Archive of SID

طراحی و ساخت تغییردهنده فاز فریتی دومد هم پاسخ در باند Ku

حمیدرضا دلیلی اسکویی [۱]، مرتضی خوش چشم [۲]

۱- **دانشیار** دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه هوایی شهید ستاری- ایران

h_oskouei@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه هوایی شهید ستاری- ایران

m.khoshcheshm@gmail.com

چکیده: یکی از نیازمندی‌های آنتن رادارهای ردیاب، چرخش سریع پرتوهای تک‌موج‌مربعی می‌باشد که روش‌های مختلف دراین زمینه ارائه شده است. یکی از روش‌هایی که در سیستم سلاح‌های مختلف از آن بکارگرفته شده است، استفاده از آنتن‌های تغذیه فضایی می‌باشد. در این نوع از آنتن‌های آرایه‌ای، از تغییردهنده فاز فریتی استفاده می‌شود که توسط یک هدایت‌گر، فاز آن‌ها درجهت چرخش پرتو کنترل می‌شود. تغییردهنده‌های فاز مورد استفاده در این آنتن‌ها تکنولوژی پیشرفته‌ای دارند که در سطح کشور کمتر به آن پرداخته شده است. در این مقاله طراحی و ساخت تغییردهنده فاز فریتی دومد هم پاسخ موجبری جهت کاربرد در رادارهای ردیاب در باند Ku در فرکانس مرکزی ۱۶.۳۵ گیگاهرتز انجام گرفته است. جهت انجام این کار از نرم افزار CST STUDIO 2018 که توانایی شبیه‌سازی عنصرهای فریتی را دارد، استفاده شده است. در طراحی تاثیر پارامترهای مختلف مثل طول فریت، و میزان بایاس فریت در تغییر فاز مورد بررسی قرار گرفته شده است. با بررسی پارامترهای مختلف، حالت بهینه برای تغییردهنده فاز انتخاب و نتایج آن از نظر تلف عبوری و تلف برگشتی و تغییر فاز ۳۶۰ درجه در طیف مورد نیاز رادارهای ردیاب مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تغییردهنده‌های فاز فریتی دو مد، آنتن‌های آرایه فازی ردیاب، قفل‌شوندگی، رادار

تاریخ ارسال مقاله: ۹۹/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۰۸

نام نویسنده مسئول: حمیدرضا دلیلی اسکویی

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

تغییر دهنده‌های فاز، عناصر حیاتی برای رادارهای آرایه فازی الکترونیکی هستند که اجازه هدایت پرتو را با سرعت بسیار بالا و در نتیجه دستیابی به چند هدف و ردیابی با قابلیت چند حالته می‌دهند. این موارد به تعداد زیادی تغییردهنده فاز در آنتن برای تشکیل مناسب پرتو، مورد نیاز می‌باشد. با تاباندن موج RF[1] به تغییردهنده فاز، می توان پرتو را در جهت مورد نظر هدایت کرد. رادارهای آرایه ای فازی در مواردی به کار می روند که لازم است پرتو به سرعت از یک موقعیت در فضا به مکان دیگر منتقل شود و سرعت دستیابی به اطلاعات اهداف بسیار سریع قابل دسترسی باشد. آنتن‌های آرایه فازی مبتنی بر فریت، رویکردی مقرون به صرفه و کاملاً اثبات شده برای دستیابی به سیستم راداری زمینی با عملکرد بالا فراهم می کند[۱].

در رادارهای معمولی، آنتن‌ها بی وقفه در حال چرخش هستند و پرتوی ریزموج[2] را در فضا برای جستجوی اشیاء تابش می‌کند. پرتوی ریزموج در رادارهای آرایه فازی غیرفعال[3] ردیاب (PAR)[4] بدون هیچ حرکت مکانیکی آسمان را اسکن می‌کند. رادارهای آرایه فازی مجموعه‌ای از عناصر تابشی یکسان می‌باشد، که توانایی انتقال و دریافت سیگنال‌های جداگانه را دارند[۲]. ساختارهای آرایه فازی می‌توانند به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم شوند[۳]. ساختار غیرفعال، مصرف توان، حجم، وزن و هزینه تمام شده را کاهش می‌دهد. اما تلفات سیگنال ریزموج و نویز سیستم در آن زیاد بوده و بازدهی نیز پایین می‌باشد. برعکس، ساختارهای فعال که وزن، حجم و هزینه تمام شده را افزایش داده، و نویز سیستم در آن کم و بازده سیستم افزایش می‌یابد[۳]. تغییردهنده‌های فاز را می‌توان به دو دسته کلی الکترونیکی و میکانیکی تقسیم‌بندی نمود. تغییردهنده فاز مکانیکی خود از دو نوع موجبری و کابل هم‌محور تشکیل شده است. تغییردهنده فاز الکترونیکی را می‌توان برحسب نوع ماده واسط و مکانیزم به کار گرفته شده، به انواع فریتی، نیمه‌هادی، FET[5] اکتیو، و نیمه‌هادی حجیم دسته‌بندی نمود. تکنیک‌های دیگر تغییر فاز نیز نظیر تیوب های موج آهسته و پلاسمای حجیم نیز وجود دارند که به دلیل محبوبیت تغییر دهنده‌های فاز فریتی و نیمه‌هادی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. تغییردهنده‌های فاز فریتی یک کلاس خاص از تغییر دهنده‌های فاز هستند که از سال ۱۹۵۰ مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تغییردهنده‌های فاز عموما در فرکانس‌های بیش از ۵گیگاهرتز مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌هایی نظیر تلفات کم، نرخ توان بالا و دقت بالا را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، تغییر دهنده‌های فاز نیمه‌هادی خصوصیاتی مانند نرخ سوییچینگ بالا، توان سویچینگ کم، اندازه کوچک و وزن کم را دارا می‌باشند[۴].

