

## طراحی یک فیلتر ماکروویو رزونانسی با کوپل مستقیم و استفاده از پیچ تنظیم برای بهبود عملکرد آن

یاسر محمد طاهری

دانشجوی کارشناسی برق - مخابرات گروه برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

E-mail: [y.mohammadtaheri@ece.ut.ac.ir](mailto:y.mohammadtaheri@ece.ut.ac.ir)

چکیده - در این مقاله ابتدا در مورد فیلترهای ماکروویو به صورت کوتاه و مختصر توضیح داده می شود و سپس روش طراحی یک نوع فیلتر ماکروویو موسوم به فیلتر رزونانسی با کوپل مستقیم که در آن از چندین رزوناتور استفاده شده است بیان می گردد. بعد از آن با استفاده از یک پیچ به تنظیم خصوصیات فیلتر و همچنین تغییر در فرکانس مرکزی فیلتر طراحی شده می پردازیم. در پایان نتایج حاصل از فیلتر طراحی شده با استفاده از نرم افزار HFSS به نمایش گذاشته شده و مزیت استفاده از پیچ تنظیم به منظور بهبود کیفیت فیلتر مورد نظر، نشان داده می شود.

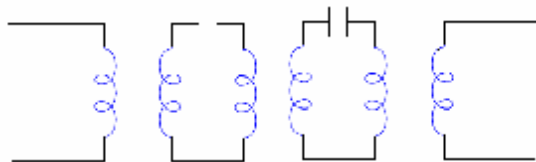
کلید واژه - پلاریزاسیون مغناطیسی، رزوناتور

### 1- مقدمه

فیلتر ماکروویو یک شبکه دو ورودی می باشد که برای کنترل پاسخ فرکانسی در نقطه معینی درون سیستم های ماکروویو مورد استفاده قرار می گیرد. فیلترهای ماکروویو کاربرد های زیادی در مخابرات ماکروویو برای نمونه در رادار ها و سیستم های اندازه گیری دارند. در سیستم های ماکروویو اغلب نیاز داریم تا سیگنال های ناخواسته یا سیگنال های جدا افتاده که دارای فرکانس های متفاوت می باشند را به نحوی حذف کنیم که استفاده از یک فیلتر با باند نازک برای این کار مناسب می باشد. در این مقاله طراحی یک فیلتر میان گذر با باند گذر نازک را مد نظر قرار می دهیم. فیلتری که ما مورد بحث قرار می دهیم یک فیلتر رزونانسی با کوپل مستقیم می باشد. این نوع فیلتر یکی از ساده ترین و رایج ترین فیلترهای ماکروویو شمرده می شود

### 2- فیلترهای رزونانسی با کوپل مستقیم

یک نوع فیلتر میان گذر که بسیار مورد استفاده قرار می گیرد فیلتر رزونانسی با کوپل مستقیم می باشد. در این نوع فیلتر شکاف هایی که در طول موجبر فیلتر قرار گرفته اند رزوناتورهایی با طول تقریبی  $l_g/2$  را شکل می دهند. معادل مداری این نوع فیلتر در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 1-1- مدل مداری یک فیلتر رزونانسی با کوپل مستقیم

در شکل بالا سلف های تزویج نشان دهنده کوپلینگ بین رزوناتورهای به کار رفته درون این فیلتر می باشد

حال مقدار کوپلینگ بین رزوناتورها را توسط روابط زیر بدست می آوریم:

$$k_{12} = \frac{V}{\sqrt{g_1 g_2}} = \frac{0.005}{\sqrt{1 \times 2}} = 3.535 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$k_{23} = \frac{V}{\sqrt{g_1 g_2}} = \frac{0.005}{\sqrt{1 \times 2}} = 3.535 \times 10^{-3}$$

می دانیم مقدار  $Q$  خارجی یک رزوناتور مستطیلی که به یک خط انتقال موجبری با ابعاد مشابه بوسیله شکاف یا خفزه کوپل شده است از رابطه زیر بدست می آید:

$$(Q_e)_A = (Q_e)_B = \frac{l^3 a^2 b^2 I_g}{4pM_1^2 I^2} \quad (4)$$

بنابراین با توجه به مقادیر  $(Q_e)_A$  و  $(Q_e)_B$  خارجی که قبلاً بر اساس پارامترهای فیلتر مورد نظر محاسبه کردیم و همچنین رابطه (4)، مقدار پلاریزاسیون مغناطیسی  $M$  برای شکاف های خارجی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$(M)_{ext} = \sqrt{\frac{(0.7825)^3 \times (0.9)^2 \times (0.4)^2 \times (1.5652)}{4p \times (3/2.54)^2 \times 200}} = 5.265 \times 10^{-3}$$

