

Designing Circulator in HFSS

**Amirhossein
Mohammadi**

Date

1/7/2022

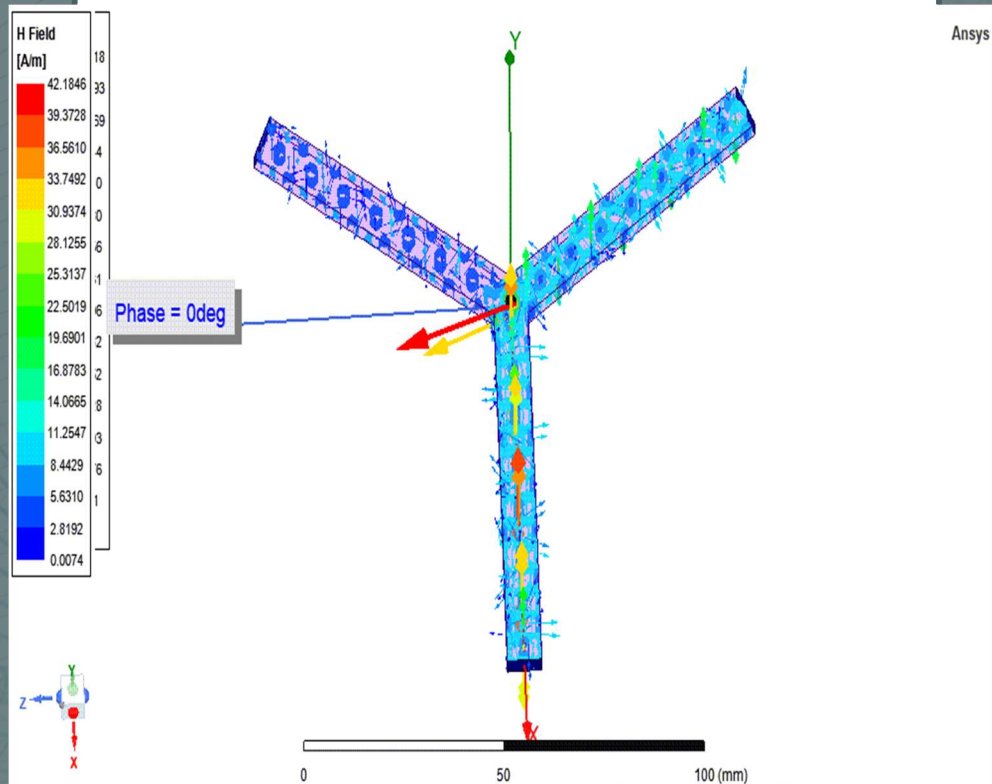
Course title

Microwave Engineering, I

Prof. Kamarei

مقدمه

در این آزمایش هدف طراحی سیرکولاتور در
باند فرکانسی 24 گیگا هرتز به طوری که
ایزولاسیون پورت ها 30٪ باشد. همچنین
آشنایی با مسایل تئوری و عملی سیرکولاتور
از اهداف این پروژه است.



تئوری مسئله:

سیرکولاتور یک قطعه سه پورتی میباشد که میتواند بی تلف باشد و در تمام ورودی ها تطبیق یابد. از ویژگی های مهم سیرکولاتور این است که اگر از پورت 1 ورودی باشیم آن را پورت 2، 2 را به پورت 3 و پورت 3 را به پورت 1 هدایت میکند. در نتیجه ماتریس پراکندگی آن به صورت زیر است:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} \\ S_{21} & 0 & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

حال با توجه به ماتریس پراکندگی فوق میتوان کاربرد های زیادی برای سیرکولاتور متصور شد. قبل از اینکه به کاربرد های سیرکولاتور بپردازیم به تحلیل میدانی بپردازیم. برای ساده تر شدن مسئله فرض میکنیم میدان در فرایت تنها راستای E_z را دارد. همچنین میدان مغناطیسی DC در راستای z است. حال با توجه به اینکه ماتریس μ فرم کارتزین دارد مینویسیم:

$$\begin{aligned} B_r &= \mu_0 \mu_r H_r + jK H_\phi \\ B_\phi &= -j\mu_0 K H_r + \mu_r H_\phi \end{aligned}$$

