

به نام خدا

## گزارش پروژه طراحی، شبیه سازی و ساخت فیلتر

علی سعیدی ۴۰۰۴۱۲۳۱۹ - امین کارگر ۴۰۰۴۱۳۱۸۸

مشخصات فیلتر:

- میان گذر چبی شف
- رپیل 0.5dB
- پهنای باند : 300-350 MHz
- ريجكشن: 30dB در فاصله 100MHz از فرکانس بالا و پایین

باتوجه به این مشخصات محاسبات مربوط به فیلتر این گونه انجام خواهد گرفت:

$$0.5\text{dB Ripple: } \epsilon = \sqrt{10^{\frac{0.5}{10}} - 1} = 0.3493$$

$$B = 350 - 300 = 50\text{MHz}$$

$$\omega_0 = \sqrt{300 \times 350} = 324\text{MHz}$$

$$\omega = 350 + 100 = 450 \Rightarrow \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{B\omega} \Rightarrow \omega_1 = 4.3$$

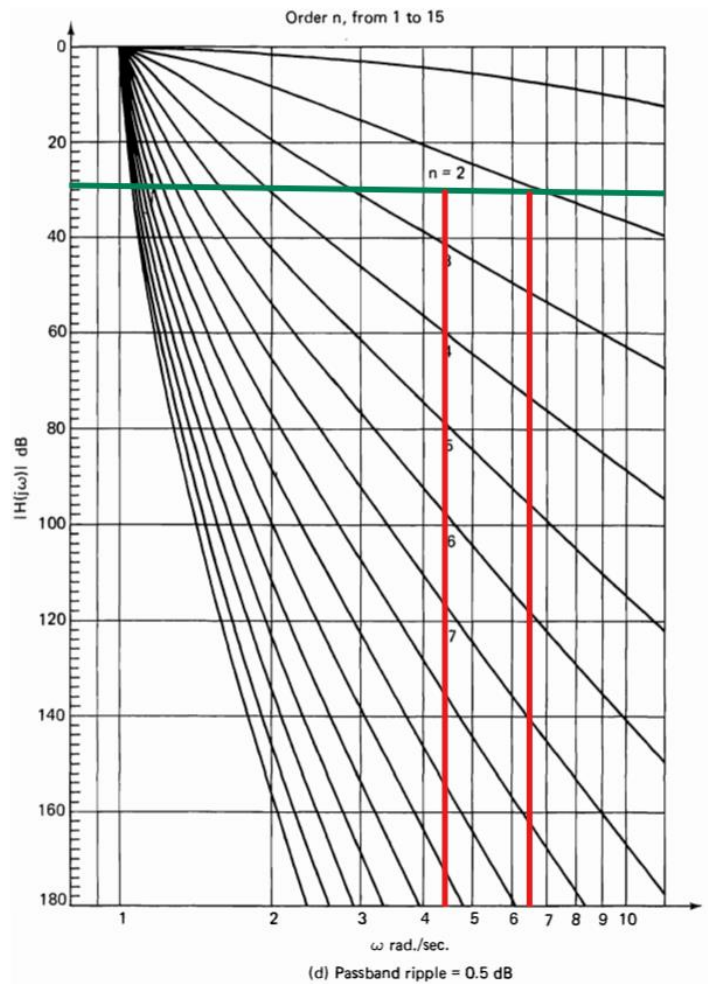
$$\omega = 300 - 100 = 200 \Rightarrow \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{B\omega} \Rightarrow \omega_2 = 6.5$$

در این دو فرکانس باید 30dB- ريجكشن داشته باشیم. می توان از فرمول بازگشتی چبی شف و یا نمودار اندازه چبی شف 0.5dB رپیل تشخیص داد که چه مرتبه فیلتری نیاز داریم. با استفاده از رابطه بازگشتی چنین خواهد بود:

$$\frac{1}{1 + \epsilon^2 \omega^2} = 16 \text{ dB}$$

$$\frac{1}{1 + \epsilon^2 (2\omega^2 + 1)^2} = 48 \text{ dB}$$

پس فیلتر **مرتبه سوم** خواهد بود. این موضوع را در نمودار اندازه هم می توان مشاهده کرد.



تصویر ۱- تشخیص مرتبه فیلتر

حالا که به مرتبه فیلتر دست یافتیم به محاسبه المان های آن می پردازیم.

$$\sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} = 1.77$$

$$\frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} = 0.59$$

$$-\sinh\left[\frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon}\right] = -0.626456$$

$$\cosh\left[\frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon}\right] = 1.180020$$

$$\sigma_1 = -0.313228$$

$$\sigma_2 = -0.313228$$

$$\sigma_3 = -0.626456$$

$$\omega_1 = +1.02192$$

$$\omega_2 = -1.02192$$

$$\omega_3 = 0$$

$$s_i = \sigma_i + j\omega_i$$

$$s_1 = \sigma_1 + j\omega_1 = -0.313228 + j1.02192$$

$$s_2 = \sigma_2 + j\omega_2 = -0.313228 - j1.02192$$

$$s_3 = \sigma_3 + j\omega_3 = -0.626456 + j0$$

حالا که مکان قطبها را بدست آوردیم به تحقق مداری آن می پردازیم.

$$a = \frac{4R_{Load}}{(1 + R_{Load})^2} \Rightarrow R_{Load} = 1 \Rightarrow a = 1$$

$$\alpha_i = 2 \sin \frac{\pi i}{2n}$$

$$\alpha_1 = 2 \sin \frac{\pi}{6} = 1$$

$$\alpha_2 = 2 \sin \frac{2\pi}{6} = 1.7320$$

$$\alpha_3 = 2 \sin \frac{3\pi}{6} = 2$$

$$\alpha_4 = 2 \sin \frac{4\pi}{6} = 1.7320$$

$$\alpha_5 = 2 \sin \frac{5\pi}{6} = 1$$

$$\beta_i = 2 \cos \frac{\pi i}{2n}$$

$$\beta_2 = 2 \cos \frac{2\pi}{6} = 1$$

$$\gamma = \left[ \frac{1}{\varepsilon} + \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + 1} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[ \frac{1}{0.34} + \sqrt{\frac{1}{0.34^2} + 1} \right]^{\frac{1}{3}} = 1.8064$$

$$\delta = \left[ \sqrt{\frac{1-a}{(0.34)^2}} + \sqrt{\frac{1-a}{0.34} + 1} \right]^{\frac{1}{2}} = 1$$

$$x = \gamma - \frac{1}{\gamma} = 1.2528$$

$$y = \delta - \frac{1}{\delta} = 0$$

$$b_2(x, y) = (1.2528)^2 + (1.7320)^2 = 4.5693$$

$$C_1 = \frac{2\alpha_1}{x-y} = \frac{2 \times 1}{1.2528 - 0} = 1.5964 \text{ F}$$

