

## **Design and Parametric Analysis of the Dual Mode Ferrite Phase Shifter with Linear Polarization**

**S. M. J. Razavi<sup>1\*</sup>, E. Hamidi<sup>2</sup>, R. Toreinia<sup>3</sup>**

\* Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 14/06/2020; Accepted: 12/08/2020)

### **Abstract**

*The design of a dual mode ferrite phase shifter with linear polarization is investigated in this paper. Phase shifters are one of the most commonly used components in phased array radars. The main parts of this phase shifter are ferrite rod, yoke and polarizer. The main specifications of phase shifter are 10.1-10.7 GHz bandwidth, less than 1 dB average loss and 360 degree phase shift. Due to the limitations of manufacturing in some parts, a parametric analysis has been performed on some specifications and the allowable amount of changes in these parameters such as yoke and ferrite rod contact length and the air gap between them, the length and radius curvature of polarizer has been reported.*

**Keywords:** Phase Shifter, Dual Mode, Ferrite, Phased Array Radar, Parametric Analysis

---

\* Corresponding author E-mail: razavismj@mut.ac.ir

## طراحی و تحلیل مولفه‌های تغییر دهنده فاز فریتی دومی با قطبش خطی

سید محمدجواد رضوی<sup>۱\*</sup>، عماد حمیدی<sup>۲</sup>، رضا ترینیا<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، ۲- استادیار، ۳- پژوهشگر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲)

### چکیده

در این مقاله طراحی یک تغییر دهنده فاز فریتی دومی با قطبش خطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییر دهنده‌های فاز یکی از قطعات پر کاربرد در رادارهای آرایه فازی هستند. قطعات اصلی این تغییر دهنده فاز، میله و بوغ فریتی و قطبی کننده است. مشخصات هدف تغییر دهنده فاز شامل پهنای باند فرکانسی ۱۰/۷-۱۰/۱ GHz، متوسط تلف کمتر از ۱ dB و تغییر فاز ۳۶۰ درجه می‌باشد. به علت محدودیت‌های ساخت در برخی قطعات، یک تحلیل پارامتری روی برخی از مشخصات انجام شده است و میزان مجاز تغییرات این پارامترها نظیر طول تماسی بوغ و میله فریتی و فاصله هوایی بین آن‌ها، طول و شعاع انحناء قطبی کننده گزارش شده است.

**کلید واژه‌ها:** تغییر دهنده فاز، دومی، فریت، رادار آرایه فازی، تحلیل پارامتری

### ۱- مقدمه

تغییر دهنده فاز<sup>۱</sup> ابزاری است که زاویه فاز موج انتقالی را تغییر داده و تنظیم می‌کند. به طور ایده‌آل، درگاه‌های ورودی و خروجی تغییر دهنده فاز از لحاظ امپدانس تطبیق بوده و هیچ تلفی در فرآیند گذر موج اتفاق نمی‌افتد. این ملزومات در عمل، تا حد معقولی می‌توانند از حالت آرمانی دور شوند [۱]. تغییر دهنده فاز در آنتن‌های آرایه‌ای با جستجوی الکترونیکی<sup>۲</sup> (ESA)، برای چرخش گلبرگ اصلی<sup>۳</sup> پرتو آرایه آنتن‌های رادار، با هدف پوشش عبور و مرور هوایی یک منطقه و یا ردگیری اهداف نظامی و یا ایجاد صفر<sup>۴</sup> در پرتو آرایه آنتن‌ها در راستای انتشار بمب الکترومغناطیسی<sup>۵</sup> (EMP) در جنگ الکترونیک، و در طراحی مدولاتورها و دمدولاتورهای دیجیتال و آنالوگ استفاده می‌شود [۱]. از دیگر کاربردهای تغییر دهنده فاز می‌توان به ادوات اندازه-گیری آنتن و مایکروویو و تجهیزات کالیبراسیون آرایه آنتن‌ها [۲] نیز اشاره کرد. در حالت کلی، فاز تغییر دهنده‌های فاز، هم به صورت مکانیکی [۳،۴] و هم به صورت الکتریکی قابل کنترل است. از تغییر دهنده‌های فاز کنترل پذیر مکانیکی، بیشتر در موارد خاص و محدود آزمایشگاهی استفاده می‌شود. تغییر دهنده‌های فاز تنظیم پذیر الکتریکی، با جریان یا ولتاژ الکتریکی کنترل می‌شوند و شامل چهار دسته کلی می‌باشند:

\* نویسنده مسئول: razavismj@mut.ac.ir

<sup>۱</sup> Phase Shifter  
<sup>۲</sup> Electronically Scanned Array  
<sup>۳</sup> Main Lobe  
<sup>۴</sup> Null  
<sup>۵</sup> Electromagnetic Pulse

- تغییر دهنده‌های فاز فریتی
- تغییر دهنده‌های فاز فروالکتریکی
- تغییر دهنده‌های فاز حالت جامد (دیودی، ترانزیستوری)
- تغییر دهنده‌های فاز MEMS<sup>۶</sup> [۵]

نیاز تحمل توان بالا در تغییر دهنده‌های فاز رادارهای آرایه فازی و ارتباطات ماهواره‌ای، فریت را در مقایسه با دیگر ادوات تنظیم پذیر به جزء جدانشدنی تغییر دهنده‌های فاز تبدیل کرده است [۶]. علاوه بر کاربرد توان بالای تغییر دهنده‌های فاز فریتی، می‌توان به تلف کم آن‌ها در مقایسه با تغییر دهنده‌های فاز نیمه هادی، MEMS و فروالکتریکی، اشاره کرد. در ترکیب فریت با ساختارهای فراماده می‌توان به مزیت کوچک‌سازی دست‌یافت [۷-۱۰].