برای سیرکولاتور ایده آل تلفات را در نظر نمیگیریم در نتیجه داریم:

$$\begin{aligned} \mu_r &= w_0 - w^2 + w_0 w_m \\ K &= \frac{w w_0}{w_0^2 - w^2} \end{aligned}$$

حال با نوشتن معادلات مکسول داریم:

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -jw\mu H = \frac{a_r}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - a_\phi \frac{\partial E_z}{\partial r} \\ \nabla \times H &= jw\epsilon E_z a_z \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + k_\epsilon^2 E_z = 0$$

$$k_\epsilon^2 = \frac{w^2 \mu (\mu_r^2 - K^2) \epsilon}{\mu_r}$$

میتوان روابط را مشابه برای مود TM نیز به دست آورد. یک حل عمومی برای میدان الکتریکی به صورت زیر است:

$$E_z = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n e^{-jn\phi} + b_n e^{jn\phi}) J_n(k_\epsilon r)$$

که J تابع بسل از مرتبه n است.

$$H_\phi = -j \frac{\omega \epsilon}{k_c} \sum_{n=0}^{\infty} \left(a_n \left(J'(K_\epsilon r) - \frac{nK}{K_\epsilon \mu_r r} J_n(K_\epsilon r) \right) e^{-jn\phi} \right. \\ \left. + b_n \left(J'(K_\epsilon r) + \frac{nK}{K_\epsilon \mu_r r} J_n(K_\epsilon r) \right) e^{jn\phi} \right)$$

با توجه به رابطه به دست آمده متوجه میشویم میدان در حول دیسک فرایت در راستای $\pm \phi$ میباشد. از رابطه بالا میتوان مشاهده کرد دیسک فرایتی یک رفتار غیر متقابل از خود به جای میگذارد که یک ویژگی بسیار مهم برای سیرکولاتور است.

حال اگر شکل زیر را برای سیرکولاتور در نظر بگیریم، که زاویه پورت ها هر یک 120 درجه است و در هر پورت مقداری ثابت، یعنی:

$$H_\phi = \begin{cases} H_1 & -\frac{\Psi}{2} < \phi < \frac{\Psi}{2} \\ H_2 & \frac{2\pi}{3} - \frac{\Psi}{2} < \phi < \frac{2\pi}{3} + \frac{\Psi}{2} \\ H_3 & \frac{4\pi}{3} - \frac{\Psi}{2} < \phi < \frac{4\pi}{3} + \frac{\Psi}{2} \end{cases}$$