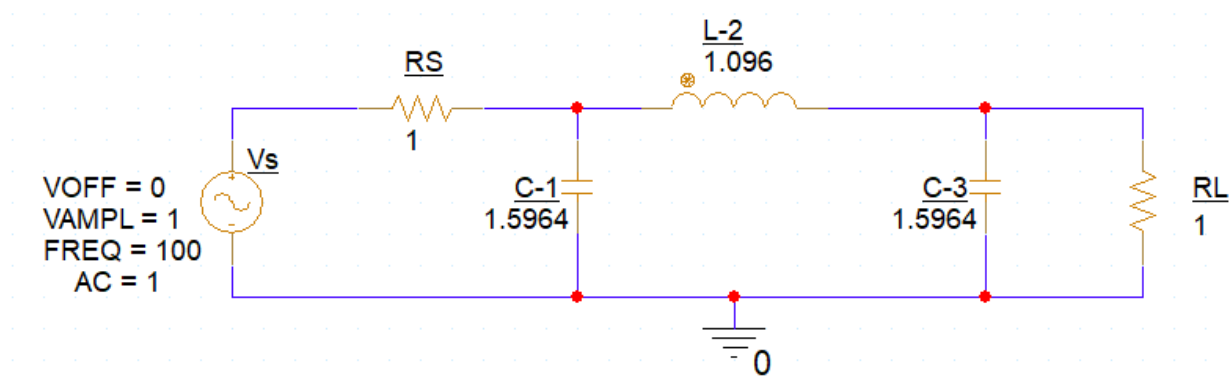
$$C_{2m-1}L_{2m} = \frac{4\alpha_{4m-3}\alpha_{4m-1}}{b_{2m}(x, y)} \Rightarrow C_1L_2 = \frac{4\alpha_1\alpha_3}{b_2(x, y)} = \frac{4 \times 1 \times 2}{4.5693} = 1.75$$

$$L_2 = 1.096 \text{ H}$$

$$C_{2m+1}L_{2m} = \frac{4\alpha_{4m-1}\alpha_{4m+1}}{b_{2m}(x, y)} \Rightarrow C_3L_2 = \frac{4\alpha_3\alpha_5}{b_2(x, y)} = \frac{4 \times 2 \times 1}{4.5693} = 1.75$$

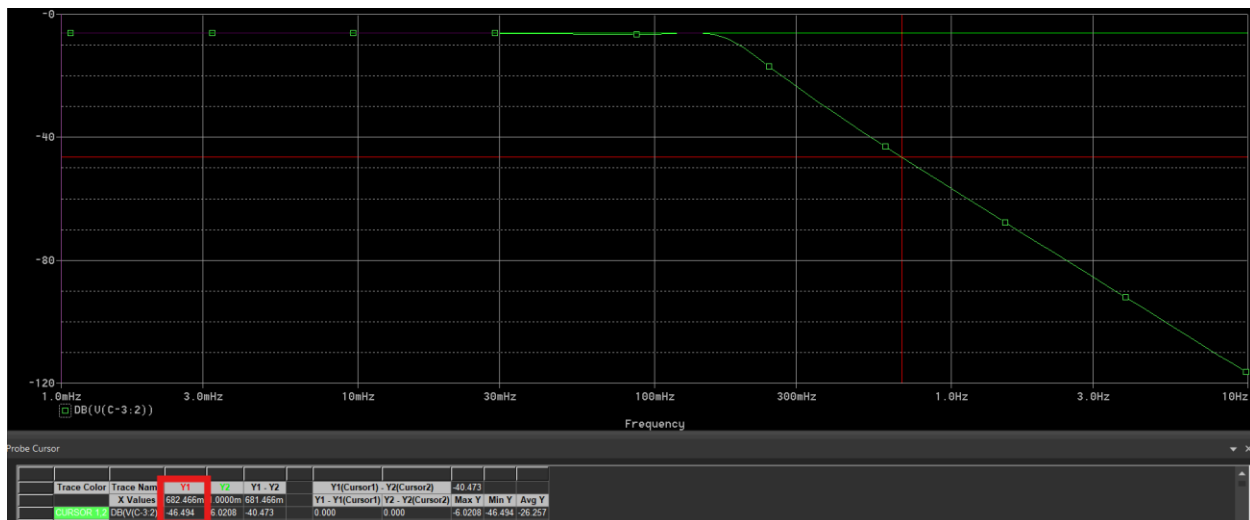
$$C_1 = 1.5964 \text{ F}$$

پس مدار پایه به شکل زیر در خواهد آمد.



تصویر ۳- مدار پایه فیلتر پایین گذر

با شبیه‌سازی مدار مشاهده می‌کنیم که ریبیل 0.5dB در باند عبور و تضعیف بیشتر از 30dB در  $\omega=4.3$  داریم.



تصویر ۳- شبیه‌سازی فیلتر پایین گذر

حالا باید مدار را از پایین گذر به میان گذر تبدیل کنیم.

$$C_1(LowPass) = 1.5964$$

$$\Rightarrow C_1(HighPass) = \frac{C}{B} = \frac{1.5964}{50 \times 2\pi \times 10^6} = 5.081 \text{ nF}$$

$$\Rightarrow L_1(HighPass) = \frac{B}{\omega_0^2 C} = \frac{50 \times 2\pi \times 10^6}{(324 \times 2\pi \times 10^6)^2 \times 1.5964} = 47.47 \text{ pH}$$

$$L_2(LowPass) = 1.096$$

$$\Rightarrow L_2(HighPass) = \frac{L}{B} = \frac{1.096}{50 \times 2\pi \times 10^6} = 3.49 \text{ nH}$$

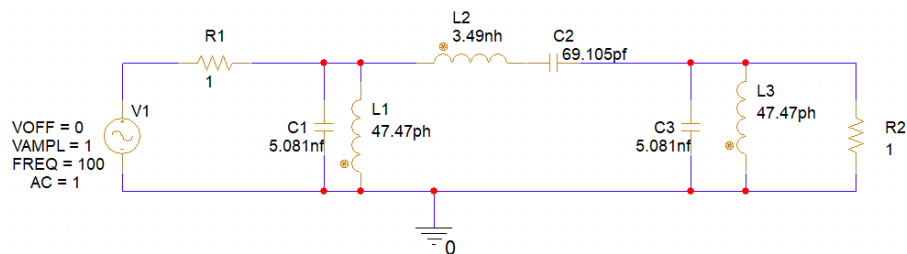
$$\Rightarrow C_2(HighPass) = \frac{B}{\omega_0^2 L} = \frac{50 \times 2\pi \times 10^6}{(324 \times 2\pi \times 10^6)^2 \times 1.096} = 69.105 \text{ pF}$$

$$C_3(LowPass) = 1.5964$$

$$\Rightarrow C_3(HighPass) = \frac{C}{B} = \frac{1.5964}{50 \times 2\pi \times 10^6} = 5.081 \text{ nF}$$