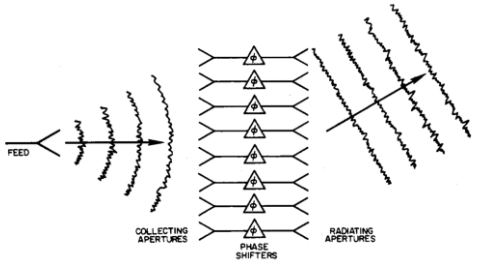
برتری که تغییردهنده فاز فریتی نسبت به مدل نیمه‌رسانایی دارند:

۱_تغییر فاز در تغییردهنده فاز فریتی بیشتر از۳۶۰درجه و در تغییردهنده فاز نیمه‌رساناها حداکثر ۴۰ درجه است[۵].

۲_ در تغییردهنده فاز نیمه‌رسانایی با افزایش فرکانس، تلف عبوری افزایش می‌یابد(بهترین باند کاری این نوع از تغییردهنده‌ها باند C,S) است.

۳- حداکثر توان تغییردهنده فاز نیمه‌رسانا در حد وات است، اما در تغییردهنده فاز فریتی موجبری درحدکیلووات می‌باشد.

کاربرد تغییردهنده‌فاز در آنتن‌های دوآل‌مد[6] به صورت تغذیه فضایی می‌باشد(شکل۱). که می‌توان به سامانه‌های اس۳۰۰ اشاره کرد.



شکل (۱):تغییردهنده فاز در آنتن‌های تغذیه فضایی[۹]

از نمونه داخلی که در آن از تغییردهنده‌های فاز فریتی استفاده شده است، می‌توان به سامانه راداری سوم خرداد اشاره کرد.

نسخه‌های اولیه‌ی تغییردهنده‌های فاز فریتی قفل شونده در ابتدا به صورت طولی، گسسته بوده‌اند و هرقسمت وظیفه تغییر فاز را برعهده داشت. بنابراین برای یک تغییردهنده فاز ۴بیتی ۴طول (l_1 تا l_4) که توسط دی‌الکتریک جدا شده‌اند و هر قسمت دارای مغناطیس شدگی واحد با طولی متفاوت می‌باشند تغییر فاز را ایجاد می‌کنند. راه اندازی این تغییردهنده‌ها به صورت الکترونیکی راحتر است اما ماشین‌کاری و سرهم بندی تغییردهنده فاز مشکل می‌باشد[۴].

۲- معرفی تغییردهنده فاز فریتی

تغییردهنده‌های فاز فریتی یک کلاس خاص از تغییردهنده‌های فاز هستند که قادر بکارگیری سطوح بالایی از توان در طیف فرکانس رادیویی می‌باشند. تغییردهنده‌های فاز

[1] Radio Frequency
[2] Microwave
[3] Passive
[4] Phase Array Radar
[5] Field Effect Transistor
[6] Dual mode

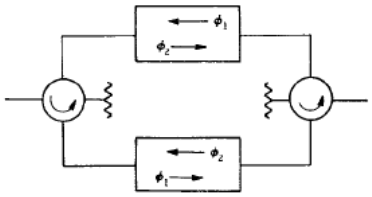
www.SID.ir

Archive of SID

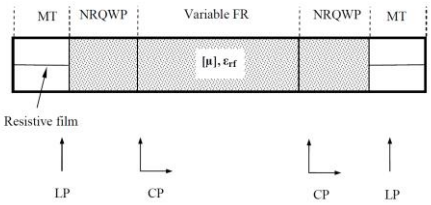
فریتی می‌توانند از فرکانس‌های رادیویی تا موج میلیمتری با تلفات عبوری کم کارکنند. پس از اختراع اولین تغییردهنده فاز فریتی عملی در سال۱۹۵۷، انواع متنوعی از تغییردهنده‌های فاز فریتی ارائه شده‌اند. این تغییردهنده‌های فاز در کاربردهایی که نیاز به توان بالا دارند، بکار گرفته می‌شوند[۴]. ازآنجا که تغییردهنده‌های فاز فریتی اصولا در موارد توان بالا به کار گرفته می‌شوند، برای واسط انتقال اصلی از موجبر یا خط کواکسیال استفاده می‌گردد. با پیشرفت تکنولوژی سرامیک، تغییردهنده‌های فاز فریتی در اشکال مسطح ظهور پیدا کرده‌اند. خطوط مایکرواستریپ، استریپ‌لاین و موجبرهای هم صفحه مثال‌هایی ازاین اشکال صفحه‌ای می‌باشند که در تغییردهنده‌های فاز فریتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۶].