در تغییر دهنده‌های 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 تغییر دهنده‌های فاز فریتی، بدین گونه است که با تغییر جریان بایاس خارجی، میدان مغناطیسی اعمال شده به ماده فریتی تغییر می‌یابد. با توجه به منحنی غیر خطی هیستریزس  $B-H$  با تغییر میدان مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی فریت تغییر می‌یابد، که این امر باعث تغییر ثابت انتشار فاز موج می‌گردد یا به عبارت دیگر، می‌توان گفت با تغییر جریان بایاس، فاز موج انتشاری کنترل می‌شود.

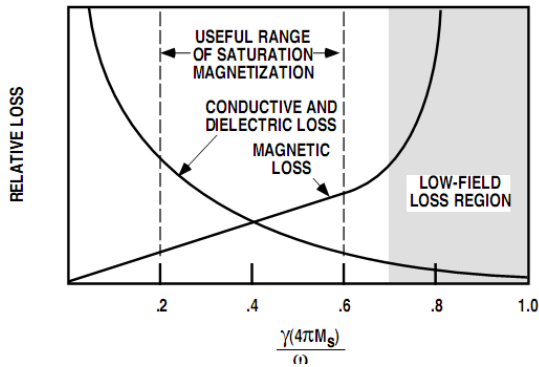
تغییر دهنده‌های فاز فریتی متداول صنعتی، با توجه به نحوه عملکرد و ساختارشان، به چهار دسته تقسیم می‌شوند [۲]:

<sup>۶</sup> Microelectromechanical systems

## ۲-۱- انتخاب نوع و ابعاد میله فریتی

### ۲-۱-۱- انتخاب نوع ماده فریتی برای میله

مهمترین پارامتر در انتخاب فریت مقدار  $4\pi Ms$  (مغناطیس‌شوندگی اشباع) می‌باشد که به مشخصاتی مانند تلف عبوری، طول میله، توان تحویلی و پهنای باند آن بستگی دارد. شکل (۲) تغییرات مؤلفه‌های تلف فریت را به صورت تابعی از مغناطیس‌شوندگی اشباع هنجار شده نمایش می‌دهد. برای قطر معین از میله فریتی، با افزایش مقدار  $4\pi Ms$  میزان تغییر فاز نیز افزایش می‌یابد. بنابراین متناسب با آن می‌توان طول میله را کاهش داد که منجر به کاهش تلف دی‌الکتریک و رسانا می‌گردد. از سوی دیگر، تلف مغناطیسی با افزایش  $4\pi Ms$  افزایش می‌یابد. مقدار  $4\pi Ms$  در محدوده‌ای انتخاب می‌گردد که تلف کل، حداقل گردد [۲].



شکل (۲): تلف فریت برحسب مغناطیس‌شوندگی اشباع نرمالیزه شده [۲].

برای این که طول و عرض میله فریتی کمینه شود باید مقدار  $m = \gamma 4\pi Ms / \omega$  در محدوده  $0.16$  تا  $0.165$  انتخاب شود ( $\gamma$  نسبت ژیرومگنتیک<sup>۲</sup> [۲]) با انتخاب  $m$  در این محدوده در فرکانس مرکزی  $10.4$  GHz مقدار  $2229 - 2414 G$   $4\pi Ms$  به دست می‌آید.

برای دستیابی به ویژگی قفل‌شوندگی در تغییردهنده فاز، پارامتر  $4\pi Mr$  (پسماند مغناطیسی) برای فریت مهم است [۲]. نسبت این پارامتر به پارامتر  $4\pi Ms$  در فریت‌ها، برای تغییردهنده‌های قفل‌شونده باید از  $70\%$  بالاتر باشد. هرچه این میزان بالاتر باشد مقدار جابه‌جایی فاز از زمان تمام شدن پالس تحریک، از نقطه اولیه روی نمودار هیستریزس، کمتر می‌شود. در جدول (۱) مشخصات مهم فریت‌های قابل انتخاب برای میله، از محصولات شرکت فرایت دامینکو [۱۴] و تمکس [۱۵] آمده است. در این جدول  $H_C$  برابر با میدان اعمالی مورد نیاز برای به صفر رساندن مغناطیس‌شدگی فریت و  $B_r$  همان  $4\pi Mr$  می‌باشد.

- تغییردهنده فاز چنبره‌ای (تک چنبره‌ای و دو چنبره‌ای)
- تغییردهنده فاز دومده
- تغییردهنده فاز میدان چرخان
- تغییردهنده فاز فریتی رجیا- اسپنسر

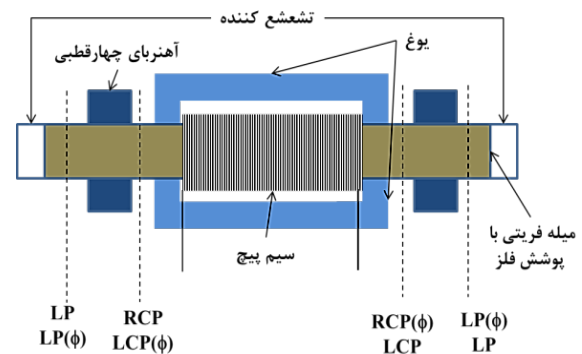
هرکدام از این چهار نوع تغییردهنده فاز، نسبت به دیگری دارای مزایا و معایبی هستند. تغییردهنده فاز دومده، گونه متفاوتی از تغییردهنده فاز چرخش- فارادی می‌باشد که به دلیل سری کردن قطبی‌کننده‌های ربع طول موج<sup>۱</sup> در دو سر بخش چرخاننده موج فارادی، مشخصه‌های تغییرفازشان هم‌پاسخ می‌شود که دلیل نام‌گذاریشان نیز همین است.

