

$$e^{jnk_0d} = X \pm j\sqrt{1 - X^2} \quad (9-3)$$

سپس ضریب شکست معادل این محیط طبق رابطه بعدی به دست می‌آید:

$$n = \frac{1}{k_0d} \{ [Im[\ln(e^{jnk_0d})]] + 2m\pi \} - j \times Re[\ln(e^{jnk_0d})] \quad (10)$$

ابهام علامت Z با توجه به پسیو بودن این ساختار به وسیله علامت قسمت حقیقی آن رفع می‌گردد ($Re(Z) > 0$). ابهام رابطه (۹-۳) نیز به وسیله قید $|e^{jnk_0d}| \leq 1$ برطرف می‌شود. آخرین ابهام مربوط به شاخه‌های لگاریتم عدد مختلط بوده که به صورت یکتا به دست نمی‌آید. این ابهام به وسیله رابطه کرامرز-کرونیگ [۱۵] که از علیت نشئت می‌گیرد رفع شده و عدد صحیح m تعیین می‌گردد. پس از رفع این ابهامات، نفوذپذیری الکتریکی و تراوایی مغناطیسی به صورت روابط ذیل محاسبه می‌گردد:

با توجه به تعاریف هندسی شکل قبل از موج‌بر بارگذاری شده با فریت در مُد فرد و تعریف k_a و k_f برای عدد موج در ناحیه هوا و فریت و β ثابت انتشار موج در داخل موج‌بر، معادله مشخصه این ساختار برابر خواهد بود با [۴]:

$$\left(\frac{k_f}{\mu_e}\right)^2 + \left(\frac{k\beta}{\mu_0\mu_e}\right)^2 - k_a \cot(k_a c) \left(\frac{k_f}{\mu_0\mu_e}\right) \cot(k_f t) + \frac{k\beta}{\mu_0\mu_e} - \left(\frac{k_a}{\mu_0}\right)^2 \cot(k_a c) \tan(k_a d) - k_a \tan(k_a d) \left(\frac{k_f}{\mu_0\mu_e}\right) \cot(k_f t) - \frac{k\beta}{\mu_0\mu_e} = 0 \quad (8)$$

پس از حل این معادله غیرخطی، دو پاسخ برای β به دست می‌آید β^+ و β^- که هر کدام برای انتشار موج در راستای محور Z و $-Z$ خواهد بود. از آنجاکه این معادله نسبت به β زوج نیست، بنابراین $\beta^+ \neq -\beta^-$. یعنی تغییردهنده فازی که به صورت مُد فرد تحریک شود، دوطرفه (هم‌پاسخ) نخواهد بود. اگر طراحی تغییردهنده فاز یک‌طرفه مدنظر باشد، این امر به طراح آزادی بیشتری می‌دهد، چون در هر طراحی هم از پارامترهای S_{21} و هم پارامترهای S_{12} می‌تواند استفاده شوند و هر کدام شرایط بهتری داشته باشد انتخاب می‌شود و در عمل نیز، تغییردهنده فاز در راستایی که طراحی صورت پذیرفته است، قرار می‌گیرد. تغییردهنده‌های تحریک‌شده در مُد زوج، دوطرفه بوده و از این نوع تحریک بیشتر برای تغییردهنده‌های فاز دوطرفه استفاده می‌شود.

۳- طراحی فرا ماده و استخراج ϵ و μ معادل سلول واحد آن

برای ساخت محیطی با ضریب شکست منفی (NRI)، باید در دو مرحله پیاده‌سازی شود. یک مرحله شامل ساخت محیطی با نفوذپذیری الکتریکی معادل منفی (ENG)، و مرحله دیگر شامل ساخت محیطی تراوایی مغناطیسی معادل منفی (MNG)، می‌شود که با ترکیب این دو، منجر به شکل‌گیری محیط DNG می‌شود.