۲-۱- تغییردهنده فاز فریتی دومد هم پاسخ

این تغییردهنده فاز در اصل نوعی تغییردهنده فاز چرخشی فارادی محسوب می‌شود. تغییر فاز هم پاسخ از سری کردن دو قطبی کننده ناهم‌پاسخ در دو سر بخش چرخنده فارادی متغیر حاصل می‌گردد. بخش اصلی تغییردهنده فاز از یک موجبر پر شده از فریت، که به صورت طولی مغناطیس شده تشکیل شده است. یک روش جالب به منظور تولید تغییردهنده فاز هم پاسخ، استفاده از تغییردهنده‌های فاز ناهم‌پاسخ با سیرکولاتورهایی در ورودی و خروجی می‌باشد. در این حالت، سیگنال‌هایی که از چپ به راست حرکت می‌کنند از مسیر تغییردهنده فاز پایینی عبور داده می‌شوند، در حالی که سیگنال‌هایی که از راست به چپ حرکت می‌کنند از تغییردهنده‌ی فاز بالایی ارسال می‌گردند(شکل ۲). به کارگیری این طرح برای دستیابی به تغییر فاز هم پاسخ، هرچند پهنای باند مطلوبی را ارائه می‌دهد، اما دارای پیچیدگی ساختار و تلفات اضافی ناشی از سیرکولاتورهای ورودی و خروجی است. با به‌کارگیری یک خط انتقال دومد می‌توان از میزان پیچیدگی‌ها کاست. در میان ساختارهای هم پاسخ، تغییردهنده فاز دومدِ بیشتر از همه مورد بررسی قرار گرفته است. که گونه‌ای متفاوت از تغییردهنده فاز چرخش فارادی می‌باشد. بدلیل سری کردن قطبی کننده‌های ربع موج در دو سر بخش چرخنده فارادی متغیر، مشخصه تغییرفاز هم پاسخ حاصل می‌شود. مغناطیس‌شوندگی از طریق آهنرباهای چهارقطبی بدست می‌آید. مبدل‌های تطبیق[۷] دی‌الکتریک برای تطبیق امپدانس بین موجبر مستطیلی و موجبر دایروی پرشده از فریت در دو سر ساختار فریتی استفاده شده است (شکل ۳) [۴].



شکل(۲): تغییردهنده فاز دو کله[۴]



شکل(۳): مقطع عرضی تغییر دهنده فاز دومد و توزیع پلاریزاسیون[۴]

بنابراین، این بخش از یک میله فریتی با مقطع دایروی (یا مربعی) باروکش فلزی تشکیل شده‌است که برای تولید میدان مغناطیسی خارجی از یک سیم‌پیچ دور میله فریتی، که در طول میله قرار گرفته، استفاده شده است[۴]. برای کاهش مصرف توان در عنصر با قرار دادن دو عنصر فریتی به شکل یوغ، یک مسیر بازگشت خارجی برای شار مغناطیسی در میله ایجاد می‌کنند تا عملکرد قفل شوندگی را ممکن سازند [۲]. آهنربای چهار قطبی را بر طول فریت امتدادیافته سوار می‌کنند تا عملکرد این قطبی‌کننده‌های ناهم پاسخ، مشابه با صفحه ربع موج دی‌الکتریکی متداول در موجبرهای دایروی باشد تا موج تابیده‌شده با پلاریزاسیون خطی را به پلاریزاسیون دایروی و بالعکس تبدیل کنند.

سیگنال RF با پلاریزاسیون خطی از پورت سمت چپ (فرض) وارد تغییردهنده فاز می‌شود، که با استفاده از قطبی‌کننده‌ها به پلاریزاسیون دایروی تبدیل می‌گردد و در طول میله فریتی، که به صورت طولی مغناطیس شده است، اختلاف فاز φ را ایجاد می‌کند، سپس توسط قطبی کننده دوم به پلاریزاسیون خطی تبدیل می‌گردد. از آنجا که پلاریزاسیون و جهت انتشار هر دو عکس می‌گردند اختلاف فاز ایجاد شده به میزان φ خواهدبود. در دهانه موجبر، سیگنال با پلاریزاسیون عمودی ناخواسته توسط صفحه مقاومتی[۸]، جذب می‌شود[۴].

۲-۲- راه اندازی فریت

تغییردهنده فاز فریتی با اعمال جریان بایاس DC به فریت و چرخش الکترون‌ها درون فریت کار می‌کنند و فرکانس چرخش آن، متناسب با دامنه میدان مغناطیسی خواهدبود. نفوذپذیری فریت به صورت یک تانسور شکل می‌گیرد، که عناصر آن تابعی از جریان بایاس است. ثابت انتشار که وابسته

[7] Matching Transformers

[8] Resistive Film

www.SID.ir

Archive of SID

به نفوذپذیری ماده فریت است با تغییر جریان بایاس تغییر می‌کند[۷]. شیفت دهنده‌های فاز بر اساس چرخش فارادی درون فریت، طراحی می‌شوند. در این نوع از ساختارها موج با پلاریزاسیون دایروی در فریت (که معمولاً به صورت میله استوانه‌ای است) دچار چرخش می‌شود. از پیچش موج در فریت برای ایجاد تغییر یا تاخیر فاز استفاده می‌کنند.
تغییردهنده‌های فاز در سیستم‌های عملی به منظور سوییچ کردن و کنترل سیگنال‌ها به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳- طراحی فیزشیفتر