از طرفی برای محاسبه مقدار ضریب پلاریزاسیون مغناطیسی  $M$  برای دریچه های داخلی از رابطه بین  $k_{12}$  و  $k_{23}$  با  $M$  استفاده می کنیم.

$$k_{12} = k_{23} = \frac{M_1 I^2}{l^3 ab} \quad (5)$$

بدین ترتیب مقدار  $M$  برای شکاف های داخلی با توجه به مقادیر  $k_{12}$  و  $k_{23}$  که قبلاً بدست آمده است به صورت زیر بدست می آید:

$$(M)_{int} = \frac{(0.7825)^2 \times (0.9) \times (0.4) \times (3.535 \times 10^{-3})}{(3/2.54)^2} = 4.37 \times 10^{-4}$$

برای طراحی فیلتر مورد نظر نسبت بین عرض و طول شکاف های مستطیلی را 0.5 انتخاب می کنیم.

$$\frac{w}{l} = 0.5$$

رابطه بین پلاریزاسیون مغناطیسی  $M$  و طول و عرض

## 1-2- طراحی یک فیلتر رزوناتوری کوپل مستقیم:

در اینجا می خواهیم یک فیلتر رزوناتوری کوپل مستقیم را طراحی کنیم. طراحی را برای یک فیلتر باترورس درجه 3 ( $n=3$ ) انجام می دهیم. این فیلتر از سه عدد رزوناتور تشکیل شده است و همچنین دارای چهار عدد شکاف می باشد که دو تا از آنها برای عمل کوپلینگ بین رزوناتور های کنار هم و دو تای آنها برای کوپلینگ بین رزوناتور ها و خط انتقال موجبری به کار می روند برای طراحی این فیلتر باید ابتدا پارامتر های لازم برای طراحی این نوع فیلتر را داشته باشیم. پارامترهای یک فیلتر باترورس درجه 3 به شرح زیر است:

$$g_1 = 1 \quad g_2 = 2 \quad g_3 = 2 \quad g_4 = 1$$

برای این فیلتر میان گذر فرکانس مرکزی را 10Ghz و درصد پهنای باند را 0.005 در نظر می گیریم. در ضمن برای تطبیق با خطوط انتقال موجبری با استاندارد WR-90، ابعاد فیلتر را  $a=0.9inch$  و  $b=0.4inch$  انتخاب می کنیم ( $a$  طول و  $b$  عرض می باشد)

همانطور که گفته شد طول هر کدام از رزوناتورها در این نوع فیلتر، برابر با  $l_g/2$  می باشد بدین ترتیب طول هر کدام از رزوناتور ها به صورت زیر بدست می آید:

$$l_1 = \frac{l_{g1}}{2} \quad (1)$$

$$l = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03m = \frac{3}{2.54} inch$$

$$l_g = \frac{l}{\sqrt{1 - \left(\frac{l}{2a}\right)^2}} = \frac{(3/2.54)}{\sqrt{1 - \left(\frac{3/2.54}{2 \times 0.9}\right)^2}} = 1.5651 inch$$

$$l_1 = \frac{l_g}{2} = \frac{1.5651}{2} = 0.7825$$

مقدار  $Q$  خارجی برای رزوناتور های مستطیلی ابتدواتهای فیلتر، ناشی از کوپلینگ بین آنها و خط انتقال موجبری به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$(Q_e)_A = (Q_e)_B = g_0 g_1 \frac{1}{V} = 1 \times 1 \times \frac{1}{0.005} = 200 \quad (2)$$