این تغییردهنده فاز در سال ۱۹۷۰ معرفی شد [۱۱] و در سال‌های بعد توسعه یافت و در آنتن‌های آرایه فازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲، ۱۳].

در این مقاله با استفاده از روابط موجود در مراجع، یک تغییردهنده فاز دومده در باند  $X$  طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. همچنین به دلیل پائین بودن دقت در فرآیند ساخت و نصب، با مطالعه پارامتری تغییردهنده فاز، حد مجاز تغییرات این پارامترها به دست می‌آید.

## ۲- طراحی تغییردهنده فاز دومده در باند $X$

تغییردهنده فاز دومده مورد طراحی در این مقاله حالت خاصی از تغییردهنده‌های فاز دومده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. مشخصات مهم تغییردهنده فاز شامل پهنای باند فرکانسی  $10.7$  GHz -  $10.1$  GHz، متوسط تلف کمتر از  $1$  dB و تغییر فاز  $360$  درجه می‌باشد. این قطعه شامل دو جزء اصلی فریتی (میله و یوغ) و مبدل‌های قبضش موج است که انتخاب نوع و ابعاد آن‌ها مسأله اصلی طراحی می‌باشد.



شکل (۱): شمای کلی و نحوه رفتار تغییردهنده فاز دومده.

<sup>2</sup> Gyromagnetic ratio

<sup>1</sup> Non reciprocal Quarter-Wave Polarizer

۱۰/۴ GHz در نظر گرفته شده است. طول میله درگیر بایاس و موثر در تغییر فاز ( $l_w$ ) برابر با ۳۴ mm به دست می آید که طول پنجره داخلی یوغ نیز باید همین مقدار در نظر گرفته شود. با این مقدار  $l_w$  تغییر فاز ۳۶۰ درجه تقریباً در  $M=990G$  حاصل می شود.

حداقل ضخامت فلز پوشش میله ( $l_c$ ) باید ۳ تا ۴ برابر عمق پوستی فلز مورد استفاده (مس) باشد.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_0 \mu_0 \sigma}} = 0.65 \mu m \Rightarrow l_c = 0.65 \times 4 = 2.6 \mu m \quad (4)$$

برای طول کل میله باید طول قطبی کننده های منصوب بر آن و ملاحظات مکانیکی نصب در آنتن نیز لحاظ شود.

## ۲-۲- انتخاب نوع و ابعاد یوغ فریتی

به دلیل این که، یوغ در تلفات RF شرکت نمی کند، یک ماده با  $4\pi M_s$  بالاتر از میله فریتی می تواند انتخاب شود. به دلیل ملاحظات مکانیکی و ابعاد میله سطح مقطع یوغ برابر با  $1.5 \times 8 = 12 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته شده است. اگر میله در حالت پسماند مغناطیسی باشد (یعنی بدون بایاس شار مغناطیسی بتواند در آن برقرار باشد) مطابق با رابطه (۴)، پسماند مغناطیسی یوک باید  $2212 G$  باشد تا مدار مغناطیسی برقرار باشد. در رابطه (۵)  $A_r$  سطح مقطع میله و  $A_y$  سطح مقطع یوغ است.

$$B_y = B_r \times \frac{A_r}{2A_y} = 1650 \times \frac{32.17}{2 \times 12} = 2212 G \quad (5)$$

در جدول (۲) مشخصات مهم فریت های قابل انتخاب برای یوغ، از محصولات شرکت فرایت دامینکو [۱۴] یا تمکس [۱۵] آمده است.

جدول (۲): پارامترهای مهم فریت قابل انتخاب برای یوغ.

نام ماده فریتی	$4\pi M_s$ (G)	$H_C$ (Oe)	$\epsilon'$	$tg \delta \times 10^4$	$B_r$
SL470	۴۷۰۰	۰/۶	۱۴/۷	۵	۳۰۰۰
A50	۵۰۰۰	۰/۵	۱۵/۳	<۵	۲۸۸۰

## ۲-۳- سیم پیچ و جریان تحریک

اگر قانون آمپر برای میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچ، با تقریب برابر بودن میدان مغناطیس در میله فریتی و یوغ ( $H_0$ ) نوشته شود رابطه (۶) به دست می آید.

$$2H_0(l_w + l_t) + 2H_g(l_g) = NI \quad (6)$$

بیشینه  $H_0$  باید از پنج برابر  $H_c$  میله فریتی بزرگتر باشد، با صرف نظر از میدان مغناطیس در فاصله هوایی ( $H_g$ ) و برای بالا بردن درجه اطمینان این مقدار دوازده برابر  $H_c = 1.3 Oe = 104 A/m$  (که در جدول (۱) آمده است)، در نظر گرفته می شود [۲].

جدول (۱): پارامترهای مهم میله فریتی قابل انتخاب.