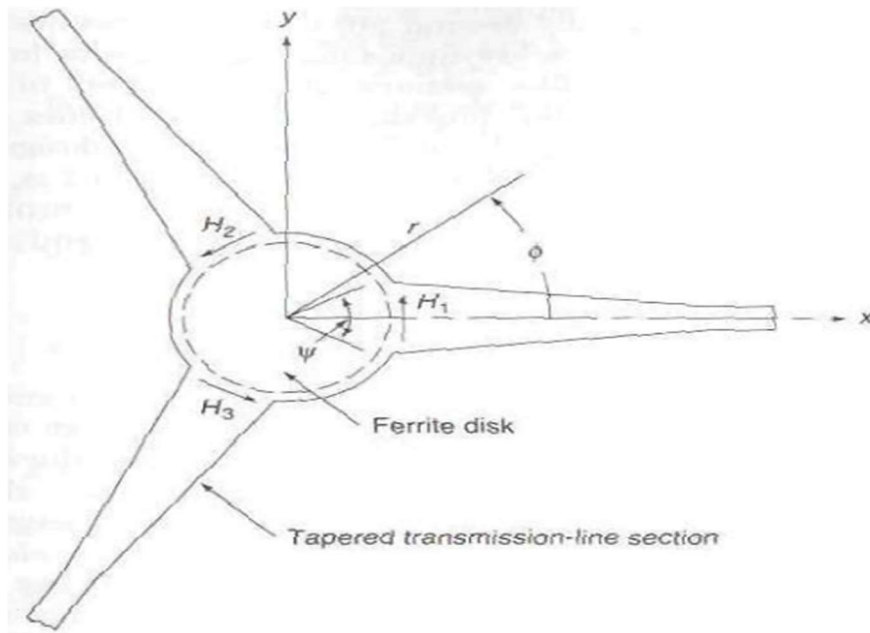


Figure1

با اعمال شرایط مرزی فرایت میتوان به زاویه کاپلینگ را به دست آورد:

$$\Psi = \frac{2\pi}{1.84\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{\mu_r \epsilon_0}\right) \frac{K}{\mu_r}}$$

روند طراحی در نرم افزار

برای طراحی سیرکولاتور در نرم افزار HFSS اولین قدم یافتن ابعاد موجبر است. ابعاد موجبر وابسته به فرکانس کاری می باشد، در نتیجه با توجه به اینکه در فرکانس 26 گیگاهرتز هدف ماست، ابعاد موجبر را متناسب با این فرکانس انتخاب میکنیم.

Waveguide Sizes

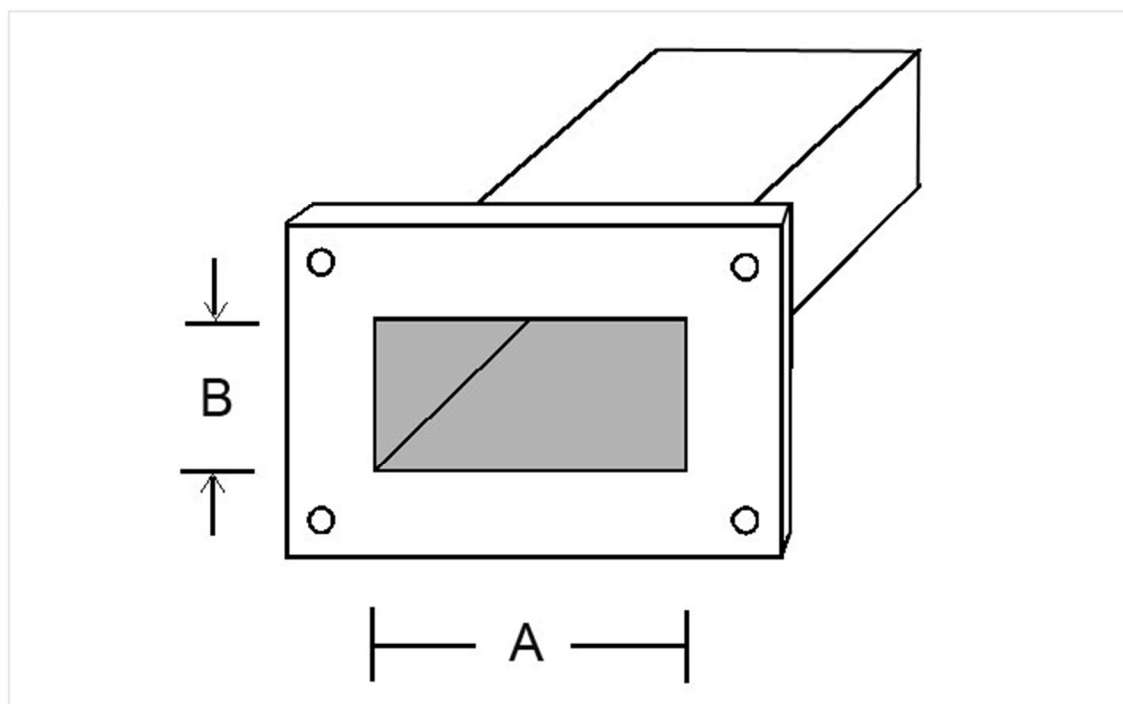


Figure2

با توجه به شکل بالا برای کاربرد ما:

$$A = 8.636 \text{ mm} ; B = 4.318^1$$

قدم بعد پیدا کردن ابعاد فرایت و بایاس آن میباشد. پس از شبیه سازی و آزمایش به این شعاع و بایاس رسیدیم:

$$\text{Radius} = 1.3 \text{ mm}$$

$$\text{Internal Bias } 2000 \frac{A}{m}$$

$$\text{Permeability Tensor Rotation} : (90^0, 0, 0)$$

¹ EIA Standard : [WR34](#) , Recommended frequency : 22 to 33 Ghz

در ادامه برای طراحی نیاز است تا جنس ساختار را انتخاب کنیم. برای هسته یک ماده فراییتی، بدنه طلا (I) و درون بدنه را خلا در نظر گرفتیم. شکل نهایی ساختار:

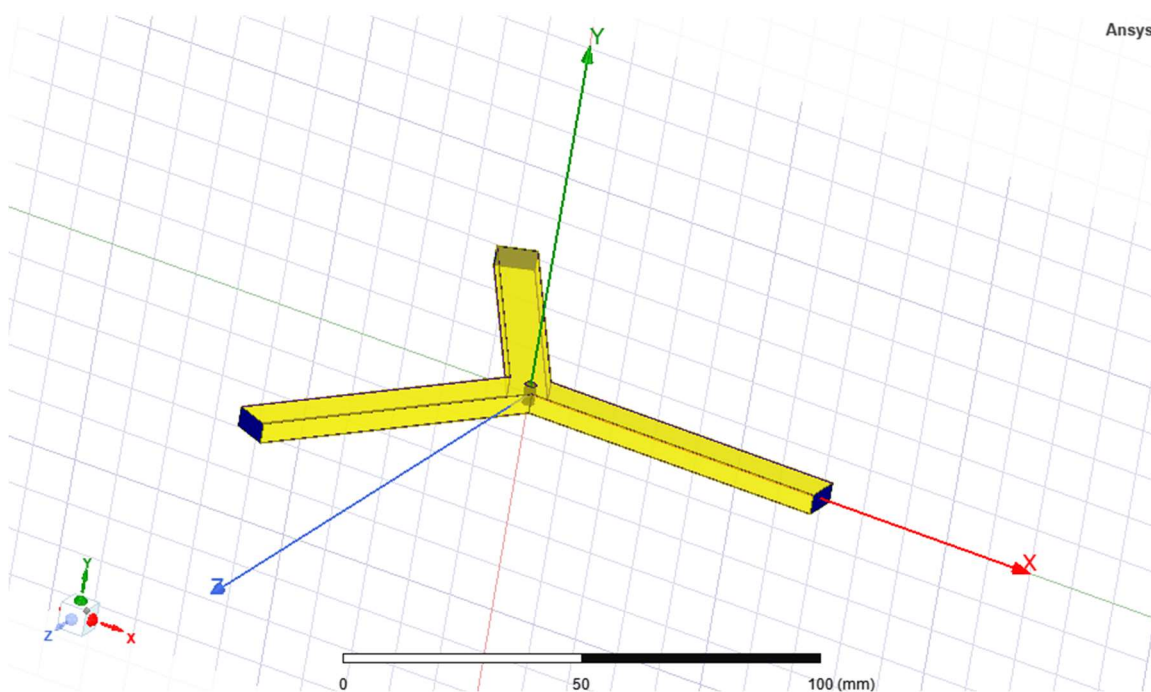


Figure3 , Circulator Structure

نکته بسیار مهم برای تسهیل در اجرا و محاسبات نرم افزار تنظیمات برنامه است. از منوی HPC analysis میتوان میزان هسته مورد استفاده از سی پی یو ، میزان رم مورد استفاده و استفاده از کارت گرافیک را برای برنامه تغییر داد. با افزایش میزان دسترسی برنامه، محاسبات با سرعت بسیار بیشتری انجام میگردد.