برای طراحی محیط پاشنده فرا ماده‌ای که مناسب تغییردهنده فاز باشد، با توجه به باند کاری، بایستی باند فرکانسی مشترکی که هم ϵ منفی باشد و هم μ به نحوی انتخاب گردند که اولاً قسمت موهومی ϵ و μ تا جایی که امکان دارد کم باشد تا مقدار تلف سلول واحد کمینه گردد. زیرا قسمت موهومی ϵ و μ سبب تولید قسمت حقیقی در ثابت انتشار مختلط موج که همان تلف انتشار است می‌گردد [۱۰]. این پارامتر آن قدر مهم است که حتی یکی از معیارهای شایستگی (FOM) فرا ماده طراحی شده، نسبت قسمت حقیقی ضریب شکست به قسمت موهومی آن است. واضح است که هراندازه مقدار این کسر بیشتر باشد، موج متحمل تلف کمتری می‌شود.

برای طراحی فرا ماده‌ای که مناسب تغییردهنده فاز باشد، لازم است ϵ و μ معادل سلول‌های واحد به دست آورده شود.

استخراج ϵ و μ معادل سلول‌های واحد شامل دو مرحله می‌شود:

• گام اول: به دست آوردن ماتریس پراکندگی سلول واحد.

۳-۱- طراحی ENG

$$\varepsilon = n/z \quad (11-1)$$

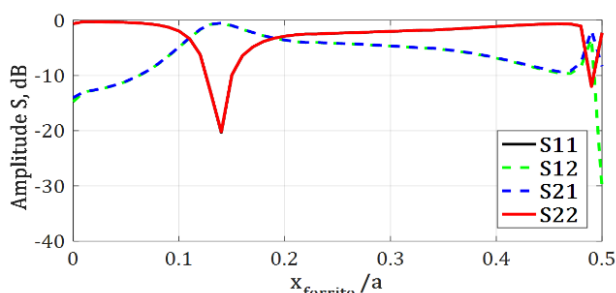
$$\mu = n z \quad (11-2)$$

پس از به دست آوردن ماتریس پراکندگی سلول واحد ENG از الگوریتم برگردان و روابط (۹) تا (۱۱) جهت استخراج نفوذپذیری الکتریکی استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، سلول واحد زیر لایه که به وسیله فرآیند سعی و خطا طراحی شده، در باند کاری ما (باند X) ENG بوده و قسمت موهومی نفوذپذیری الکتریکی که نمایانگر تلفات الکتریکی است، صفر است.

۳-۲- طراحی MNG

در این مرحله موج‌بر بارگذاری شده با دوتیغه فریتی که به صورت فرد تحریک شده‌اند شبیه‌سازی شده است. محل قرارگیری تیغه‌های فریتی به منظور داشتن کمترین مقدار تلف درون موج‌بر در فرکانس مرکزی جاروب شده و مکان بهینه را که دارای بیشترین مقدار $|S_{21}|$ باشد، تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که قطعه فریتی که در بخش ۲-۱ معرفی شد و نمودارهای تراوایی آن در باند کاری که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شد دارای شرایط μ منفی بوده، برای بارگذاری موج‌بر WR90 که مختص باند X است استفاده شده است.



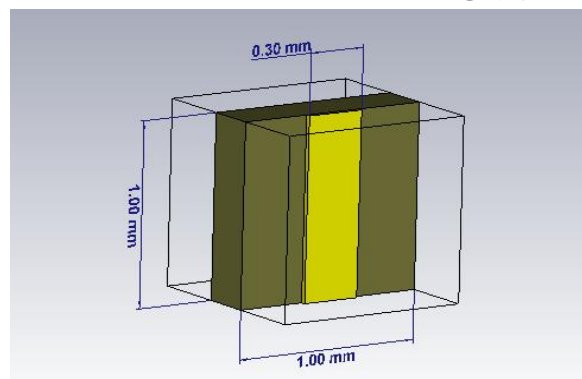
شکل ۶- جاروب مکان قرارگیری تیغه فریتی درون موج‌بر در فرکانس مرکزی ۹/۵ گیگاهرتز در مُد فرد (در حالت $x_{ferrite} = 0$ دوتیغه فریتی به هم چسبیده‌اند).