نام ماده فریتی	$4\pi M_s$ (G)	$H_C$ (Oe)	$\epsilon'$	$tg \delta \times 10^4$	$B_r$
SL225	۲۲۵۰	۱/۱	۱۶/۳	۵	۱۶۵۰
A23	۲۳۰۰	۱/۳	۱۶/۸	<۵	۱۶۳۰

## ۲-۱-۲- محاسبه قطر و طول میله فریتی

بزرگترین قطر برای میله فریتی به نحوی انتخاب می شود که اولین مود مرتبه بالاتر (مود  $TE_{21}$ ) با تقارن چهارگانه در قطع بماند. رابطه (۱) عناصر غیر صفر تانسور تراوایی مغناطیسی را بیان می کند. در حالتی که میله مغناطیسی نشده است ( $M=0$ ) با  $\mu_d$  برابر است و مقدار آن  $0.187$  به دست می آید [۲]. در این روابط  $\omega_m = \gamma 4\pi M_s$  و  $\omega$  فرکانس زاویه ای کار می باشد.

$$\begin{cases} \mu_d = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \left(1 - \left(\frac{\omega_m}{\omega}\right)^2\right)^{1/2} \\ \mu_r = \mu_d + (1 - \mu_d) \left(\frac{M}{M_s}\right)^{3/2} \\ \kappa = \frac{\omega_m M}{\omega M_s} \end{cases} \quad (1)$$

اگر فرکانس قطع مود  $TE_{21}$  برابر با  $10/8 \text{ GHz}$  در نظر گرفته شود مطابق با رابطه (۲) شعاع میله باید کمتر از  $3/62 \text{ mm}$  باشد. شعاع میله  $3/2 \text{ mm}$  فرض می شود که فرکانس قطع متناظر با آن  $12/14 \text{ GHz}$  می باشد که محدوده فرکانسی مورد طراحی را شامل می شود.

$$a = \frac{3.054}{2\pi f_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \mu_r}} \quad (2)$$

طول میله باید به نحوی انتخاب شود که تغییر فاز دیفرانسیلی ۰ تا ۳۶۰ درجه در تمام فرکانس ها به صورت خطی حاصل شود. طول موثر برای حصول تغییر فاز ۳۶۰ درجه طولی است که زیر سیم پیچ تحت بایاس قرار می گیرد. مقدار تغییر فاز بر واحد طول که در رابطه (۳) آمده است، با اختلاف ثابت انتشار موج دایروی راستگرد و چپگرد مرتبط است.

$$\frac{\Delta\phi}{l_w} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \left( \sqrt{\mu_r + 0.82\kappa} - \sqrt{\mu_r - 0.82\kappa} \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳) برای به دست آوردن طول میله درگیر بایاس ( $l_w$ )، مقادیر  $\mu_r$  و  $\kappa$  که در روابط (۱) تعریف شده اند در حالت آرمانی باید در  $M=M_r$  محاسبه شوند، اما در عمل به دلیل فاصله هوایی اجتناب ناپذیر بین یوغ و میله، در حالت قطع شدن پالس تحریک (قفل شوندگی)  $M$  به مقدار  $M_r$  نمی رسد و در عمل در حدود ۸۰ درصد  $M_r$  قفل می شود. در مرحله طراحی برای اطمینان از تغییر فاز در کل بازه فرکانسی،  $M=1350G$  و مقدار بیشینه تغییر فاز دیفرانسیلی برابر با ۵۰۰ درجه در فرکانس

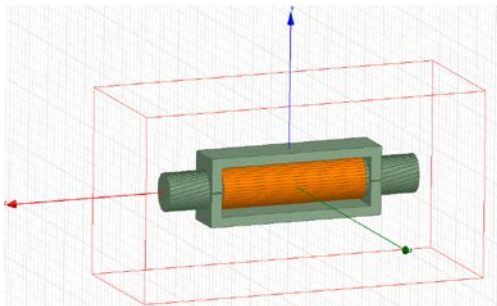
<sup>1</sup> Latching

$$r = \left[ \frac{M_s \left( \frac{M_s}{M} - \frac{1}{2} \right)}{M} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$M$  مغناطیس‌شدگی فریت در نقطه کار قطبی‌کننده است که متناسب با میزان  $B_r$  آهنرباها می‌باشد. در طراحی این مقدار نسبت به  $M_s$  برابر با  $0/6$  فرض شده و طول قطبی‌کننده ( $l_{pol}$ )  $6 \text{ mm}$  به دست می‌آید.

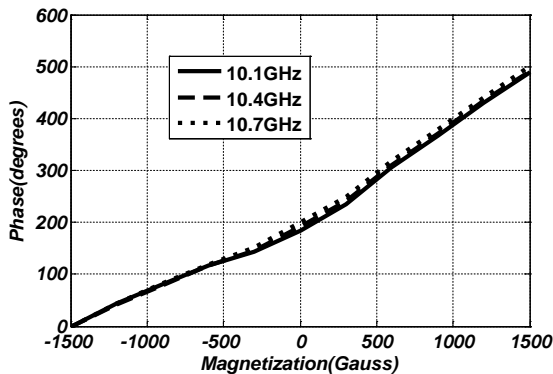
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

برای تحلیل تغییردهنده فاز فریتی در حالت  $RF$  در محیط نرم‌افزار CST به مقدار مغناطیس‌شدگی  $M$  (مربوط به بایاس  $DC$ ) نیاز است. ابتدا طراحی انجام شده در حالت ایستا در نرم‌افزار Maxwell تحلیل شده و میانگین مغناطیس‌شدگی  $M$  متناسب با طول پالس جریان الکتریکی بایاس، محاسبه می‌شود. با اعمال  $M$  به تانسور نفوذپذیری فریت میله‌های (رابطه (۱)) در نرم‌افزار CST و تحریک  $RF$  تغییردهنده فاز (شکل (۴)) مقادیر تغییر فاز و تلف تغییردهنده فاز بر حسب  $M$  محاسبه می‌شود.