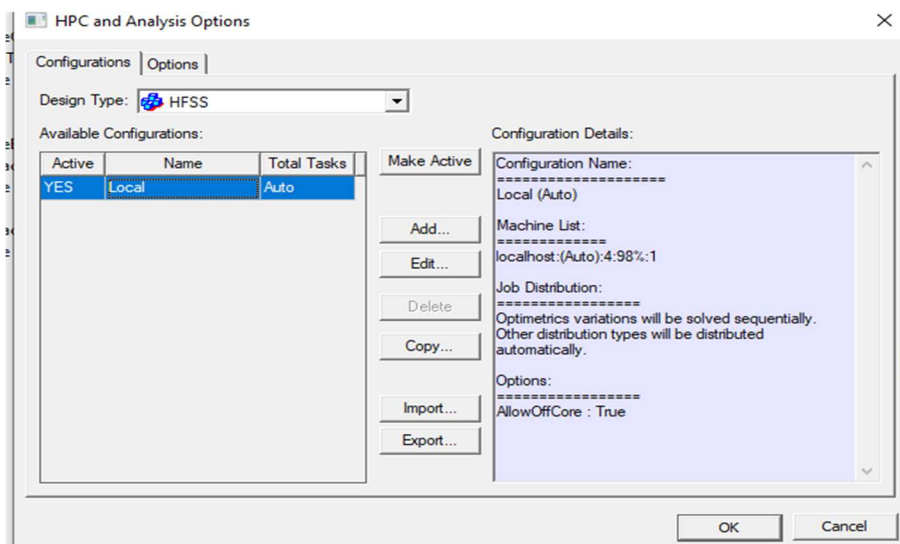


Figure4 HPC analysis

خروجی ها:

در ابتدا میدان الکتریکی را مشاهده میکنیم:

Ansys

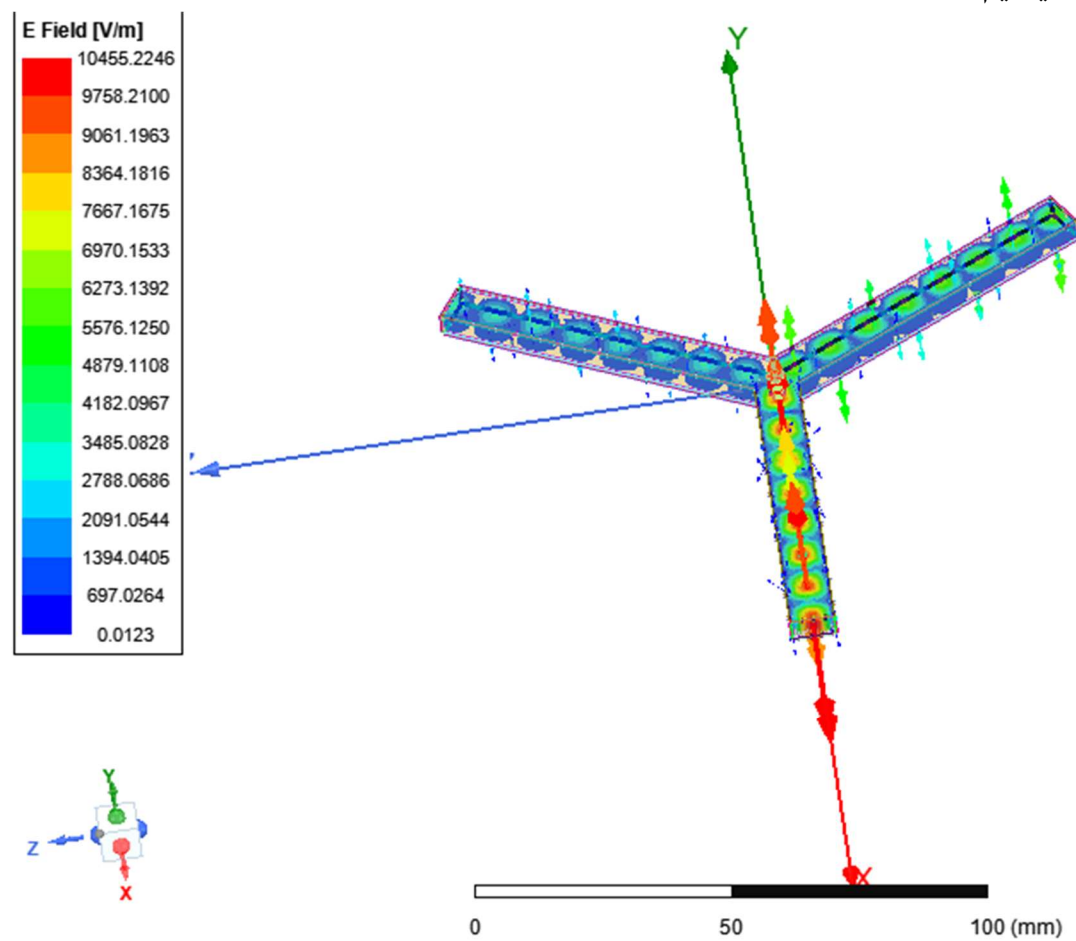


Figure 5 , Electrical Field