در نمودار شکل فوق دو رزونانس برای محل قرارگیری تیغه‌های فریتی وجود دارد. اولی در $x_{ferrite}/a = 0.14$ و دومی در $x_{ferrite}/a = 0.49$ قرار دارند. نقطه دوم حدوداً مربوط به مکانی است که هر دو قطعه فریتی به دیواره عرضی موج‌بر چسبیده‌اند. رزونانس دوم از دید الکترومغناطیسی نیز قابل پیش‌بینی بود، چون در مُد TE_{10} بیشترین شارش توان از مرکز موج‌بر عبور می‌کند، با قرار دادن قطعات فریتی نزدیک دیواره‌های موج‌بر، این قطعات از دید موج عبوری پنهان شده و نقش موج‌بر خالی را ایفا خواهد کرد که تلف چندانی ندارد. بنابراین نقطه قابل قبول برای قرار دادن محل قطعات فریتی که نقش مؤثر داشته باشند، مکان $x_{ferrite}/a = 0.14$ خواهد بود.

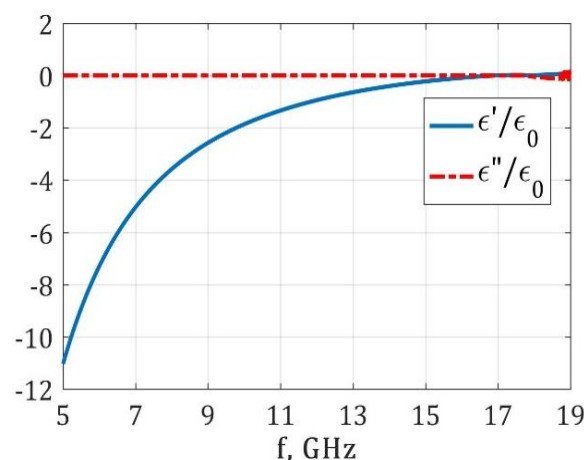
لازم به ذکر است که نتایج مُد زوج هم از لحاظ تلف در حدود مُد فرد بوده و برای جلوگیری از افزایش حجم مقاله، از آوردن نتایج مشابه خودداری شده است.

یک روش ساخت متداول ENG در الکترومغناطیس که به پلاسما هم معروف است، و به وسیله معادلات مدل دروید، قابل تعریف است، از قرار دادن میله‌های فلزی به صورت پریودیک به وجود می‌آید، به طوری که راستای تکرار میله‌ها منطبق بر راستای انتشار موج و جهت قرارگیری میله‌های فلزی، موازی بر بردار پلاریزاسیون میدان الکتریکی باشد.

ماتریس پراکندگی ساختار ENG هم از طریق تحلیل الکترومغناطیسی خط انتقال [۱۷] و هم از طریق شبیه‌سازی نرم‌افزاری امکان پذیر است. از آنجاکه روش تحلیلی از تقریب یک‌بعدی استفاده می‌کند، در اینجا از روش شبیه‌سازی تمام موج به وسیله CST استفاده می‌شود. علاوه بر تقریب یک‌بعدی روش تحلیلی، روش تحلیلی برای میله‌هایی با سطح مقطع دایروی در محیط همگن کاربرد دارد، که برای خطوط متالیزه روی زیر لایه ساختار ما که سطح مقطع مستطیلی خیلی باریک دارد و سلول واحد به سبب وجود زیر لایه و هوا ناهمگن بوده و این خود منبع تقریب و خطا است، بنابراین از تحلیل نرم‌افزاری استفاده شده است.



شکل ۴- شبیه‌سازی ENG با نرم‌افزار CST برای سلول واحد مکعبی، خط مسی پرینت شده بر روی زیر لایه با $\varepsilon_r = 3/9$.



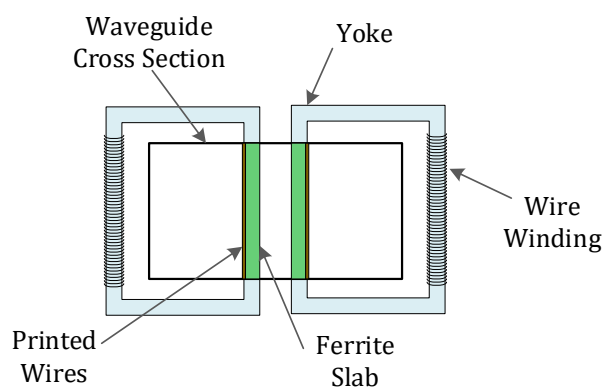
شکل ۵- نفوذپذیری الکتریکی معادل محیط ENG