در این بخش به طراحی یک تغییر دهنده فاز دومد در باند Ku پرداخته می‌شود. مشخصات مورد نیاز در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول(۱): مشخصات مورد نیاز تغییردهنده فاز دومد

پارامترهای طراحی	مقدار
فرکانس مرکزی	۱۶.۲۵ گیگا هرتز
پهنای باند	۷۰۰مگا هرتز
VSWR[۹]	۱.۵ :۱ ماکزیمم
تلف عبوری	کمتر از ۲ دسیبل
اختلاف فاز دیفرانسیلی	۳۶۰ درجه
توان بیشینه	۴۵ وات
توان متوسط	۶ وات

۳-۱- جنس ماده فریت

برای تعیین جنس فریت باید چند نکته رو در نظر گرفت:
۱)تلف عبوری حداقل باشد.۲)طول میله حداقل شود.۳) قابلیت تحمل توان، مورد نظر را داشته‌باشد. ۴) پهنای باند مورد نظر را برآورده کند.

با مطالعات صورت گرفته برای تعیین مقدار $4\pi M_s$ باید از رابطه $\mathbf{m} = \frac{\gamma 4\pi M_s}{\omega}$ استفاده‌کرد. مقدار m که تعیین‌کننده مغناطیس شوندگی اشباع فریت است در محدودهٔ $0.4 < m < 0.6$ قرار دارد[۴].
با توجه به میزان تحمل توان مورد نیاز توسط تغییردهنده فاز، مقدار m، برابر ۰.۵ انتخاب می‌گردد. در نتیجه در فرکانس ۱۶.۳۵ گیگا هرتز مقدار $4\pi M_s$ برابر با ۲۵۰۰ گوس خواهد بود. فریت نیکل-زینک (N24) دارای پارامترهای مورد نظر می‌باشد که در (جدول۲) آمده‌است.

جدول(۲): پارامترهای فریت انتخابی

نوع فریت	نیکل-زینک
$4\pi M_s$	۲۵۰۰
ΔH	۲۰۰
ε_r	۱۲.۷
تلفات عبوری	۰.۰۰۰۵
Tc	۵۰۰

۳-۲- قطر فریت

در عمل به منظور کاهش تلف ناشی از دیوارهای فلزی (که منبع اصلی تلف تغییردهنده فاز محسوب می‌گردد) سعی بر این شده‌است، تا جای ممکن قطر میله افزایش یابد. در تغییردهنده فاز دومد، به دلیل اعوجاج ایجاد شده توسط قطبی کننده ناهم پاسخ در میله فریتی، احتمال کوپلینگ بین مد غالب TE11 و مدهای با تقارن تربیعی دیگر زیاد است. بدین منظور، بزرگترین قطر به نحوی انتخاب می‌گردد که پایین ترین مد درجه بالاتر با تقارن تربیعی (مد TE21) قطع گردد. در نتیجه برای محاسبه قطر از رابطه (۱) استفاده شده‌است:

$$D = \frac{3.054}{\pi f_c \left(\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (۱)$$

که D، مقدار ماکزیمم قطر فریت می‌باشد. با انتخاب قطر۴.۲ میلیمتری شرایط ذکر شده در بالا اطمینان بخش خواهد بود .

۳-۳- طول میله فریتی

بعد از محاسبه قطر فریت قدم بعدی تعیین طول بخش تغییردهنده فاز یعنی L_r می‌باشد. برای دستیابی به تغییر فاز دیفرانسیلی از ۰ تا ۳۶۰ درجه در تمام فرکانس‌ها، بخش تغییر فاز را برای تغییر فاز دیفرانسیلی ماکزیمم برابر با ۵۰۰ درجه در فرکانس مرکزی ۱۶.۳۵ گیگا هرتز طراحی شده‌است.
سورین با بکارگیری روش اختلال، ثابت‌های انتشار را برای امواج با پلاریزاسیون راستگرد و چپگرد محاسبه نموده است که روابط آن در (۲) و (۳) ارائه شده‌است [۴].

$$\beta^{\pm} = \beta\left(1 + \Delta\beta^{\pm} / \beta\right) \qquad (۲)$$

$$\frac{\Delta\beta^{\mp}}{\beta} = \frac{1}{2}\left(\bar{\mu} - 1\right) \pm \frac{1}{\mathbf{s}_{11}^2 - 1}\bar{k} \qquad (۳)$$

S_{11} ریشه اول مشتق تابع بسل مرتبه اول J_1 و β ثابت انتشار موجبر دایروی در مد غالب می‌باشد. در نتیجه برای تغییر فاز در واحد طول طبق رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta\beta}{l} = \beta_- - \beta_+ \qquad (۴)$$

[9] Voltage Stand Wave Ratio

www.SID.ir

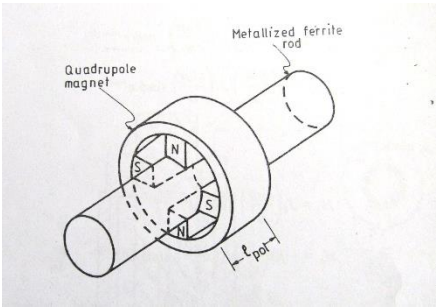
Archive of SID

بنابراین مقدار فریت برای بخش تغییر فاز برابر ۲۲.۹میلی متر خواهد بود. طول فریت مورد نظر نیز با در نظر گرفتن قسمت‌های تطبیق و میزان فریتی که در زیر آهنرباها قرار می‌گیرد، ۴۶.۵میلی‌متر محاسبه می‌گردد. در شکل ۴ فریت استفاده شده در تغییردهنده فاز مشاهده می‌گردد.