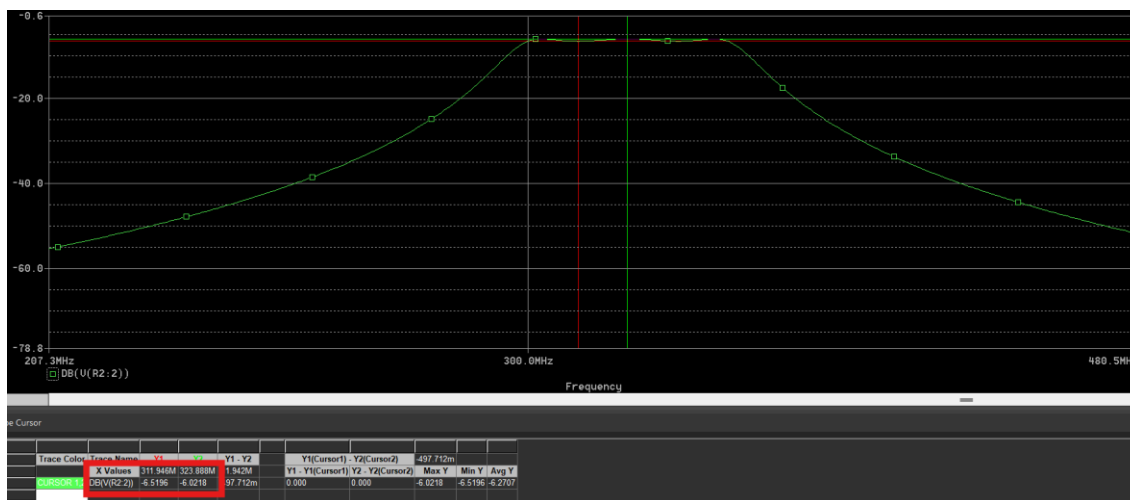
$$\Rightarrow L_3(HighPass) = \frac{B}{\omega_0^2 C} = \frac{50 \times 2\pi \times 10^6}{(324 \times 2\pi \times 10^6)^2 \times 1.5964} = 47.47 \text{ pH}$$

پس مدار میان گذر به شکل زیر خواهد بود.



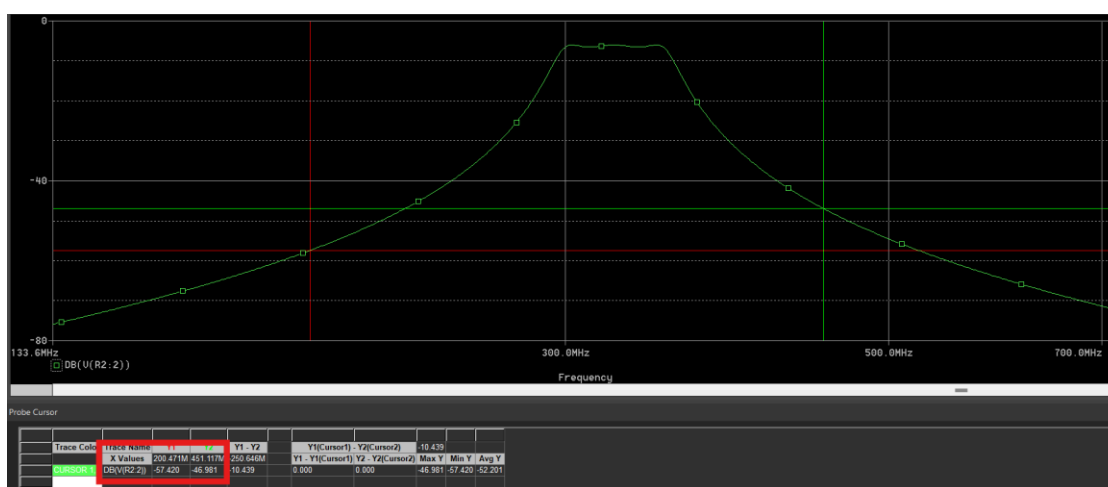
تصویر ۴- مدار تبدیل شده به میان گذر

نتایج شبیه سازی این مدار به شکل زیر می باشد:



تصویر ۵- شبیه سازی مدار میان گذر

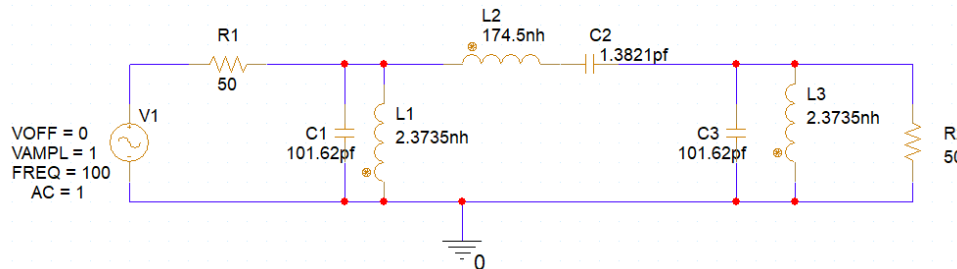
این تصویر نشان می دهد که ریبیل باند عبور 0.5dB است.



تصویر ۶- شبیه سازی مدار میان گذر

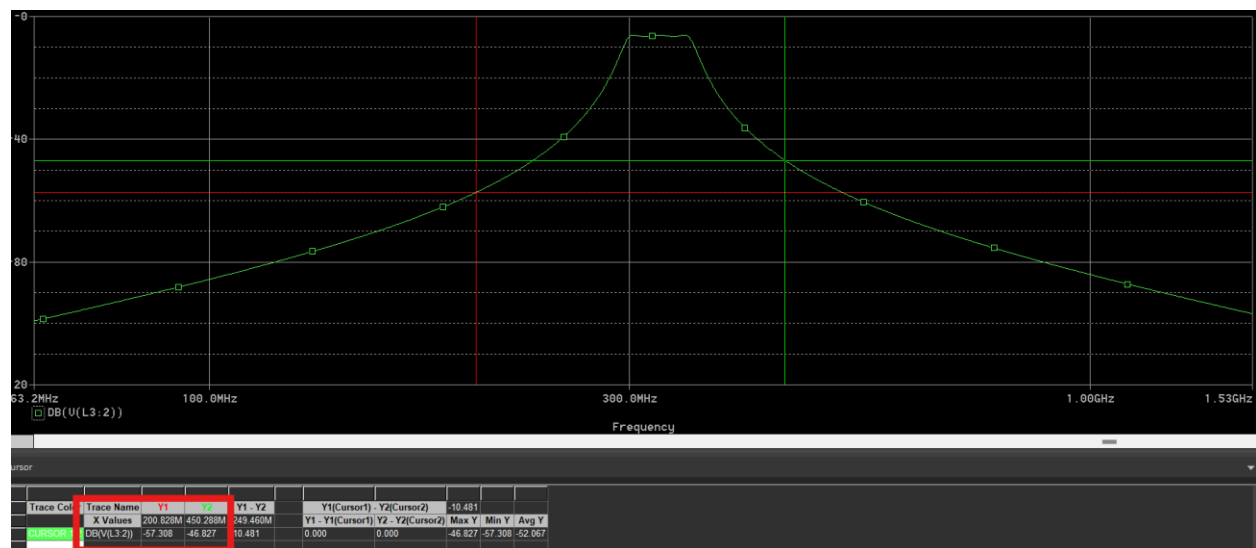
تصویر بالا نشان می دهد که در فاصله 100MHz از لبه باند بیش از 30dB تضعیف داریم.

حالا باید مقاومت ورودی و خروجی مدار را ۵۰ اهم بگذاریم. در نتیجه همه امپدانس ها در ۵۰ ضرب خواهند شد. پس همه مقاومت ها و سلف ها در ۵۰ ضرب و همه خازن ها به ۵۰ تقسیم خواهند شد. مدار تبدیل شده نهایی به این شکل خواهد بود.