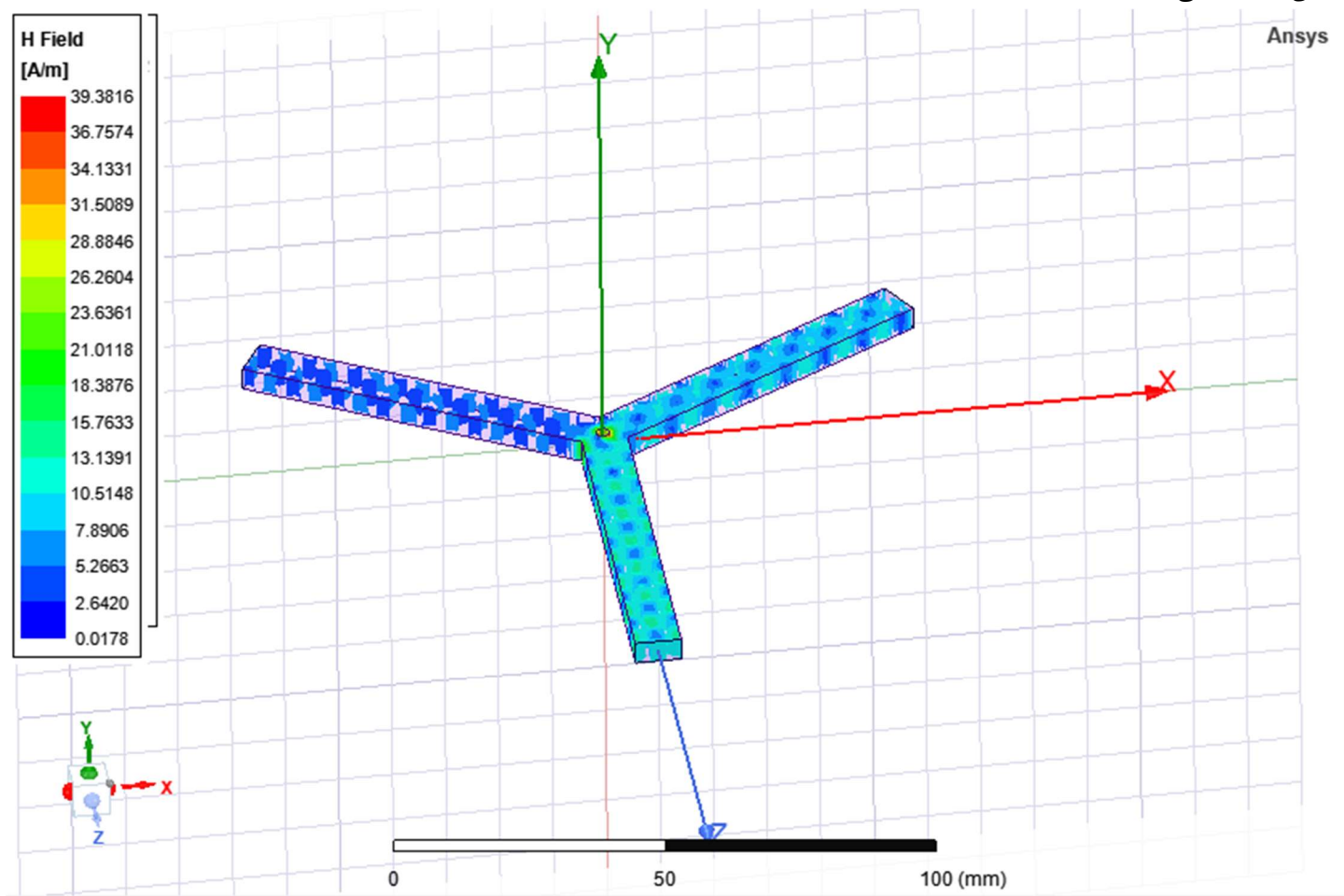
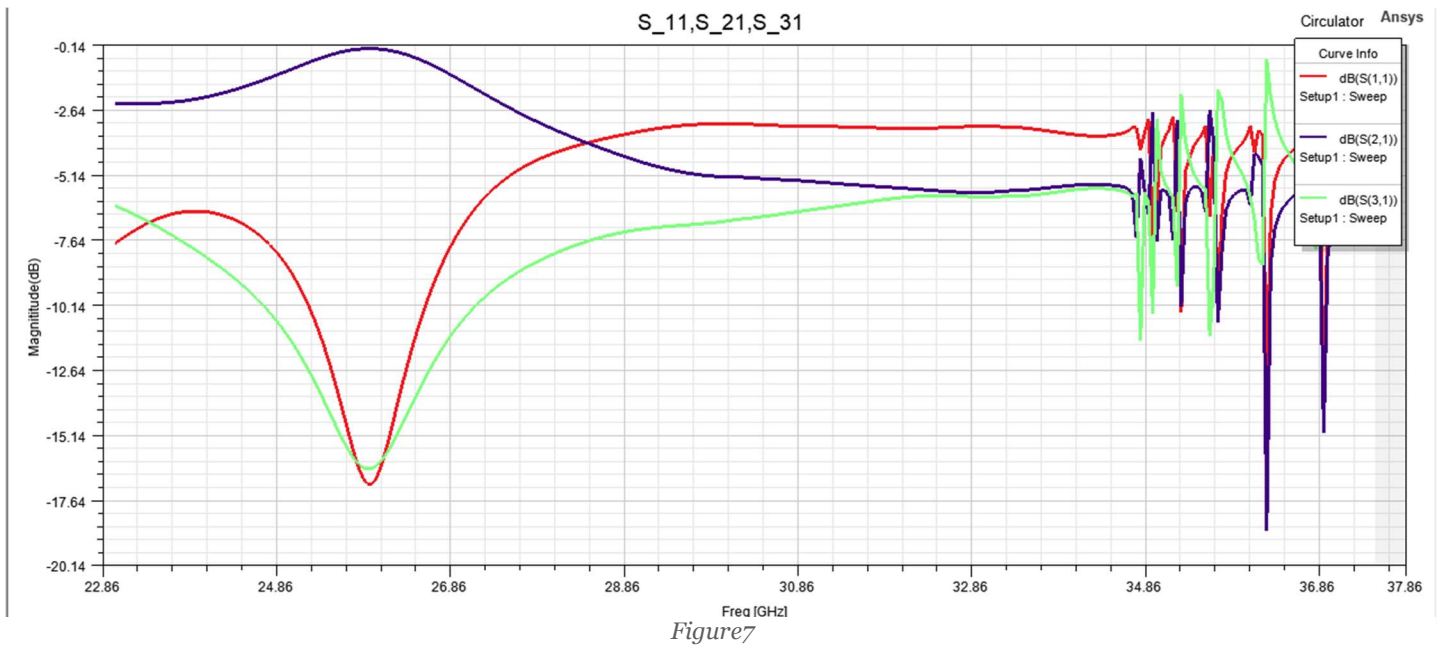