شکل(۴): فریت خریداری شده

۳-۴- طول آهنربای چهار قطبی

ترکیب میله فریتی و آهنربای چهار قطبی، همان‌طور که در (شکل ۵) ملاحظه می‌شود یک قطبی کننده ناهم پاسخ را نشان می‌دهد. اصول عملکرد این قطبی‌کننده برای اولین بار توسط فاکس و همکاران ارائه شده است[۴].



شکل(۵): مجموعه آهنربای چهارقطبی و میله فریتی[۳]

براساس کار هوردبرید و دیاز فرمول تجربی برای طول قطبی کننده به ازای اختلاف فاز ۹۰ درجه مطابق با روابط (۵) و (۶) ارائه شده است[۴].

(۵)

$$L_{poll} = 0.346 \times \frac{M_s}{M_r} \times \frac{2a\left[1 - m^2 r\left(1+r\right)\right]}{m}$$

$$r = \left[\frac{M_r}{M_s} \times \left(\frac{M_r}{M_s} - \frac{1}{2}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۶)$$

بعد از جای گذاری مقادیر فرمول‌های بالا مقدار طول آهنربا قطبی شدگی برابر با ۳میلی‌متر بدست آمده است. در مجموع با توجه به آنچه ذکر شد پارامترهای طراحی تغییردهنده فاز مورد نظر مطابق با جدول ۳ می‌باشد.

جدول (۳): پارمترهای طراحی

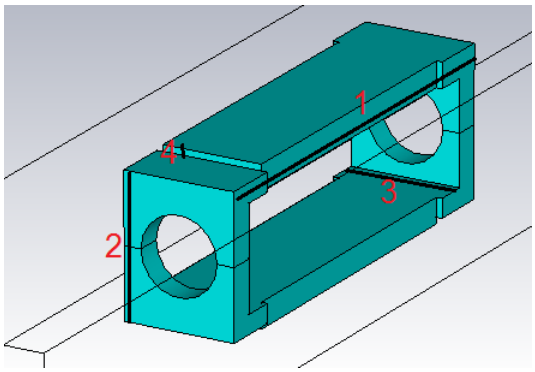
قطر میله فریتی	قطر ۴.۲ میلی متر
طول میله فریتی	۲۲.۹میلی متر
جنس ماده روکش	مس
ضخامت ماده روکش فلزی	۰،۰۰۲میلی متر
طول آهنربای چهار قطبی	۳میلی متر

در شکل ۶ آهنربای خریداری شده، نشان داده می‌شود.

شکل(۶): آهنربای خریداری شده

۳-۵- یوغ

یوغ دو میله فریتی بلند و باریک از جنس فریت یا هر فلز مغناطیسی دیگری هستند که از بیرون درکنار میله فریتی تغییردهنده فاز قرار می‌گیرند و از دو انتها به سیم پیچ بایاس کننده فریت متصل می‌شوند. البته بیشتر مرسوم است که از فریت در ساخت یوغ‌ها استفاده شود. با بررسی مقالات مختلف، کاربرد یوغ در این مجموعه کاهش مصرف انرژی از طریق به اشباع بردن میله فریتی از طریق اعمال موج مربعی خارجی می‌باشد. (شکل۷) نمایی از یوغ طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل(۷): نمایی ازیوغ طراحی شده

یوغ مسیر عبور شار میدان مغناطیسی استاتیک را می‌بندد. میزان جریانی که لازم است، تا میله فریتی استفاده شده در یوغ به اشباع برده شود، توسط همان سیم‌پیچ تامین می‌شود که فریت تغییردهنده فاز را تغذیه می‌کند[۳].

در نمونه طراحی شده، یوغ را شبیه‌سازی و در ساختار به کاربرده شده است. یوغ طراحی شده دارای مغناطیس شدگی اشباع ۵۰۰۰ گوس و ضریب گذردهی (ε) برابر با ۱۵.۳ با نام

www.SID.ir

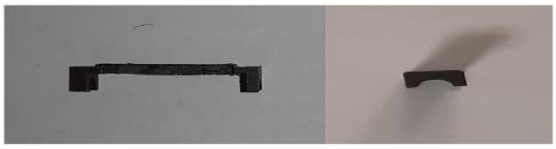
Archive of SID

تجاری لیتیوم-زینک(A50) انتخاب گردید. ابعاد یوغ طراحی شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): مشخصه طراحی یوغ(mm)

۱	۲۳ .۵	۳	۶.۲
۲	۷.۸۴	۴	۰.۳۵

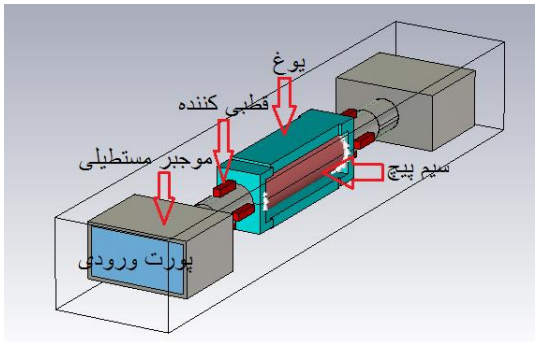
شکل۸ یوغ ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل(۸): یوغ ساخته شده