شکل (۴): شماتیک تغییردهنده فاز شبیه‌سازی شده (CST)

شکل (۵) نتایج تغییر فاز شبیه‌سازی شده را بر حسب حالت‌های مختلف مغناطیس‌شدگی (حالت‌های تغییر فاز) در ابتدا، مرکز و انتهای باند فرکانسی نشان می‌دهد. در باند فرکانسی مورد نظر  $500$  درجه تغییر فاز حاصل می‌شود.



شکل (۵): تغییر فاز شبیه‌سازی شده بر حسب مغناطیس‌شدگی در ابتدا، مرکز و انتهای باند فرکانسی

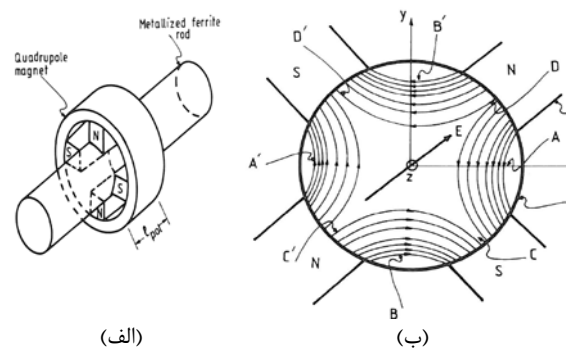
تلف تغییردهنده فاز شبیه‌سازی شده در شکل (۶) نشان داده شده است که بیشینه آن کمتر از  $0/75 \text{ dB}$  می‌باشد.

$$NI = 24 \times 104 \times 34 \times 10^{-3} = 84.9 \quad (7)$$

با در نظر گرفتن  $N$  برابر با  $25$  دور، بیشینه جریان  $3/4$  آمپر به دست می‌آید که به صورت دوتایی (سیم‌پیچ نشان‌دهنده<sup>۱</sup> و باز نشان‌دهنده<sup>۲</sup>) روی میله فریت پیچانده می‌شود.

### ۲-۴- طراحی قطبی‌کننده

تغییردهنده فاز دومده دارای قطبش دایروی است و تغییر فاز را در این قطبش اعمال می‌کند. برای استفاده از آن در سامانه‌های با قطبش خطی لازم است ابتدا و انتهای آن قطبی‌کننده اضافه شود. مطابق با شکل (۲-الف) این قطعه شامل چهار آهنربا می‌باشد. طریقه عملکرد آن به این صورت است که، موج ورودی با قطبش خطی در دو راستای عمود بر هم (راستاهای  $AA'$  و  $BB'$  در شکل (۳-ب))، که هر یک با موج ورودی زاویه  $45$  درجه می‌سازند، تجزیه شده و سرعت انتشار موج در این دو راستا به دلیل رفتار غیرهم‌پاسخ فریت متفاوت بوده و یکی تندتر و دیگری کندتر منتشر می‌شود.



(الف)

(ب)

شکل (۳): (الف) ساختار قطبی‌کننده با چهار آهنربا

(ب) سطح مقطع قطبی‌کننده و میدان‌های چهار قطبه [۲].

اگر اختلاف فاز این دو موج در انتهای قطبی‌کننده  $90$  درجه باشد، موجی با قطبش دایروی آرمانی حاصل می‌شود اما در عمل به دلیل رفتار غیرآرمانی قطعات، حصول آن غیر ممکن است و در انتهای قطبی‌کننده موج با هر دو قطبش دایروی راستگرد و چپگرد (یکی مطلوب و دیگری نامطلوب) وجود دارد. در طراحی و تحلیل قطبی‌کننده نسبت این دو قطبش به عنوان خلوص قطبش در نظر گرفته می‌شود. طول قطبی‌کننده با حصول تغییر فاز  $90$  درجه در انتهای آن از رابطه تجربی (۸) به دست می‌آید [۲].

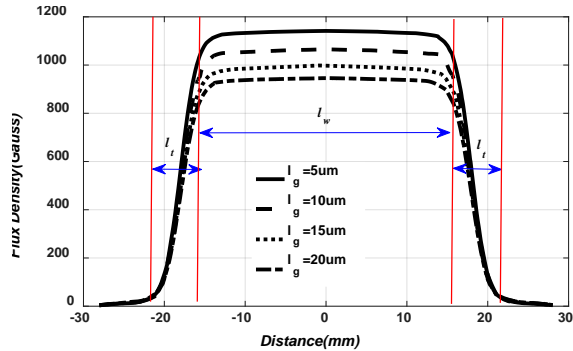
$$l_{pol} \approx 0.346 \frac{M_s}{M} \frac{2a [1 - m^2 r (1+r)]}{m} \quad (8)$$

بیشتر پارامترهای رابطه (۸) در بخش‌های قبل معرفی شده و نسبت  $r$  از رابطه (۹) به دست می‌آید.

<sup>1</sup> SET  
<sup>2</sup> RESET

#### ۲-۴- تحلیل فاصله هوایی بین یوغ و میله فریتی

به دلیل ناصافی سطح میله و یوغ فریتی وجود فاصله هوایی بین آنها اجتناب ناپذیر است. با طول میله  $(l_w)$  برابر با ۳۴ mm تغییر فاز ۳۶۰ درجه در  $M=990G$  حاصل می شود.