۴- شبیه‌سازی تغییردهنده فاز

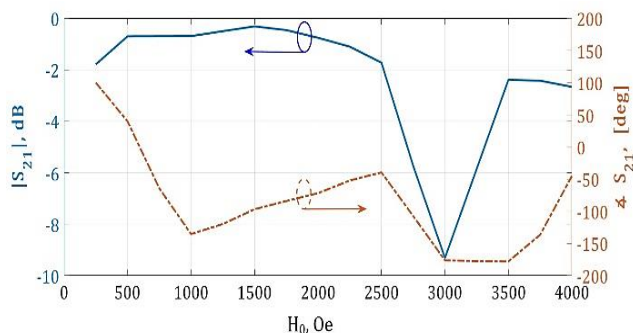
در این بخش با ترکیب طراحی ENG و MNG، کل تغییردهنده فاز مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار می‌گیرد.

در عمل برای بایاس تغییردهنده فاز از پیچیدن سیم‌پیچ دور یوک استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های گذشته گفته شد، با توجه به نوع تغییردهنده فاز مورد مطالعه، که از نوع موج‌بر مستطیلی بارگذاری شده با فرا ماده است، تنها راه تحریک آن مد عرضی بوده و بنابراین تیغه‌های فریتی باید به صورت شکل ۷ درون موج‌بر جاگذاری شوند. در همین شکل مدار تغذیه خارجی جهت تأمین میدان مغناطیسی مستقیم خارجی نیز نمایش داده شده است. یکی از مزایای منحصربه‌فرد این نوع تغذیه پیشنهادی این است که بدون تغییر ساختاری، تنها با چرخاندن ۱۸۰ درجه یکی از یوک‌ها، نوع تحریک بین مدهای زوج و فرد قابل تغییر خواهد بود.

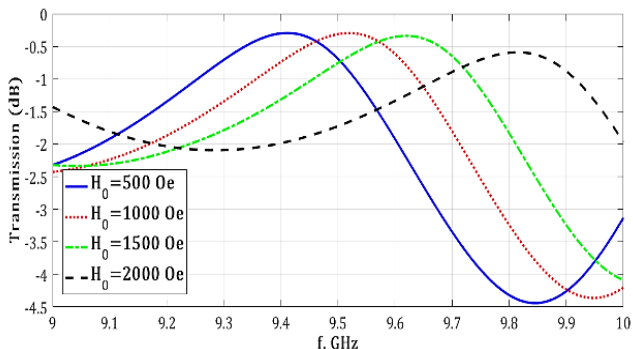
طبق مطالبی که در بخش "طراحی MNG" عنوان شد، تلف عبوری تغییردهنده فاز به شدت وابسته به مکان قرارگیری تیغه‌های فریتی درون موج‌بر است و مکان قرارگیری این قطعات با جاروب کردن مکان قرارگیری آن‌ها به منظور رسیدن به کمترین تلف عبوری، به دست آمده است.



شکل ۷- شمای کلی تغییردهنده فاز بارگذاری شده با فرا ماده، همراه با مدار تغذیه خارجی



شکل ۸- نمودار دامنه و فاز میدان عبوری تغییردهنده فاز نسبت به تغییر میدان بایاس خارجی در فرکانس ۹/۵ گیگاهرتز.



شکل ۹- مقایسه الگوی رفتاری دامنه میدان عبوری تغییردهنده فاز نسبت به تغییر میدان بایاس خارجی

طراحی میله‌های پرینت شده روی زیر لایه نیز در بخش "طراحی ENG" توضیح داده شده است. با ترکیب این دو بخش پارامترهای اولیه طراحی تغییردهنده فاز به دست آمد. با تغییر اندک پارامترهای طراحی حول نتایج اولیه، به ساختار نهایی شبیه‌سازی رسیده شد.

شبیه‌سازی تغییردهنده فاز مورد مطالعه در نرم‌افزار CST انجام پذیرفته است. مدل مغناطیسی که برای شبیه‌سازی قطعات فریت در نظر گرفته شده است، از نوع تمام-مغناطیسی بوده و همین‌طور پاشندگی مواد فریتی نیز از نوع زایروتروپیک تعریف شده‌اند.