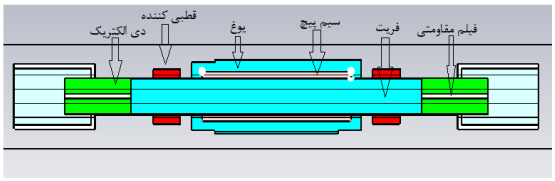
۴- شبیه‌سازی تغییر دهنده فاز فریتی

بعد از محاسبه طول فریت و قطبی کننده‌ها، شبیه‌سازی تغییردهنده فاز در نرم افزارCST STUDIO 2018 انجام شده است. در این مرحله برای شبیه‌سازی آهنرباها و سیم‌پیچ که کار قطبی کنندگی و بایاس کردن فریت را برعهده دارند. از محیط استاتیک در نرم افزارCST STUDIO استفاده شده است. سپس از طریق محیطی که در نرم افزار در قسمت Baised Ferrite-EM Coupling فراهم شده است، دو محیط ریزموجی و استاتیک را به هم لینک می‌کنند. از این طریق تاثیرات میدان‌های استاتیکی را به محیط ریزموج انتقال می‌دهد. در (شکل ۹) نمایی از تغییردهنده فاز، یوغ، قطبی کننده‌ها و موجبرهای دایروی و مستطیلی مشاهده می‌شود.



شکل(۹): تغییر دهنده فاز

در (شکل۱۰) که برش طولی از تغییردهنده فاز است. ابعاد موجبر مستطیلی برابر با ۶.۵×۱۳میلی‌متر می‌باشد. گذر از موجبر مربعی به دایروی و بالعکس توسط ماده دی‌الکتریک، با ضریب نفوذپذیری $\varepsilon_{rd} = ۱۵.۹$ صورت می‌پذیرد. شبیه‌سازی به ازای طول‌های متفاوتی از دی‌الکتریک انجام شده و نتایج هم پاسخ تنها زمانی حاصل شد که دی‌الکتریک به میزان ۴ میلی‌متر در موجبر دایروی امتداد یابد. کل طول دی‌الکتریک ۹ میلی‌متر می‌باشد.

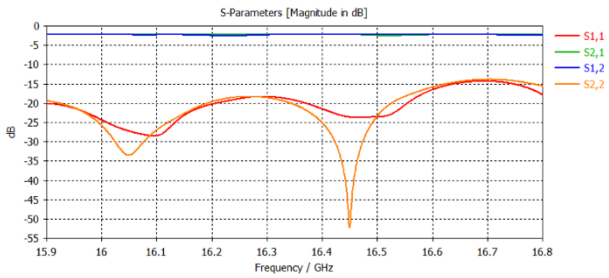


شکل(۱۰): نمای طولی از تغییردهنده فاز

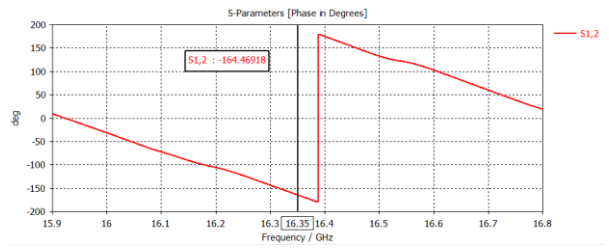
همان طور که قبلا ذکر شد قطبی کننده پلاریزاسیون خطی به دایروی و بلعکس از قراردادن چهارقطب آهنربا در اطراف موجبر دایروی تشکیل می‌شود. چنانچه شار مغناطیسی ۰.۲۵تسلا برای آهنرباها انتخاب گردد. شارمغناطیسی سیم‌پیچ با ماکزیمم حدود ۱۰۰۰ گوسی در موجبر دایروی ایجاد می‌گردد.

۵- نتایج شبیه سازی

بعد از مراحل شبیه‌سازی و رسیدن به حالت بهینه، نتایج خروجی به ازای جریان ۱۰۰ آمپر، خروجی پارامترهای S_{11} (قرمز) و پارامتر S_{21} (آبی) در (شکل ۱۱) و تغییر فاز را در (شکل ۱۲ و شکل۱۳) نشان داده شده است.



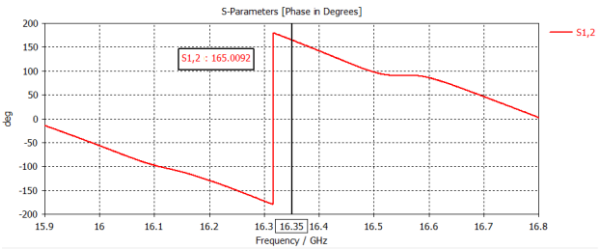
شکل(۱۱) پارامترهای s در ازای جریان سیم پیچ ۱۰۰ آمپر