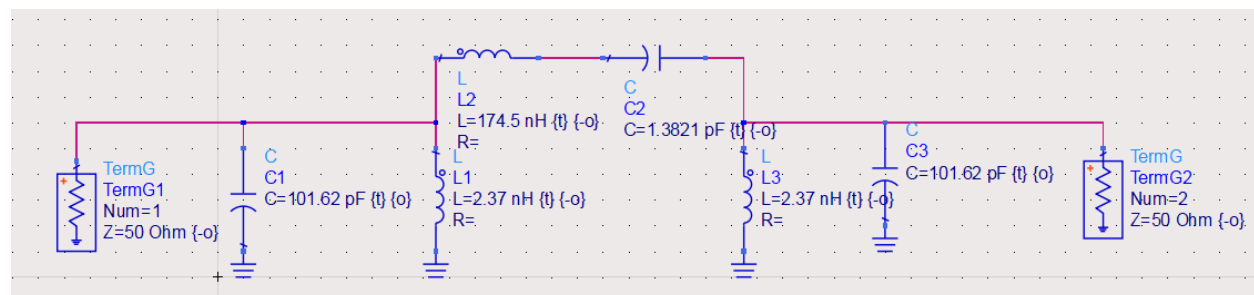
تصویر ۷- تبدیل امپدانس مدار میان گذر

شبیه سازی این مدار هم مانند قسمت قبل بدست می آید و تفاوتی ندارد.



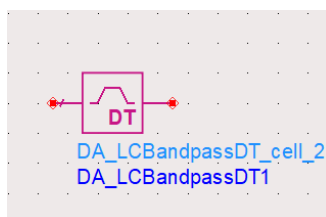
تصویر ۸- شبیه سازی مدار میان گذر با تبدیل امپدانس ها

حالا به سراغ شبیه سازی مدار در ADS می رویم. ابتدا شماتیک مدار در ADS کشیده شده است.



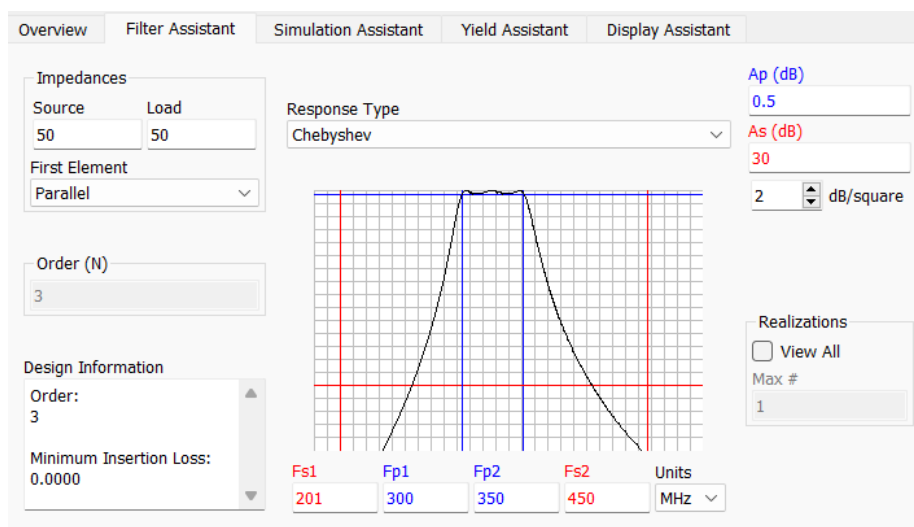
تصویر ۹- رسم مدار در ADS

راه دیگری که می‌توان مطمئن شد مقادیر درستی به دست آورده‌ایم این است که از فیلتر ADS استفاده کرده و یک فیلتر BandPass اضافه کنیم.



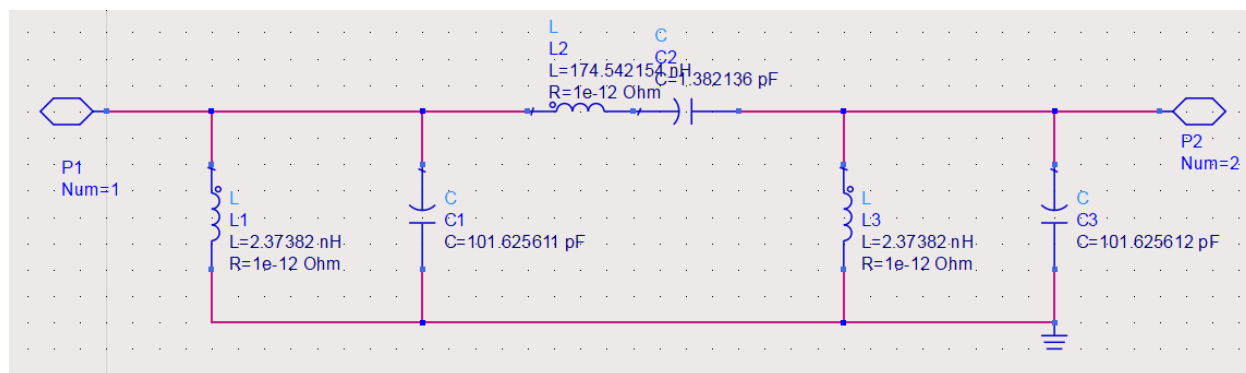
تصویر ۱۰- فیلتر میان‌گذر در ADS

سپس با Filter Control Window شروع به ساخت فیلتر می‌کنیم. مشخصات فیلتر به شکل زیر وارد پنجره ساخت فیلتر می‌شوند.



تصویر ۱۱- پنجره طراحی فیلتر در ADS

نتیجه این چنین خواهد شد.

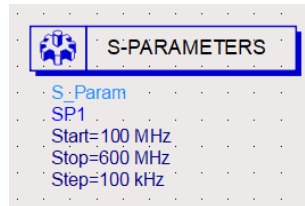


تصویر ۱۲- مدار طراحی شده توسط Filter Design در ADS



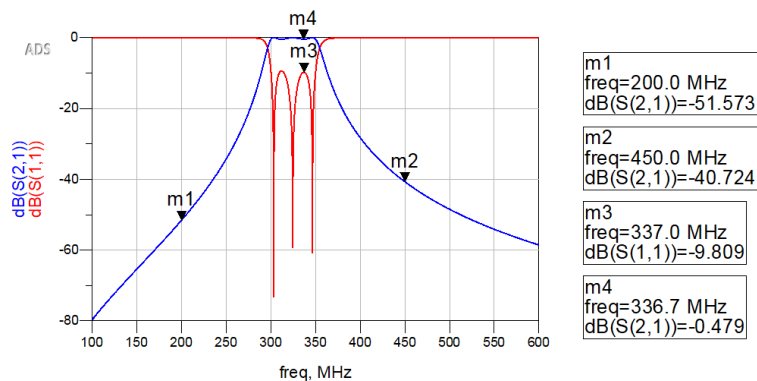
این مدار نشان می‌دهد که محاسبات دستی ما به درستی انجام شده است.

حال در مدار اصلی که خودمان رسم کردیم، با اضافه کردن تحلیل S\_Parameter به بررسی پاسخ فرکانسی مدار می‌پردازیم.



تصویر ۱۳ - پارامتر S

پاسخ مدار به شکل زیر است.