نتایج تغییر فاز و تلف گذر این تغییردهنده فاز نسبت به تغییر میدان بایاس خارجی، به صورت زیر به دست آمده است. همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود، تغییردهنده فاز به وسیله جریان تغذیه کوئل که به میدان مغناطیسی درون یوک تبدیل می‌شود، قابل کنترل بوده و تنظیم‌پذیر است.

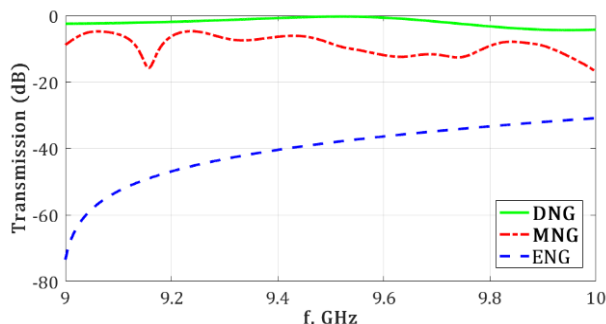
در توصیف عملکرد این تغییردهنده فاز باید اذعان داشت که در میدان‌های بایاس کم (کمتر از ۱/۵ kOe) رفتار نسبتاً خطی از خود نشان می‌دهد. این ویژگی را در شکل ۸، با مشاهده فاز تقریباً خطی می‌توان مشاهده کرد. علاوه بر این، مطابق شکل ۹، با افزایش میدان مغناطیسی بایاسی از ۰/۵ kOe به ۱/۵ kOe، شکل طیفی دامنه میدان عبوری ثابت بوده و این نمودارها تنها انتقال یافته یکدیگر نسبت به فرکانس هستند ولی با افزایش یک گام دیگر برای میدان مغناطیسی بایاسی، الگوی دامنه میدان عبوری تغییر می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به نوع رفتار شبه‌خطی تراوایی مغناطیسی فریت در دامنه میدان بایاس کم یافت. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، با افزایش میدان مغناطیسی بایاسی و نزدیک شدن به ناحیه رزونانسی نمودار، تغییرات شدید و غیرخطی در تراوایی مغناطیسی و نتیجتاً در ضریب شکست معادل و تغییر فاز موج عبوری خواهد داشت. در حالت کلی تغییر فاز خطی نسبت به پارامتر کنترلی، نوعی مزیت برای تغییردهنده‌های فاز به شمار می‌رود، زیرا با توجه به خطی بودن تغییر فاز مثلاً نسبت جریان سیم‌پیچ بایاس، صدور فرمان فاز مورد نظر هر تغییردهنده فاز آرایه به راحتی امکان‌پذیر خواهد بود. درحالی‌که این امر در مورد تغییردهنده‌های فاز فریتی صادق نیست،

مورد مطالعه قرار می‌گیرد. سپس، بعد از اینکه فرا ماده بودن ساختار اثبات شد، خواص و مزایای ثانویه آن را بررسی کرده و با تغییردهنده‌های فاز معمولی مقایسه می‌شود.

برای بررسی اثر فرا ماده، سه شبیه‌سازی جهت تعیین تلف موج عبوری تغییردهنده فاز، مطابق شکل ۱۰، برای سه حالت زیر انجام گرفته است:

- تغییردهنده فازی که فقط از میله‌های مسی پرینت شده روی زیر لایه تشکیل شده است (ENG).
- تغییردهنده فازی که فقط از تیغه‌های فریتی با میدان مغناطیسی ۱ kOe بایاس شده باشد (MNG).
- تغییردهنده فاز کامل فرا ماده که با میدان مغناطیسی ۱ kOe بایاس شده باشد (DNG).

در این شکل به خوبی تأثیر به کارگیری فرا ماده در تغییردهنده فاز مشهود است. از آنجاکه ساختار تغییردهنده فاز برای کنترل پذیری نیازمند فریت است، اگر در ساختار تغییردهنده فاز فقط تیغه‌های فریتی، مانند تغییردهنده‌های فاز سنتی بایاس و استفاده می‌شدند، مطابق شکل ۱۰، تلفی بین ۹ تا ۱۵ دسی‌بل در طول باند وجود دارد. در صورتی که از موج‌بری که به وسیله ساختار ENG که در بخش ۳ طراحی شده بود، به تنهایی استفاده می‌شد، تلفات به مراتب بیشتر بوده و بین ۳۱ تا ۷۳ دسی‌بل به وجود می‌آمد. اما با ترکیب این دو ساختار حالت رزونانسی فرا ماده پدید آمده که تلف عبور به شدت کاهش یافته است.