شکل(۱۲): نمودار فاز به ازای تغییر جریان۱۰۰آمپر

www.SID.ir

Archive of SID

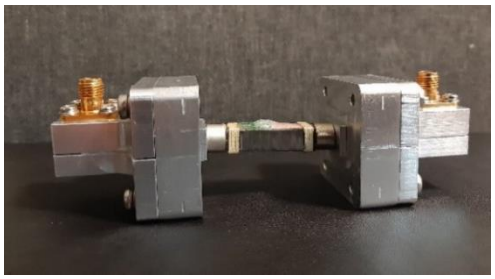


شکل(۱۳): نمودار فاز به ازای تغییر جریان ۲۰آمپر

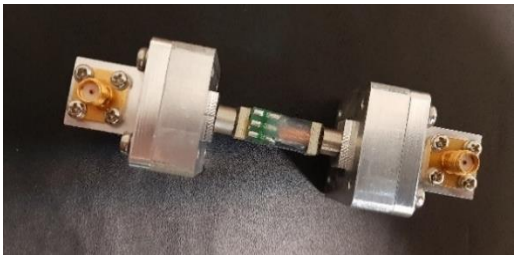
شکل‌های ۱۲،۱۳ تغییر فاز جریان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با جریان ۱۰۰ آمپر در فرکانس ۱۶.۳۵ گیگاهرتز فاز برابر۱۶۴٫۴- درجه می‌باشد و به‌ازای جریان ۲۰ آمپر تغییرفاز برابر است با ۱۶۵ درجه است.

۶- نمونه ساخته شده و نتایج نهایی

پس از مطالعه و شبیه‌سازی تغییردهنده فاز و بدست آوردن نتایج مدنظر، ساخت تغییر دهنده فاز صورت‌گرفته است. فریت مورد نظر از شرکت EXXELIA TEMEX خریداری شده است. شکل۳ فریت خریداری شده را نشان می‌دهد. آهنربا هم با ابعاد طراحی شده، تهیه و در(شکل۵) نشان داده‌شده است. در (شکل ۱۴و شکل ۱۵) مدل ساخته شده مشاهده می‌گردد. برای ساخت آدبتور (تست تغییر دهنده فاز) و موجبر مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک طراحی و مدل کرده و با استفاده از دستگاه CNC تراش داده شده است.

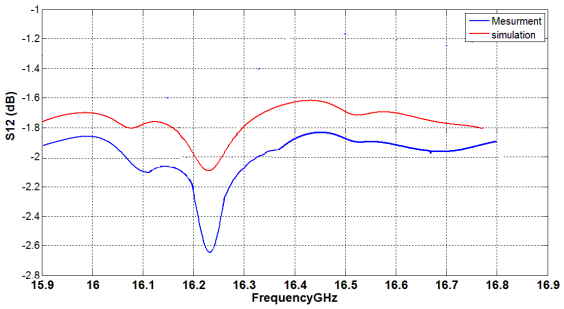


شکل(۱۴): مدل ساخته شده از نمای کناری

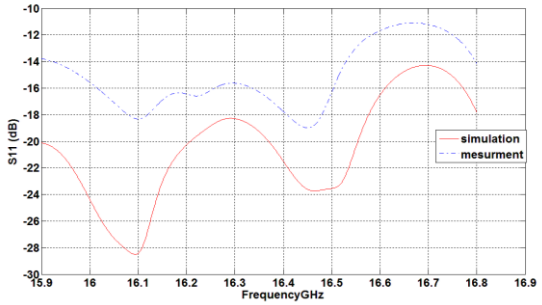


شکل(۱۵): مدل ساخته شده از نمای بالا

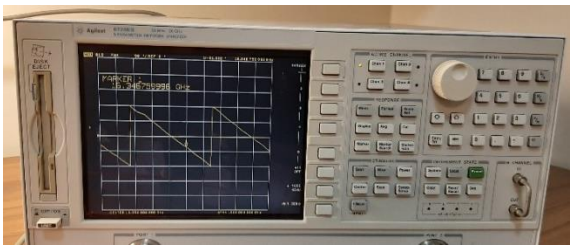
برای تست تغییردهنده فاز در واقعیت با استفاده از یک موج مربعی بادامنه ۱۵ ولت و با عرض موج مربعی متغییر صورت می‌پذیرد. تغییر عرض موج مربعی باعث ایجاد فازهای مختلف می‌شود، برای تولید موج مربعی بازنشانی از دستگاه PST101 که ساخته دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری است، استفاده شده است. نتایج بدست آمده پس از تست نشان از شبیه‌سازی صحیح و مونتاژ دقیق مجموعه‌ای از عناصر را نشان می‌دهد. مقدار اختلاف موجود در تلف S_{21} (شکل ۱۶) هم مربوط به تلف سیم پیچ که به دور فریت پیچیده شده است و ضریب گذر دهی دی‌الکتریک است که به علت نبود دی‌الکتریک مشابه با فریت از اکسید الومینا با ضریب $\varepsilon_{rd} = ۱۰$ می‌باشد. (شکل۱۶) نمودار تلف عبوری را با مقدار شبیه‌سازی و تست را نشان می‌دهد. در (شکل ۱۷) نمودار پارامتر S_{11} و در (شکل ۱۸) نمودار فاز نشان داده شده است. (شکل ۱۹) نمودار تغییرفاز در پهناهای موج مربعی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل(۱۶): نمودار تلف عبوری S_{21}