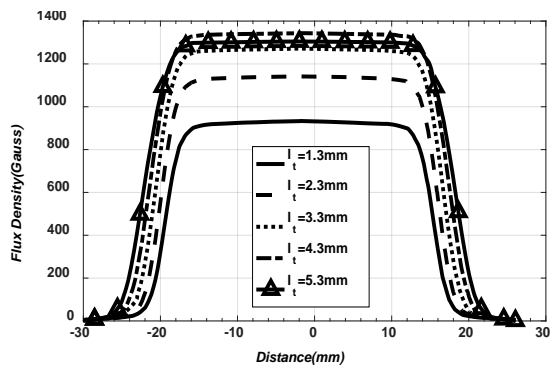


شکل (۸): چگالی شار مغناطیسی با تغییر فاصله یوغ از میله.

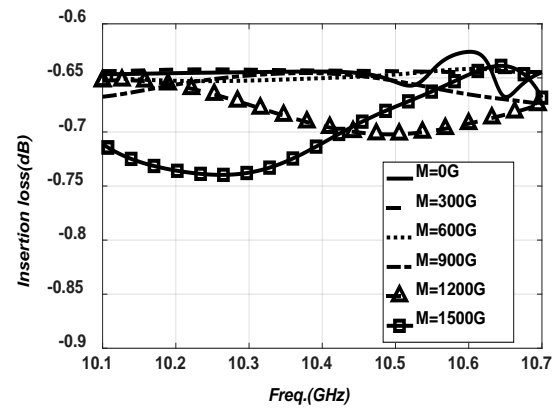
افزایش فاصله هوایی بین یوغ و میله فریتی به دلیل ضریب نفوذپذیری بسیار کمتر هوا نسبت به فریت، باعث افزایش رلوکتانس<sup>۱</sup> مدار مغناطیسی شده و باعث کاهش شار مغناطیسی می شود. با تغییر این فاصله هوایی  $(l_g)$  در نرم افزار Maxwell حد مجاز تغییرات آن برای حصول ۳۶۰ درجه تغییر فاز به دست می آید که در شکل (۸) نتایج آن نشان داده شده است. مطابق این شکل  $l_g$  نباید از  $15 \mu m$  بیشتر شود تا  $M$  از  $990G$  کمتر نشود و میزان تغییر فاز هدف حاصل شود.

#### ۳-۴- تحلیل طول تماسی یوغ و میله فریتی

در حالت آرمانی و بر اساس روابط تحلیلی و تجربی طول تماسی یوغ و میله فریتی  $(l_t)$  معادل طولی است که ناحیه گذر از صفر تا بیشینه مغناطیس شدگی در آن رخ دهد. این طول مطابق با شکل (۸) بیش از ۵ mm می باشد. با تغییر طول تماسی  $(l_t)$  در  $l_g = 15 \mu m$  میزان مغناطیس شونددگی محاسبه شده و در شکل (۹) نشان داده شده است. این تحلیل نشان می دهد که با مقادیر کمتر  $l_t$ ،  $M = 990 G$  حاصل می شود. حتی در مقادیر  $l_t = 2/3 mm$  از حد مرزی  $990 G$  بیشتر است.



شکل (۹): چگالی شار مغناطیسی با تغییر طول تماسی  $(l_t)$ .



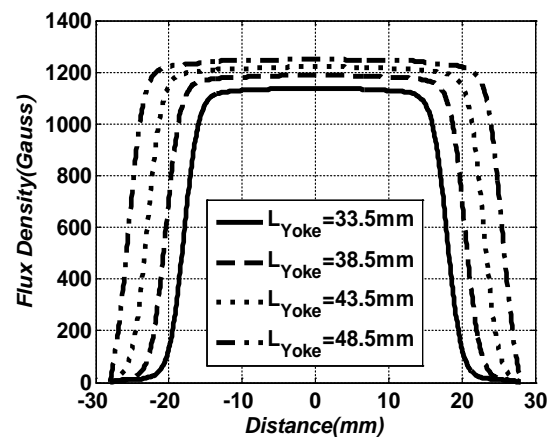
شکل (۶): تلف تغییردهنده فاز شبیه سازی شده بر حسب فرکانس برای حالات مغناطیس شدگی مختلف

#### ۴- تحلیل پارامتری تغییردهنده فاز طراحی شده

فریت ماده ای بسیار شکننده و دارای ناصافی سطح قابل توجه است. به همین دلیل دستیابی به پارامترهای طراحی شده در عمل مشکل است. با توجه به محدودیت های فریت و مشکلات فرآیند ساخت، لازم است میزان تغییرات مجاز پارامترهای تغییردهنده فاز مطالعه شود و در فرآیند ساخت و تولید لحاظ گردد.