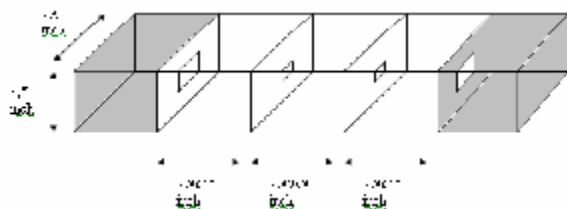
$$\begin{aligned} \frac{X_{0,1}}{Z_0} &= \frac{4p \times (5.265 \times 10^{-3})}{(0.4) \times (0.9) \times (1.5651)} = 0.1174 \\ \frac{X_{1,2}}{Z_0} &= \frac{4p \times (4.37 \times 10^{-4})}{(0.4) \times (0.9) \times (1.5651)} = 0.00974 \\ \frac{X_{2,3}}{Z_0} &= \frac{4p \times (4.37 \times 10^{-4})}{(0.4) \times (0.9) \times (1.5651)} = 0.00974 \\ \frac{X_{3,4}}{Z_0} &= \frac{4p \times (5.265 \times 10^{-3})}{(0.4) \times (0.9) \times (1.5651)} = 0.1174 \end{aligned}$$

که  $X_{01}$  و  $X_{34}$  راکتانس شکاف های خارجی بین رزوناتور و خط انتقال می باشند. و  $X_{12}$  و  $X_{23}$  راکتانس شکاف های داخلی بین رزوناتورها می باشد

بنابراین مقادیر اصلاح شده طول رزوناتور ها به ترتیب به صورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned} q_1 &= p - \frac{1}{2} [\tan^{-1}(2 \times 0.1174) + \tan^{-1}(2 \times 0.00974)] = 3.0165 \\ \frac{2pd}{l_g} &= 3.0165 \Rightarrow d_1 = \frac{1.5651}{2p} \times 3.0165 = 0.7514 \text{ inch} \\ q_2 &= p - \frac{1}{2} [\tan^{-1}(2 \times 0.00974) + \tan^{-1}(2 \times 0.00974)] = 3.1221 \\ \frac{2pd}{l_g} &= 3.1221 \Rightarrow d_2 = \frac{1.5651}{2p} \times 3.1221 = 0.7777 \text{ inch} \\ q_3 &= p - \frac{1}{2} [\tan^{-1}(2 \times 0.1174) + \tan^{-1}(2 \times 0.00974)] = 3.0165 \\ \frac{2pd}{l_g} &= 3.0165 \Rightarrow d_3 = \frac{1.5651}{2p} \times 3.0165 = 0.7514 \text{ inch} \end{aligned}$$

در نهایت فیلر طراحی شده به صورت زیر در می آید .



شکاف ها  $(l, w)$  به صورت زیر برقرار می باشد:

$$M = 0.2486 \left( \frac{w}{l} \right)^{0.6074} l^3 \quad (6)$$

بنابراین طول و عرض شکاف های خارجی (شکاف بین رزوناتور و خط انتقال موجبری) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} M_{ext} &= 5.265 \times 10^{-3} = 0.2476 \times (0.5)^{0.6074} l^3 \\ \Rightarrow l &= 3 \sqrt[3]{\frac{5.265 \times 10^{-4}}{0.5^{0.6074} \times 0.2476}} = 0.3187 \text{ inch} \\ \Rightarrow w &= \frac{0.3187}{2} = 0.15935 \text{ inch} \end{aligned}$$

همچنین طول و عرض شکاف های داخلی (شکاف بین رزوناتور ها) به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} M_{int} &= 4.37 \times 10^{-4} = 0.2476 \times (0.5)^{0.6074} l^3 \\ \Rightarrow l &= 3 \sqrt[3]{\frac{4.37 \times 10^{-4}}{0.5^{0.6074} \times 0.2476}} = 0.139 \text{ inch} \\ \Rightarrow w &= \frac{0.139}{2} = 0.0695 \text{ inch} \end{aligned}$$

وجود شکاف ها باعث می شود که فرکانس نوسان رزوناتور ها از آنچه قبل از اضافه کردن شکاف ها بود به مقدار کمی پایین آید. بنابراین برای مقابله برآن مقداری اصلاحات کوچک روی طول رزوناتور ها انجام می دهیم:

$$q_j = p - \frac{1}{2} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{2X_{j-1,j}}{Z_0} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{2X_{j,j+1}}{Z_0} \right) \right] \quad (7)$$