تصویر ۱۴ - وضعیت پارامتر S در مدار بهینه‌سازی نشده

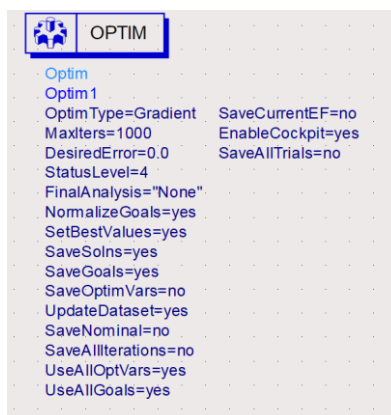
مشاهده می‌کنیم که پاسخ  $S_{11}$  مدار در باند عبور به اندازه  $-9.8\text{dB}$  است که مطلوب ما نیست. طبق تصویر زیر برای این که عبور خوبی از فیلتر داشته باشیم باید  $S_{11}$  حداکثر  $-15\text{dB}$  باشد.

6. VSWR and Return Loss

Return Loss in dB	What It Means	VSWR
0 dB	100% reflection, no power into the filter, all reflected back	Infinite
1 dB	80% reflection, 20% power into the filter	17
2 dB	63% reflection, 37% power into the filter	9
3 dB	50% reflection, 50% power into the filter	6
5 dB	32% reflection, 68% power into the filter	3.5
6 dB	25% reflection, 75% power into the filter	3
8 dB	16% reflection, 84% power into the filter	2.3
10 dB	10 dB (10% reflection, 90% power into the filter)	2
15 dB	15 dB (3% reflection, 97% power into the filter)	1.4
20 dB	20 dB (1% reflection, 99% power into the filter)	1.2

تصویر ۱۵ -- خصوصیات پارامتر  $S_{11}$  (تلفات بازگشتی)

پس باید مدار را بهینه‌سازی کنیم. Optim و Goal را اضافه کرده و به این صورت شرایط لازم مدار را تعیین می‌کنیم.

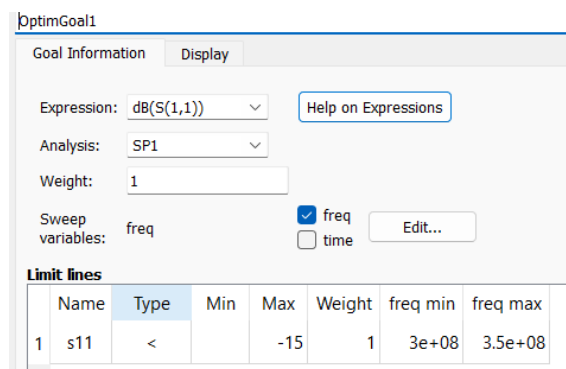


تصویر ۱۶- بهینه‌ساز ADS



تصویر ۱۷- اهداف بهینه‌ساز ADS

شرط اول این است که  $S_{11}$  در باند عبور از -15dB کمتر باشد.



تصویر ۱۸- شرط  $S_{11}$  برای بهینه‌ساز

شرط دوم این است که  $S_{21}$  که برابر  $|H(j\omega)|^2$  است مشخصات فیلتر را داشته باشد.

OptimGoal2

Goal Information    Display

Expression:  $\text{dB}(S(2,1))$     [Help on Expressions](#)

Analysis: SP1

Weight: 1

Sweep variables: ☒ freq    ☐ time    [Edit...](#)

**Limit lines**

	Name	Type	Min	Max	Weight	freq min	freq max
1	limit1	<		-30	1	4.5e+08	6e+08
2	limit2	<		-30	1	1e+08	2e+08
3	limit3	>	-0.5		1	3e+08	3.5e+08

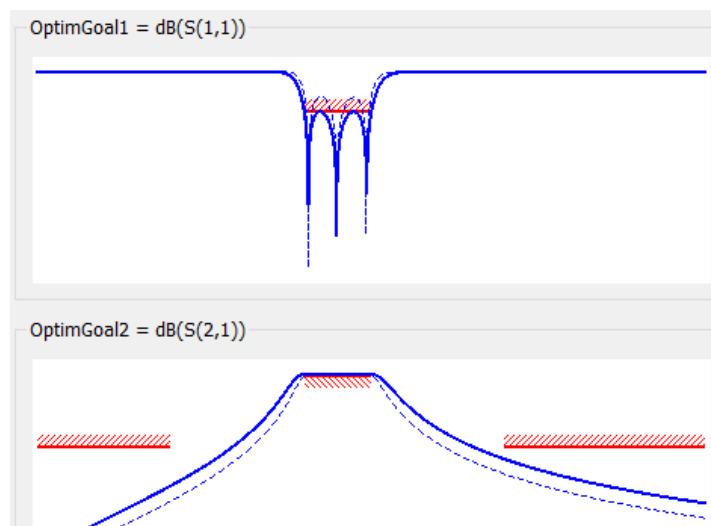
تصویر ۱۹- شرط دامنه فیلتر برای بهینه‌ساز

حالا بهینه‌سازی را اجرا می‌کنیم. نتیجه بهینه‌سازی این مقادیر را به ما خواهد داد.

C1.C	69.9441 pF
C2.C	1.32308 pF
C3.C	70.4791 pF
L1.L	3.44604 nH
L2.L	182.223 nH
L3.L	3.42119 nH

تصویر ۲۰- مقادیر بهینه‌سازی مرحله اول

و نتیجه آن هم به شکل زیر است



تصویر ۲۱- نتایج بهینه‌سازی مرحله اول

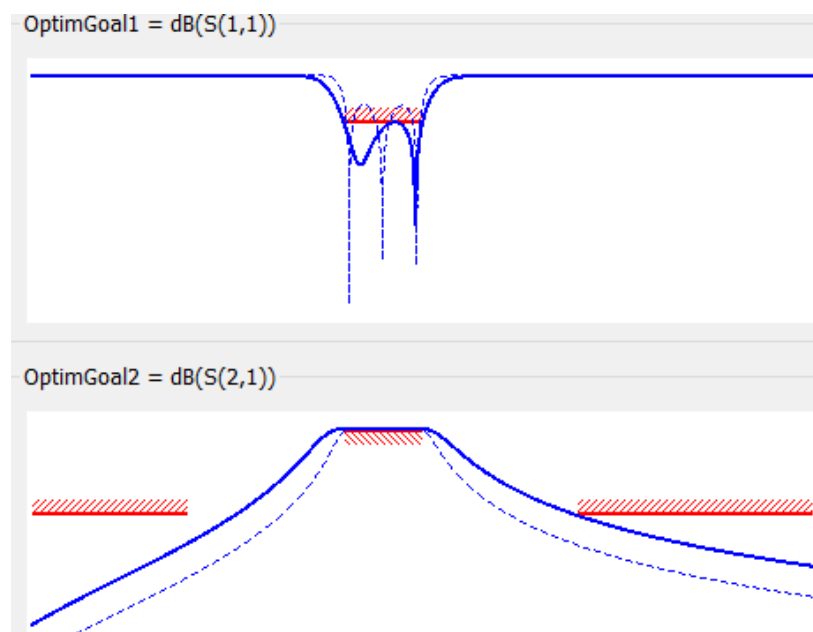
برای این که بتوان مدار را روی PCB ساخت باید مقادیر آن را استاندارد سازی کرد. باتوجه به این که مقادیر کوچک به خصوص سلف ها کمیاب تر هستند، ابتدا از سلف ها آغاز می کنیم.  $L_1$  و  $L_3$  را به  $4.7\text{nH}$  تقریب زده و مقدار  $C_2$  را  $1.3\text{pF}$  را تقریب زده و با دو خازن سری  $2.7\text{pF}$  می سازیم.