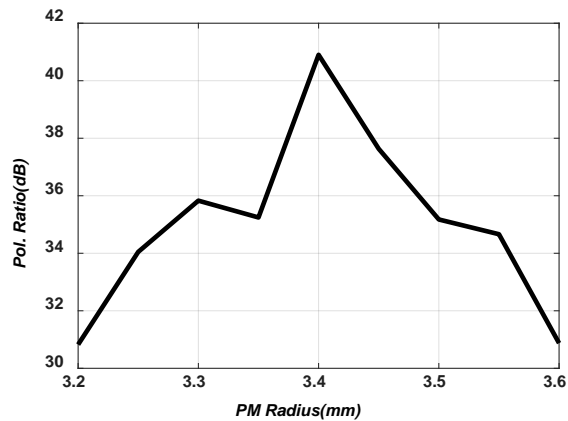
#### ۱-۴- مطالعه تغییر طول داخلی یوغ

طول داخلی یوغ برابر با طول ناحیه درگیر بایاس میله فریتی (۳۴ mm) در نظر گرفته می شود. برای اطمینان از آن در مقادیر مختلف طول داخلی یوغ، میزان مغناطیس شونددگی در شبیه سازی استاتیک به دست آمده و در شکل (۷) نشان داده شده است. در تمام حالات میزان مغناطیس شونددگی از حد مرزی ۹۹۰ گوس بالاتر است و نشان دهنده آن است که مقدار انتخاب شده برای طول داخلی یوغ (۳۴ mm) مناسب است.



شکل (۷): چگالی شار مغناطیسی با تغییر طول یوغ.

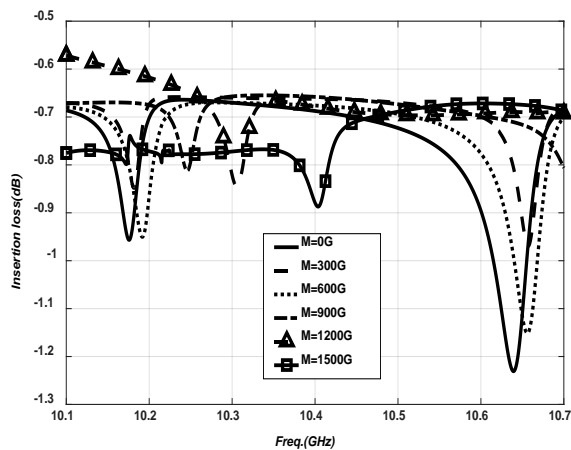
<sup>1</sup> Reluctance



شکل (۱۲): تغییرات خلوص قطبش بر اساس شعاع انحنای آهنرباهای قطبی کننده.

#### ۴-۵- تحلیل اثر پوشش معیوب فلزی میله فریتی

در فرآیند تولید انبوه تغییردهنده‌های فاز فریتی و یا مرحله تهیه و خرید میله‌های فریتی باید دقت شود که پوشش فلزی فریت سالم و کامل باشد، در غیر این صورت ممکن است یک خراش کوچک روی پوشش فریت باعث تلفات قابل ملاحظه در موج RF گردد. با ایجاد یک خراش عرضی به ابعاد  $4/31$  mm و  $0/4$  mm و یک خراش طولی به ابعاد  $6$  mm و  $0/4$  mm روی میله فریتی در شبیه‌سازی انجام شده، اثر خراب شدن پوشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن نشان می‌دهد که در مقایسه با میله فریتی سالم (شکل ۶)، خراش عرضی بیشینه تلف عبوری در تغییردهنده فاز را  $0/45$  dB (شکل ۱۳) و خراش طولی این کمیت را  $3/25$  dB (شکل ۱۴) افزایش می‌دهد. این میزان تلف علی‌الخصوص در حالت خراش طولی باعث عدم تأیید تغییردهنده فاز می‌شود. لازم به ذکر است که این خراش‌ها تأثیر چندانی روی میزان فاز ندارند.

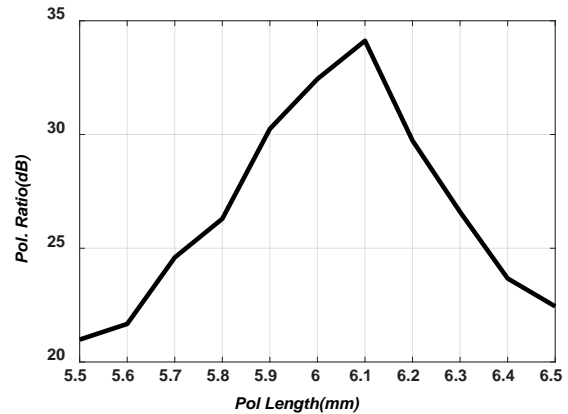


شکل (۱۳): تلف عبوری تغییردهنده فاز با شکاف عرضی.

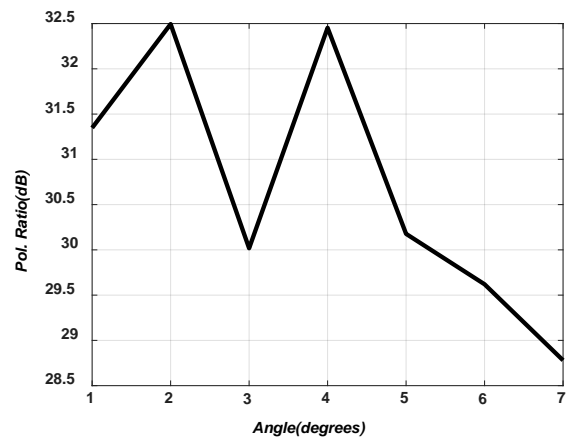
#### ۴-۴- تحلیل پارامتری قطبی کننده

در این بخش اثر تغییرات پارامترهای قطبی کننده روی خلوص قطبش آن مطالعه می‌شود. در طراحی انجام شده، طول قطبی کننده  $6$  mm به دست آمد. در شکل (۱۰) با تغییر طول قطبی کننده، بیشینه خلوص قطبش در طول  $6/1$  mm به دست آمده است.