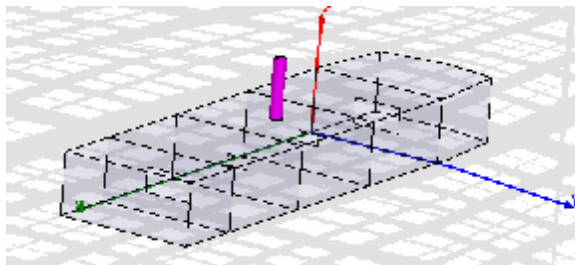
که در این رابطه  $q_j$  مقدار طول الکتریکی اصلاح شده رزوناتورها و  $X$  راکتانس ناشی از شکاف های موجود می باشد. ابتدا باید مقدار راکتانس نرمالیزه شده ناشی از شکاف ها را محاسبه کنیم:

$$\frac{X_{j,j+1}}{Z_0} = \frac{4p(M_1)_{j,j+1}}{abl_g}$$

بنابراین مقادیر نرمالیزه شده راکتانس ها به صورت زیر بدست می آیند:

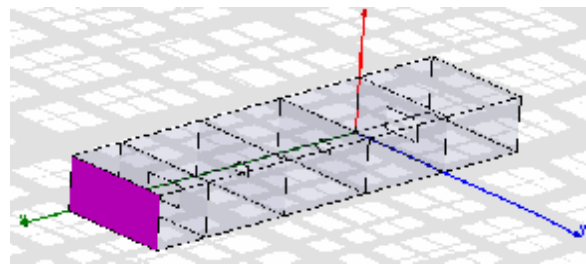
شکل 1-2- شماتیک فیلتر طراحی شده

میانی قرار می دهیم.



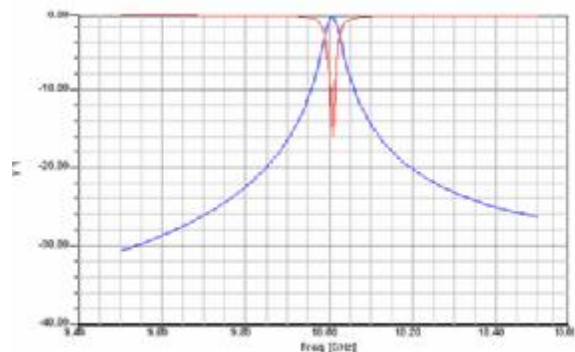
### 3- شبیه سازی فیلتر طراحی شده توسط نرم افزار HFSS:

در این مرحله به بررسی فیلتر طراحی شده توسط نرم افزار HFSS می پردازیم.



شکل 1-3- فیلتر طراحی شده در محیط HFSS

بعد از تعریف پورت های ورودی و خروجی، برنامه HFSS را اجرا کرده و نمودار  $S_{12}$  بر حسب فرکانس که همان مشخصه فیلتر می باشد به صورت زیر بدست می آید.



شکل 2-3- نمودار فیلتر طراحی شده

همانطور که مشاهده می شود مشخصه فیلتر طراحی شده مطابق با اطلاعاتی است که بر اساس آن طراحی انجام شده است. یعنی فیلتر باترورس با پهنای باند نازک و همچنین فرکانس مرکزی 10GHz.

### 4- استفاده از پیچ تنظیم برای تغییر فرکانس مرکزی و بهبود عملکرد فیلتر:

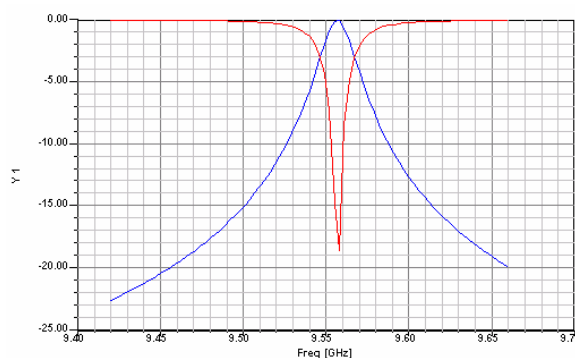
حال در این قسمت از یک میله کوچک به عنوان پیچ تنظیم استفاده می کنیم. این پیچ تنظیم را به صورت شکل زیر در وسط فیلتر و یا به عبارتی در وسط رزوناتور

شکل 1-4- اضافه کردن پیچ تنظیم به فیلتر طراحی شده

این پیچ در جایی قرار گرفته است که در آنجا شدت میدان الکتریکی ماکزیمم و بردار میدان در راستای پیچ قرار دارد. بنابراین با وارد کردن پیچ مثل این است که یک خازن  $C$  به مدار معادل فیلتر اضافه کرده ایم و مقدار خازن را افزایش داده ایم و بدین ترتیب فرکانس مرکزی فیلتر کم می شود