با این مقادیر مجدد بهینه سازی را انجام می دهیم. مقادیر جدید بدست خواهند آمد.

C1.C	52.6668 pF
C3.C	52.7373 pF
L2.L	185.832 nH

تصویر ۲۲- مقادیر بهینه سازی مرحله دوم

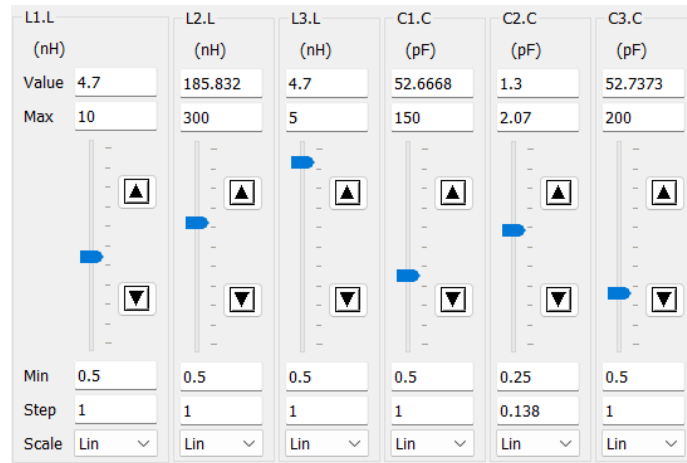
نتایج هم به شکل زیر است.



تصویر ۲۳- نتایج بهینه سازی مرحله دوم

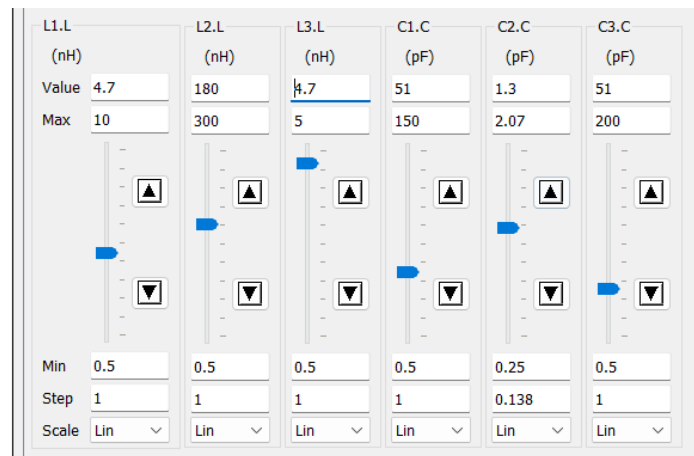
حال با توجه به این که  $C_1$  و  $C_3$  برابرند، می توان با Tuning دو مقدار متغیر را به استاندارد مورد نظر تبدیل کرد.

ابتدا مقادیر به شکل زیر هستند.



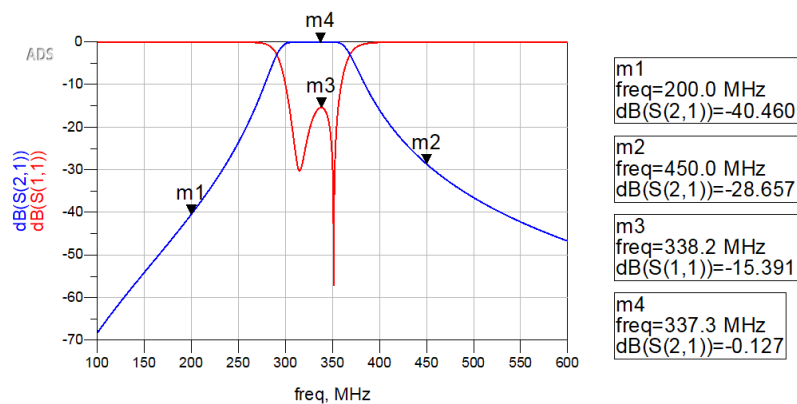
تصویر ۲۴- تغییر دستی مقادیر مدار با استفاده از Tuning

با تغییر دادن  $L_2$  و  $C_1$  و  $C_3$  به این مقادیر پاسخی ایده آل دریافت خواهیم کرد.



تصویر ۲۵- مقادیر نهایی مدار طراحی شده

پاسخ مدار نهایی به شکل زیر است.



تصویر ۲۶- نتایج نهایی مدار طراحی شده

به دلیل استاندارد سازی کمی از تضعیف باند فرکانس زیاد را از دست داده ایم (حدود 1.4dB). اما  $S_{11}$  در باند عبور زیر 15dB- است. ریپل باند عبور هم به 0.13dB کاهش یافته است.








مقادیر استاندارد مدار را به این صورت در نظر گرفته شده است:

$$1.3\text{pF} = 2.7\text{pF} + 2.7\text{pF}$$

$$180\text{nH} = 22\text{nH} + 22\text{nH} + 68\text{nH} + 68\text{nH}$$

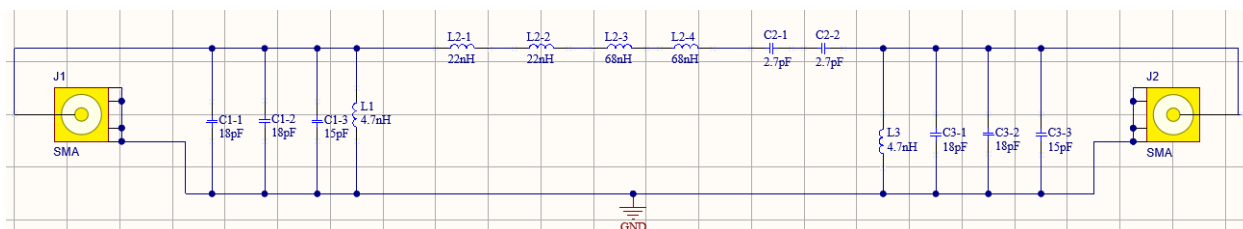
$$51\text{pF} = 18\text{pF} \parallel 18\text{pF} \parallel 15\text{pF}$$

$$4.7\text{nH} = 4.7\text{nH}$$

IND22NH0603	
C2.7pF50VS0603	
C18pF50VS0603	
C15pF50VS0603	
IND4.7nH 0603	
IN68NH 0805	
sma یغل بردی	

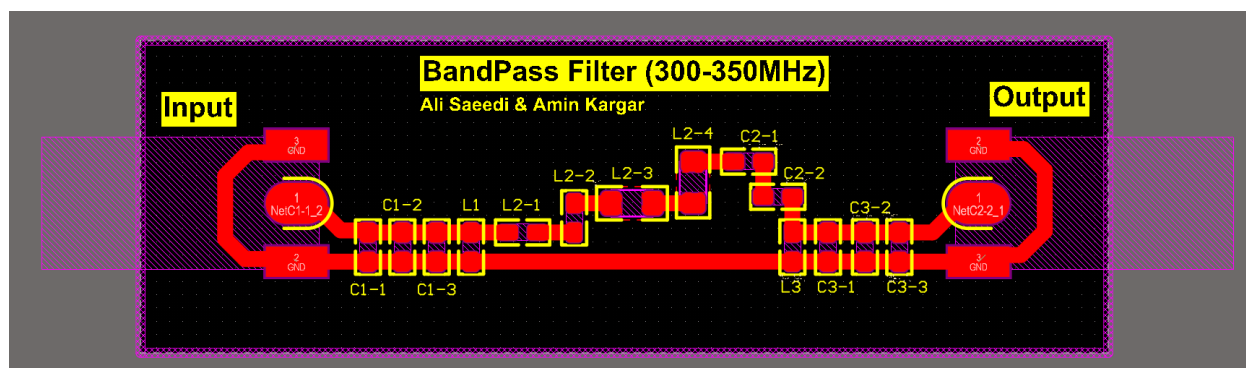
تصویر ۲۷- المان‌های استفاده شده در مدار

حالا که به مدار نهایی دست پیدا کردیم به سراغ رسم شماتیک آن در محیط Altium designer می‌رویم.