شکل ۱۰- بررسی اثر به کارگیری فرا ماده در تغییردهنده فاز

جدول ۲: مقایسه شاخص‌های مهم تغییردهنده فازی پیشنهادی با نتایج تغییردهنده‌های فاز فرا موادی

تغییردهنده فاز	باند فرکانسی	طول تغییردهنده فاز	تلف عبوری	حداکثر تغییر فاز	معیار شایستگی
مراجع	(۷-۸)	۱۲ میلی‌متر	(۶-۱۰)	۱۶۰	۱۶۰°/kOe
	گیگاهرتز		دسی‌بل	درجه	(۶-۷) kOe
پیشنهادی	(۹-۱۰)	۸/۵	(۷-۳)	۳۲۲	۲۸۰°/kOe
	گیگاهرتز	میلی‌متر	دسی‌بل	درجه	(۰-۱) kOe

زیرا حتی در صورت خطی بودن فاز این ادوات نسبت به پارامتر کنترلی، به علت وجود پارامترهای زیر، تغییرات فاز دیگر خطی نخواهد بود.

- فاز اولیه: در حالت ایده‌آل فاز اولیه تمامی المان‌های یک آرایه یکسان و صفر در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که در عمل فاز اولیه هر تغییردهنده فاز مقداری متفاوت از بقیه بوده و حتی طول کابل‌ها و سیم‌کشی‌های تمام ادوات نیز یکسان نیست.
- تغییرات دما: پارامترهای الکترومغناطیسی فریت تابع تغییرات دمای محیط است که در نمودارهای برگ اطلاعات شرکت سازنده اندازه‌گیری و درج شده است. برای مثال در شرایط معمولی، تغییرات دمایی از ۱۵- تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد، حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد است، البته طراح برای قابلیت اطمینان بیشتر، باید کمی هم بیش از این محدوده را در نظر بگیرد. لازم به توضیح است که تغییرات دمایی تغییردهنده‌های فازی که در موشک‌ها، هواپیماها و ماهواره‌ها استفاده می‌شود، به مراتب بسیار بالاتر بوده و پیچیدگی طراحی را دوچندان می‌کند.
- تغییرات فرکانسی: تغییرات فاز ابتدا و انتهای باند تغییردهنده فاز با توجه به پهنای باند کاری یکسان نبوده و دارای تغییرات است.

اصولاً بنا به نوع تغییردهنده فاز، پارامترهای دیگری نیز دخیل خواهد بود که در اینجا فقط پارامترهای عمومی و مشترک قید شده است. تنها راه غلبه بر این مشکلات، تولید جدول تصحیح است؛ به طوری که جدولی با تغییر و گسسته‌سازی همه پارامترها برای دستورات مورد نظر تولید شوند. سپس برای رسیدن به فاز مورد نظر با توجه به فاز اولیه هر المان درون آرایه با در نظر گرفتن طول کابل‌ها و فاز اولیه خود المان کالیبراسیون فاز انجام پذیرفته و همین‌طور با توجه به دمایی که از سنسورهای حرارتی آرایه خوانده می‌شود و فرکانس کاری، دستور لازم از جدول تصحیح صادر می‌شود. به سبب چنین ملاحظات عملی، تمام تغییردهنده‌های فاز فریتی صنعتی و نظامی حتی با وجود داشتن فاز خطی نسبت به پارامتر کنترلی، نیازمند داشتن چنین جدولی هستند که عملاً خطی بودن فاز، مزیتی برای تغییردهنده فاز فریتی به دنبال ندارد، زیرا در تغییردهنده فاز فریتی، مستقل از دارا بودن فاز خطی و یا غیرخطی در نهایت باید به وسیله جدول تصحیح دستور فاز مورد نظر صادر شود. کل این جداول نیز در برد الکترونیکی راه‌اندازی که بر روی بدنه تغییردهنده‌های فاز تعبیه می‌شود، بر روی چیپ کوچکی پیاده‌سازی می‌گردد.