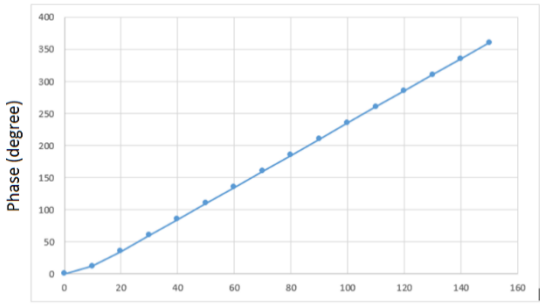
شکل(۱۷): مقایسه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نمودار S_{11}



شکل(۱۸): نمودارفاز در هنگام تست

www.SID.ir

Archive of SID



شکل(۱۹): نمودار تغییرفاز برحسب تغییر عرض موج مربعی (us)

۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک تغییردهنده فاز فریتی دومد هم پاسخ در باند Ku طراحی و ساخته شده است. عنصر طراحی شده با استفاده از نرم افزار Cst Stdiuo 2018 شبیه‌سازی شده است. اجزای تغییردهنده فاز طراحی شده شامل: ۱)میله فریت که وظیفه تغییر فاز را برعهده دارد. ۲)یوغ وظیفه‌ی قفل شوندگی که باعث کاهش مصرف توان در عنصر و کل مجموعه می‌شود. ۳) قطبی‌کننده که وظیفه تغییر موج با پلاریزاسیون خطی به دایروی را دارد. این تغییر دهنده فاز دارای تلف عبوری زیر 2.5dB در کل پهنای باند مورد استفاده می‌باشد. شیف دهنده فاز طراحی شده ساخته شده و توسط ستآپ ساخته شده مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تست با نتایج طراحی و شبیه‌سازی منطبق می‌باشد.

مراجع

[1] Aggarwal. M, Matheru. B.S" Virtual Prototyping and Development of Rotary Field Ferrite Phase Shifter", Defence Science Journal, Vol. 66, No. 2, March 2016, pp.156-161, DOI : 10.14429/dsj.66.9309.
[2] Boyd, C. R, "A dual-mode latching reciprocal ferrite phase shifter". IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, Vol.18, No.12, 1119-1124. 1970
[3] Parker, D., & Zimmermann, D. C. "Phased arrays-part 1: theory and architectures." IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol.50, No.3, PP. 678-687.2002
[4] Koul, S. K., & Bhat, B. Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters: Semiconductor and Delay Line Phase Shifters. Artech House.1991
[5] Ding, C., Guo, Y. J., Qin, P. Y., Bird, T. S., Yang, Y. "A defected microstrip structure (DMS)-based phase shifter and its application to beamforming antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.62, No.2, pp. 641-651, 2014.
[6] Varadan, V. K., Jose, K. A., Varadan, V. V., Hughes, R., & Kelly, J. F. A novel microwave planar phase shifter. Microwave Journal, Vol.38, No.4, PP. 244-24, 1995
[7] Pozar, D. M. (2011). Microwave engineering. John wiley & sons.
[8] Fenn, A. J., Temme, D. H., Delaney, W. P., Courtney, W. E. "The development of phased-array radar technology", Lincoln Laboratory Journal, Vol.12, No.2, pp.321-340, 2000.
[9] Hatcher, B. R." Collimation of Row-and-Column Steered Phased Arrays", VOL. 56, NO. 11. PP. 1787-1790 1968.
[10] Shafaee, M., Razavi, S. M. J., & Hamidi, E. (). A New Circular Polarization Metamaterial Ferrite Phase Shifter. Journal of Communication Engineering, Vol.8, No.1, PP.104-115. 2019.
[11] Bansal. K, Gautam. R. K, Matheru. B.S," LABVIEW BASED RF CHARACTERIZATION AND TESTING OF DUAL MODE PHASE SHIFTER", International Journal of Research in Engineering and Technology. Volume: 04 Issue: 09 | September 2015.
[12] Jain. K. K, Bansal. K, Aggarwal. M, Matheru.B.S," Automatic Test Procedure for RF Characterization of C-band Rotary Field Phase Shifter(Volume) July 15, 2010.
[13] Dawar. P,"Design and Simulation of Rotary Field Ferrite Phase Shifter using Ansoft HFSS", International Conference Special Issue of IJCCT Vol.1 Issue 2, 3, 4; 2010.
[14] Green .J.J, F. Sandy, "Microwave Characterization of Partially Magnetized Ferrites" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 22, pp. 641-645, 1974.
[15] Rodrigue. G, Lavedan. L, L Hodges, G. Harrison, "Magnetostrictive effects on latching Ferrite devices " IEEE Trans. Magnetics, vol. 4, pp. 609-610, 1968.
[16] Park. J. M; Park. D.C; "X-band ferrite phase shifter in waveguide geometry"TENCON '93 , vol.3, pp. 464 – 467, 1993.
[17] Green.J.J, Van Hook.H.J, "Microwave Properties of Lithium Ferrites (Short Papers) ", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.25, pp. 155-159, 1977.
[18] Klein. G,"Transient thermal behavior of latching ferrite phase shifters" , IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.15, pp. 429–430, 1967.
[19] Clark.W.P, Hering.K.H, Charlton. A, "TE-mode solutions for partially ferrite filled rectangular waveguide using ABCD matrices", IEEE Int. Convention Record, vol. 14, (5), pp. 39–48, March 1966.
[20] Polder. D, "On the theory of ferromagnetic resonance," Phil. Mag., vol. 40, pp. 99-115, Jan. 1949.

www.SID.ir