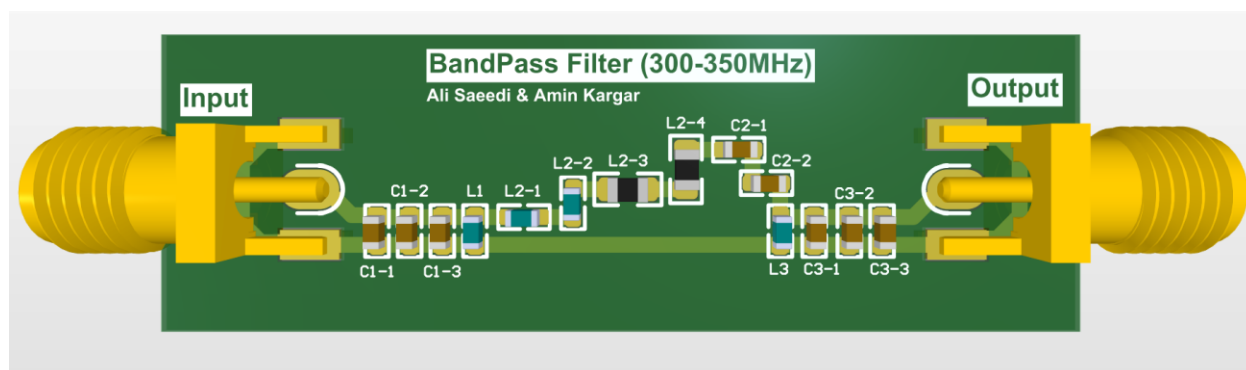


تصویر ۲۸- شماتیک مدار در Altium Designer

به جای مقاومت های ۵۰ اهم کانکتور SMA ۵۰ اهمی گذاشته شده. حالا به سراغ کشیدن PCB مدار می‌رویم. در این مورد باید دقت بشود که سائز مسیر کشی ها باید اندازه مناسبی داشته باشد تا قطعات SMD بتواند روی آن بنشینند. همچنین باید از فوت پرینت مناسب استفاده بشود که در ساخت برد به صورت عملی و لحیم کاری آن مشکلی رخ ندهد. در این PCB از قطعات SMD0603 که سائز آن‌ها ۰.۸\*۱.۶mm است استفاده کردیم. پس مسیر های PCB از سائز ۰.۸mm هستند. در قرار گیری سلف ها هم به این موضوع دقت شده است که سلف های سری عمود بر یکدیگر قرار بگیرند تا با یکدیگر کوپل نشوند و اثر تزویجی ایجاد نکنند. در نهایت Layout برد طراحی شده به شکل زیر است.



تصویر ۲۹- PCB مدار طراحی شده



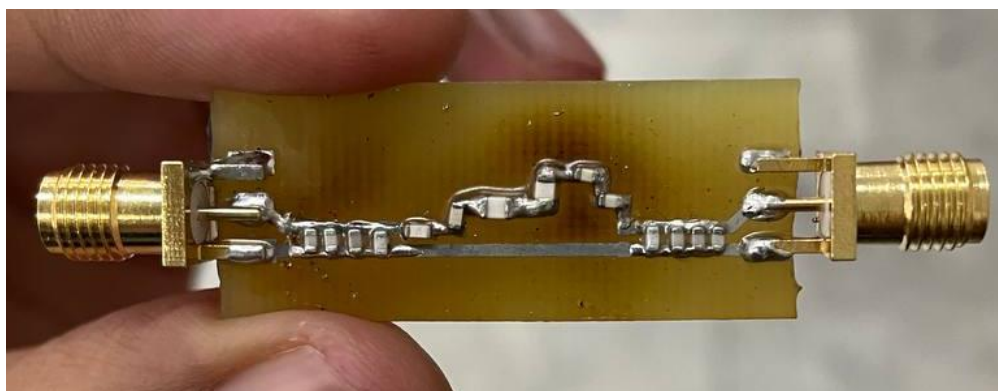
تصویر ۳۰- شکل واقعی PCB طراحی شده

برد مدار چاپی در نهایت به شکل زیر شد.



تصویر ۳۱- برد ساخته شده فیلتر

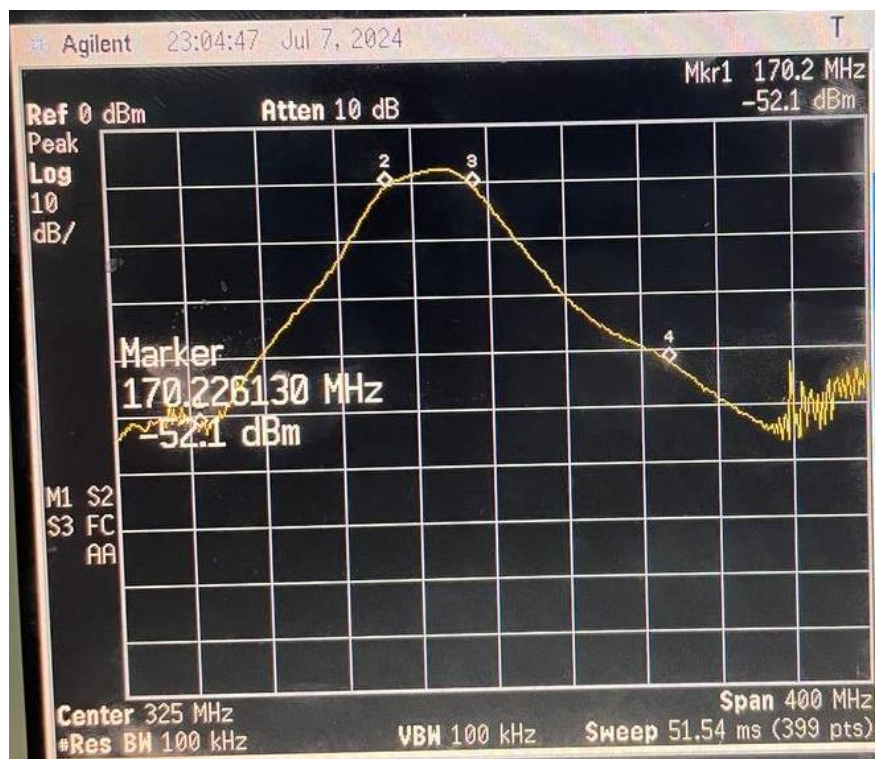
پس از لحیم کاری قطعات در نظر گرفته شده، فیلتر ساخته شده به شکل زیر است.