در این قسمت لازم است دلایل و مزایای اصلی به کارگیری فرا ماده در تغییردهنده فاز بیان شود. ابتدا به وسیله یک شبیه‌سازی، پدیده رزونانسی که به سبب استفاده ماده مصنوعی فرا ماده است،

علاوه بر این، تغییر فاز ساختار پیشنهادی حدود دو برابر نسبت به تغییردهنده‌های فاز فرا موادی بهبود نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] D. Parker, D.C. Zimmermann, "Phased Arrays—Part II: Implementations, Applications, and Future Trends", IEEE TRANSACTIONS (Invited Paper) ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO.3, MARCH 2002.
- [2] زهرا حبیبی، مرتضی کارزونی، سید حسین محسنی ارمکی، عماد حمیدی، «ارائه یک روش کاربردی جهت کالیبراسیون آنتن‌های آرایه فازی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴
- [3] Robert E. Collin, "Foundation for Microwave Engineering", IEEE Press, Wiley, Cleveland, Ohio, Second Edition, 2001.
- [4] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Wiley, Fourth Edition, 2012.
- [5] Peter A. Rizzi, "Microwave Engineering: Passive Circuits", 1st Edition, Prentice-Hall, 1988.
- [6] Mahmoud A Abdalla, Zhirun Hu, "Ferrite Tunable Metamaterial Phase Shifter", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010.
- [7] P. He, P.V. Parimi, Y. He, V.G. Harris and C. Vittoria, "Tunable negative refractive index metamaterial phase shifter", ELECTRONICS LETTERS Vol. 43 No. 25, 6th December 2007.
- [8] Peng He, P. V. Parimi, H. Mosallaei, V. G. Harris, and C. Vittoria, "Tunable Negative Refractive Index Metamaterial Phase Shifter", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007.
- [9] Peng He, Jinsheng Gao, P. V. Parimi, C. Vittoria, and V. G. Harris, "Tunable Negative Refractive Index Metamaterials and Applications at X and Q-bands", DARPA-APO funded project at U.S. Army Research Office, 4300 S. Miami Blvd, Durham NC 27703, MARCH 2008.
- [10] Hossam S. Tork, "Tunable ferroelectric meta-material phase shifter embedded inside low temperature co-fired ceramics (LTCC)", Ph.D. Dissertation, Dept. ECE, University of Idaho, December 2012.
- [11] Michael Maassel, "A metamaterial-based multiband phase shifter", Ph.D. Dissertation, Dept. ECE, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, Fargo, October 2013.
- [12] Marco A. Antoniades, George V. Eleftheriades, "Compact Linear Lead/Lag Metamaterial Phase Shifters for Broadband Applications", IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 2, 2003.
- [13] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, "Metamaterials, physics and engineering explorations," IEEE press, Wiley interscience, 2006.
- [14] Muhammad Ali Babar Abbasi, Marco A. Antoniades, Symeon Nikolaou "A Compact Reconfigurable NRI-TL Metamaterial Phase-Shifter for Antenna Applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017.
- [15] Xudong Chen, Tomasz M. Grzegorzczak, Bae-Ian Wu, Joe Pacheco, Jr., and Jin Au Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials", PHYSICAL REVIEW E **70**, 016608 – Published 26 July 2004.
- [16] Magnus W. Haakestad and Johannes Skaar, "Causality and Kramers-Kronig relations for waveguides", Optical Society of America, Vol. 13, No. 24. 28 November 2005.
- [17] C. Vittoria, "Elements of Microwave Networks, Basics of Microwave Engineering", World Scientific, Singapore, 1998.
- [18] Shiban K. Koul, Bharathi, "Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters: Dielectric and Ferrite Phase Shifters", Volume I, Artech House, 1991.