در شکل (۱۱) با چرخش زاویه‌ای یکی از آهنرباها میزان تغییرات خلوص قطبش مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد چرخش محدود (کمتر از  $5$  درجه) یکی از آهنرباها تغییرات قابل ملاحظه‌ای روی خلوص قطبش ندارد.



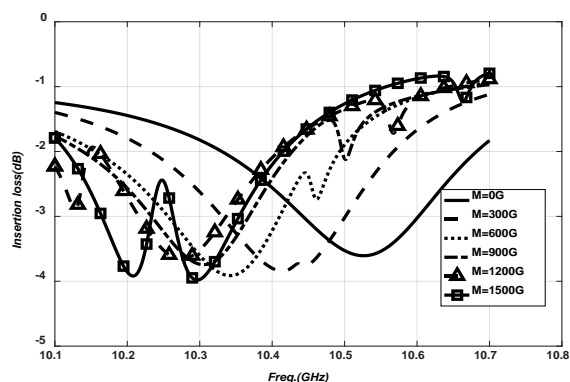
شکل (۱۰): تغییرات خلوص قطبش بر حسب طول قطبی کننده.



شکل (۱۱): تغییرات خلوص قطبش بر اساس چرخش یکی از آهنرباهای قطبی کننده.

شعاع انحنای آهنربا باید از شعاع انحنای میله فریتی ( $3/2$  mm) بزرگ‌تر باشد. در شکل (۱۲) اثر این پارامتر روی خلوص قطبش مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه خلوص قطبش در شعاع انحنای  $3/4$  mm حاصل می‌شود.

- [3] R. E. Collin, "Foundation for microwave engineering," John Wiley & Sons Inc, New York, Second Edition, 2001.
- [4] D. Pozar, "Microwave engineering," John Wiley & Sons Inc, New York, Fourth Edition, 2012.
- [5] S. K. Koul and S. Dey, "Radio frequency micromachined switches switching networks and phase shifters," Taylor & Francis Group, New York, 2019.
- [6] G. J. Deng, W. H. Huang, J. W. Li, T. Ba, L. T. Guo, and Y. Jiang, "A novel high power X-band ferrite phase shifter," Rev. Sci. Instrum., vol. 88, 2017.
- [7] M. Shafae, S. M. J. Razavi, and E. Hamidi, "A new toroidal metamaterial phase shifter," Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 61, pp. 1692-1696, 2019.
- [8] M. Shafae, S. M. J. Razavi, and E. Hamidi, "Metamaterial Based, Single Toroidal Phase Shifter Design Algorithm," Jou. of App. Electromag., vol. 8, Issue 1, pp. 53-60, 2019. (In Persian)
- [9] M. Shafae, S. M. J. Razavi, and E. Hamidi, "A New Circular Polarization Metamaterial Ferrite Phase Shifter," Jou. of Com. Eng. (JCE), vol. 8, Issue 1, pp. 104-115, 2019.
- [10] M. Shafae, S. M. J. Razavi, and E. Hamidi, "Tunable, Metamaterial Based Ferrite Phase Shifter Design," Tabriz Jou. of Elec. Eng. (TJEE), vol. 49, Issue 3, pp. 1131-1140, 2019 (in persian)
- [11] C. R. Boyd, "A Dual-Mode latching reciprocal ferrite phase shifter," IEEE Trans. on Micro. The. and Tech., pp. 1119-1124, 1970
- [12] W. E. Hord, C. R. Boyd, and D. Diaz, "A new type of fast switching dual mode ferrite phase shifter," IEEE Trans. on Micro. The. and Tech., vol. 35, Issue: 12, pp. 1219 – 1225 1987.
- [13] C. R. Boyd, "Duplexing ferrite reciprocal phase shifters," IEEE MTT-S Int'l Microwave Symposium Digest, Session TU4D-5, 2005.
- [14] FERRITE DOMEN Co, Garnets, Ferrite spinel and Hexaferrites, [www.ferrite-domen.com](http://www.ferrite-domen.com)
- [15] TEMEX Co, Microwave Ferrite Materials, [www.TEMEX.com](http://www.TEMEX.com)



شکل (۱۴): تلف عبوری تغییردهنده فاز با شکاف طولی.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرآیند طراحی تغییردهنده فاز دومده خطی با پهنای باند فرکانسی ۱۰/۷ GHz-۱۰/۱ GHz، متوسط تلف کمتر از ۱ dB و تغییر فاز ۳۶۰ درجه ارائه شد. همچنین با تحلیل پارامتری مشخص شد که برای پارامترهای هدف طراحی، فاصله هوایی یوغ و میله باید کمتر از ۱۵  $\mu\text{m}$  باشد و ناحیه تماسی آن‌ها ۲/۳ mm کافی است. برای داشتن یک قطبی کننده با خلوص قطبش بالا باید طول آن ۶/۱ mm و شعاع انحنای آن برابر با ۳/۴ mm باشد. یک خراش طولی روی پوشش میله فریتی می‌تواند تلفات عبوری را تا ۴ dB افزایش دهد.

## ۶- مراجع

- [1] D. Parker and D. C. Zimmermann, "Phased-part II: implementations, applications, and future trends," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 3, pp. 688-698, 2002.
- [2] S. K. Koul and Bharathi, "Microwave and millimeter wave phase shifters: dielectric and ferrite phase shifters," vol. I, Artech House; Boston, MA, 1991.