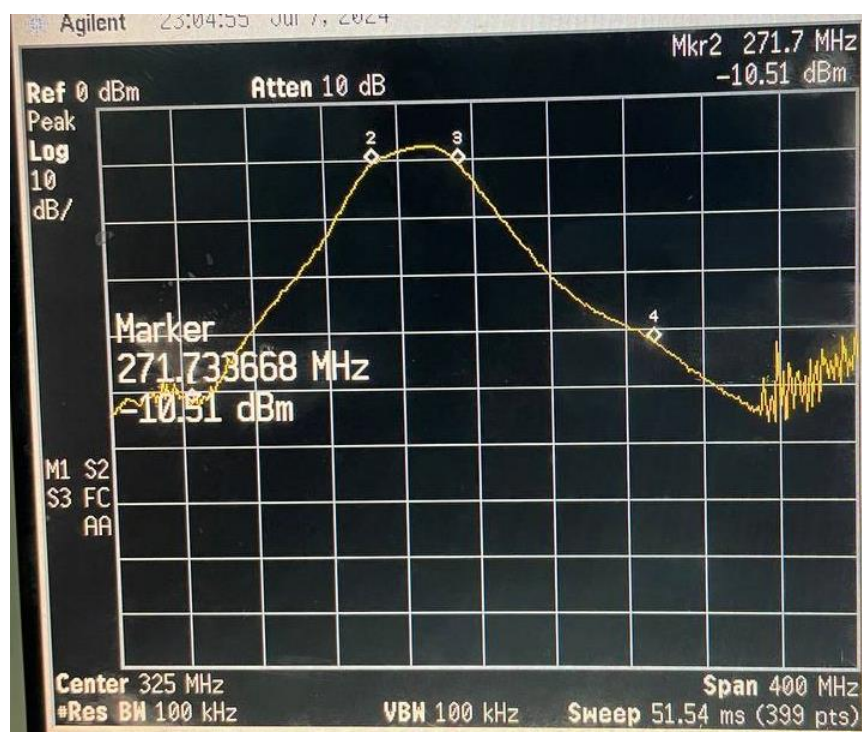
تصویر ۳۲- فیلتر ساخته شده



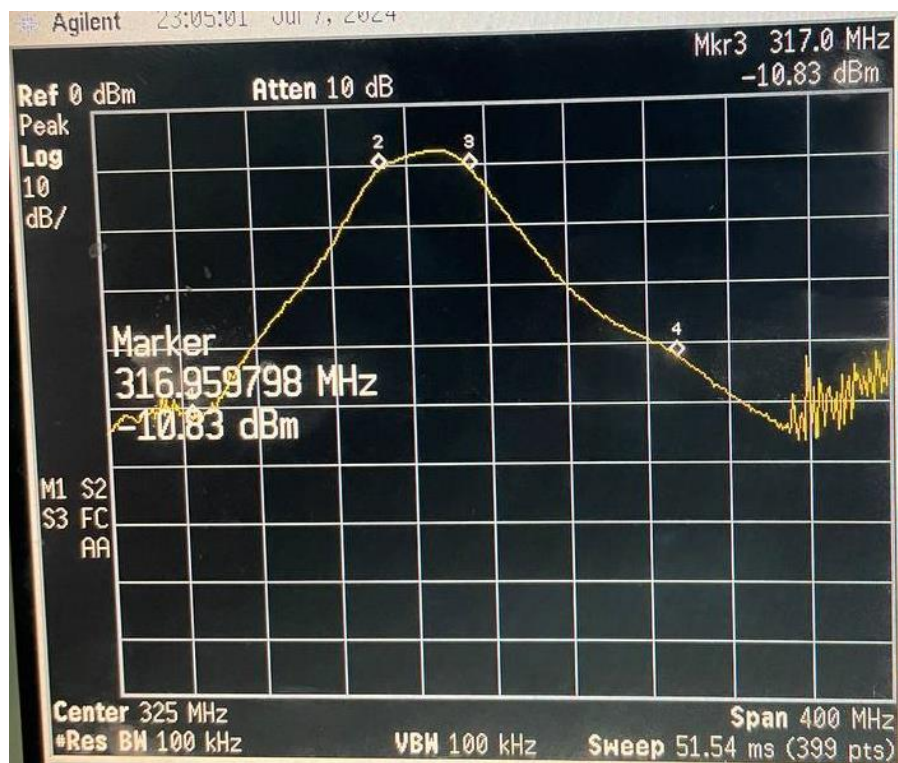
تست فیلتر ساخته شده با Spectrum Analyzer به نتایج زیر رسید.



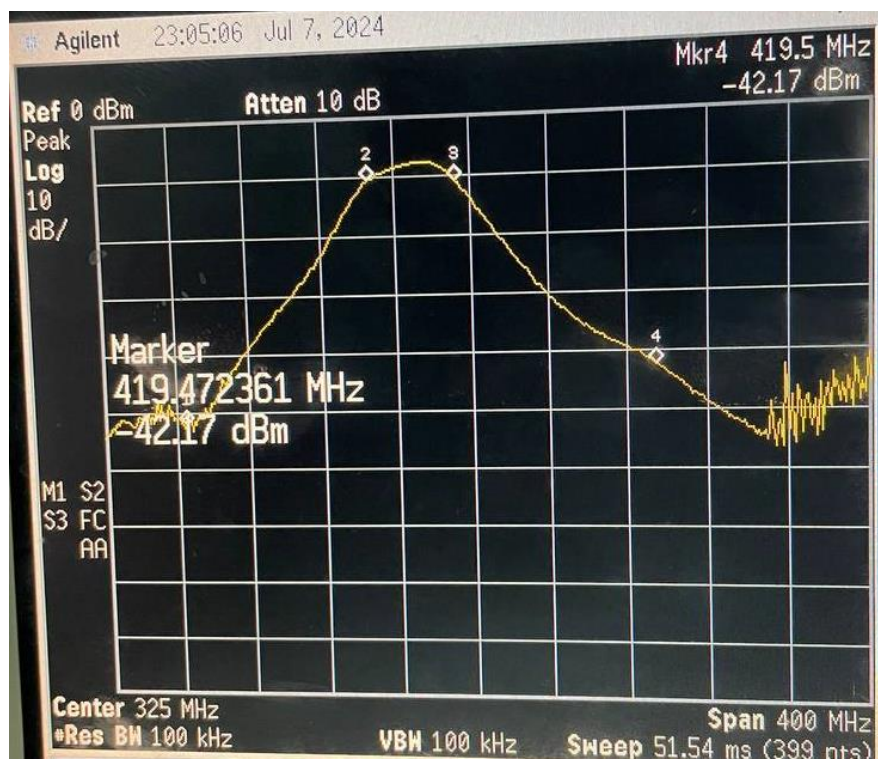
تصویر ۳۳ - پاسخ فیلتر به فرکانس 170MHz



تصویر ۳۴ - پاسخ فیلتر به فرکانس 270MHz



تصویر ۳۵ - پاسخ فیلتر به فرکانس 316MHz



تصویر ۳۶ - پاسخ فیلتر به فرکانس 420MHz