حال پیچ را کم کم وارد رزوناتور می کنیم و نتایج را مشاهده می کنیم:

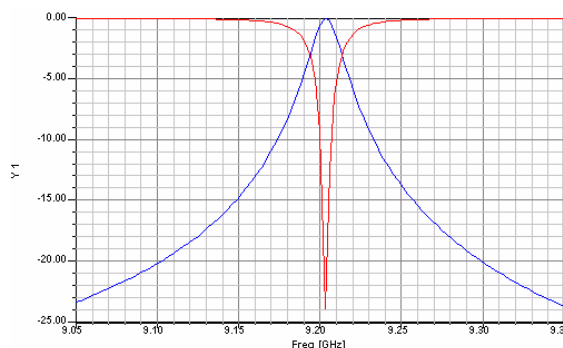
1- پیچ را به اندازه 0,15 اینچ وارد فیلتر می کنیم و مشاهده می کنیم فرکانس مرکزی فیلتر برابر با 9.56 گیگاهرتز می شود.



شکل 2-4- نمودار فیلتر بعد از وارد کردن پیچ به اندازه 0,15 اینچ

2- حال پیچ را به اندازه 0,2 اینچ وارد فیلتر می کنیم و مشاهده می کنیم فرکانس مرکزی فیلتر برابر با 9.2 گیگاهرتز می شود.

نازک به طور دقیق انجام و مورد بررسی قرار گرفت و به عنوان هدف اصلی نشان داده شد که به وسیله یک پیچ تنظیم کننده می توان علاوه بر کاهش یا به عبارتی تغییر فرکانس فیلتر مورد نظر ، تلف برگشتی را کاهش و به عبارتی عملکرد فیلتر را بهبود بخشید. بنابراین می توان نتیجه گرفت که برای ساخت یک فیلتر با یک فرکانس مرکزی متغیر در صورتی فرکانس مرکزی خاصی برایمان اهمیت بیشتری داشته باشد می توان آن را برای فرکانس مرکزی بیشتری طراحی کرد و سپس آن را داخل کردن پیچ تنظیم به فرکانس مورد نظر برسانیم که در این صورت در فرکانس مورد نظر به علت کاهش تلف برگشتی شاهد عملکرد بهتری از فیلتر می باشیم



شکل 3-4- نمودار فیلتر بعد از وارد کردن پیچ به اندازه 0,2 اینچ

با توجه به شکل های بالا مشاهده می شود که هر چه پیچ را بیشتر وارد کنیم فرکانس مرکزی فیلتر کمتر می شود. علاوه بر آن مشاهده می شود هر چه پیچ بیشتر وارد شود مقدار تلف برگشتی (Return Loss) که در شکل های بالا با منحنی قرمز مشخص شده است کمتر می شود که نشانه بهتر شدن عملکرد فیلتر می باشد. بنابراین اگر بخواهیم فیلتر ما در فرکانس 10GHz دارای عملکرد بهتر و تلف برگشتی کمتری باشد بهتر است طراحی را برای فرکانسی مثلا 11GHz طراحی کنیم و سپس به کمک پیچ تنظیم فرکانس مرکزی فیلتر را به 10GHz برسانیم. در این صورت عملکرد فیلتر در فرکانس 10GHz بهتر از فیلتری که قبلا برای فرکانس 10GHz طراحی کردیم می شود.

## مراجع

[1] David M.Pozar "Microwave Engineering"

[2] Peter A.Rizzi "Microwave engineering passive circuits"

[3] G.Mattaei, L.Young, E.M.T.Jones  
Microwave filters, impedance-matching network, and coupling structure"

[4] قطب علمی الکترومغناطیس "طراحی و ساخت فیلترهای تک مود و دو مود مایکروویو با مشدد عایقی" مجری: دکتر محمود محمد طاهری

جدول 1- فرکانس مرکزی و تلف برگشتی با تغییر میزان دخول پیچ

تلف برگشتی	فرکانس مرکزی	مقدار ورود پیچ
-16 dB	10GHz	0
-19 dB	9.56 GHz	0.15 inch
-24 dB	9.2 GHZ	0.2 inch

## 5- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا طراحی یک فیلتر باترورس درجه 3 باندا