قابلیت مهم دیگری که با به‌کارگیری فرا ماده به تغییردهنده فاز افزوده شد، کوچک‌سازی است که در مقدمه به تفصیل بدان پرداخته شده است. از آنجاکه تغییردهنده فاز مورد مطالعه از نوع فرا مواد بوده، در اینجا شبیه‌ترین تغییردهنده فاز معمولی از لحاظ ظاهری را که تغییردهنده فاز چنبره‌ای است با آن از لحاظ ابعاد مقایسه می‌کنیم. البته جدا از شباهت ظاهری، طرز عملکرد مایکروویوی تغییردهنده فاز چنبره‌ای نیز کاملاً شبیه تغییردهنده فاز فرا ماده پیشنهادی است، زیرا از چهار ضلع جانبی تغییردهنده فاز چنبره‌ای، اضلاع بالایی و پایینی در ایجاد تغییر فاز نقشی نداشته و در طراحی و محاسبات از آن صرف‌نظر می‌شود و فریت چنبره‌ای، کاملاً مانند دوتیغه فریتی تغییردهنده فاز فرا ماده مورد تحلیل قرار می‌گیرند [۱۸].

طول تغییردهنده فاز معادل چنبره‌ای باند X، ۱۰۰ میلی‌متر بوده و قابلیت تغییر فاز $78^\circ/cm$ ایجاد می‌کند [۱۸]. در حالی که تغییردهنده فاز فرا ماده پیشنهادی به طول $8/5$ میلی‌متر بوده و تغییر فازی برابر با $380^\circ/cm$ تولید می‌کند. بنابراین ابعاد بخش مؤثر در تغییر فاز، حدود ۱۲ برابر مورد کوچک‌سازی قرار گرفته است. اهمیت این مسئله در آرایه‌های راداری که به‌طور معمول شامل بیش از ده هزار عنصر هستند، از لحاظ ساده‌سازی در حجم و وزن کل آرایه بیشتر مشهود خواهد بود. در نهایت جهت بررسی کمی شاخص‌های مهم تغییردهنده فاز طراحی شده با نتایج تغییردهنده فاز فرا ماده مشابه [۷-۹] و به‌ویژه تغییردهنده فاز فرا ماده نزدیک‌ترین باند [۹] در جدول ۲ مقایسه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

طبق مقایسه‌های کمی و کیفی صورت‌پذیرفته‌ی تغییردهنده فاز فرا ماده پیشنهادی با تغییردهنده‌های فاز فرا مواد کنونی در بخش‌های قبل، مشاهده می‌شود که عملکرد تغییردهنده فاز پیشنهادی نسبت به تغییردهنده‌های فاز مشابهی که تاکنون مطرح و ساخته شده‌اند بهبود یافته است. این بهبود حاصل الگوریتم طراحی مجزای ENG و MNG و همین‌طور طراحی بهینه ساختار MNG برای کاهش تلف عبور تغییردهنده فاز فریتی مبتنی بر فرا ماده که چالش برانگیزترین و بزرگ‌ترین نقص این نوع تغییردهنده‌های فاز است، صورت پذیرفته است. ویژگی منحصر به فرد دیگر این تغییردهنده فاز، کارایی آن در محدوده میدان بایاس خیلی کمتر از موارد مشابه است. همین ایراد تغییردهنده‌های فاز فرا موادی که به میدان بایاس حدود ۷ kOe نیاز دارند را تنها به تغییردهنده‌های فاز تحقیقاتی غیرعملی تبدیل کرده است، زیرا تغذیه چنین میدان مغناطیسی مستقیمی به ادوات مایکروویوی توان بالا و حجیم نیازمند است. در صورتی که میدان مغناطیسی بایاس ۱ kOe تغییردهنده فاز پیشنهادی به‌سادگی با سازوکار تغذیه نمایش داده شده در شکل ۷، قابل پیاده‌سازی و تولید تجاری است.

زیر نویس‌ها

^۱ Phase Shifter

-
- ^۲ Isolator
 - ^۳ Circulator
 - ^۴ Ferroelectric
 - ^۵ Metamaterial
 - ^۶ Loaded
 - ^۷ Unit-cell
 - ^۸ Complex Permittivity Extraction
 - ^۹ Landau-Lifshitz
 - ^{۱۰} Larmor Frequency
 - ^{۱۱} Extraordinary
 - ^{۱۲} Double Negative Material
 - ^{۱۳} Figure of Merit
 - ^{۱۴} Kramers-Kronig (KK)
 - ^{۱۵} Drude
 - ^{۱۶} Yoke
 - ^{۱۷} Full Magnetized
 - ^{۱۸} Gyrotropic
 - ^{۱۹} Lookup Table
 - ^{۲۰} Toroidal Phase Shifter