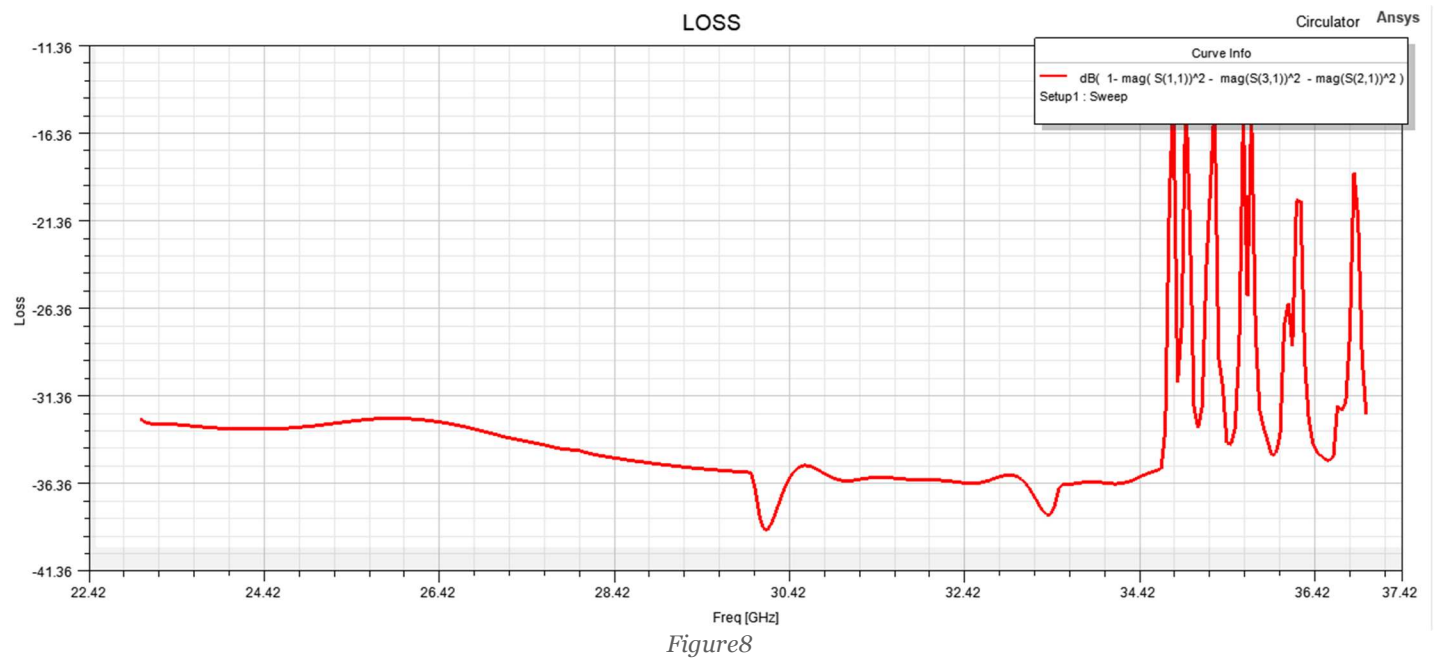
Figure6 , H field

حال به بررسی نمودار های خواسته شده می پردازیم:



شکل 7 نمودار پراکندگی پورت اول است که برای سایر پورت ها هم مشابهها به صورت بالا می باشد. مشهوده میشود که S_{11} برای فرکانس 25.9 ماکسیمم است و در این فرکانس بیشترین توان عبوری را داریم (به پورت شماره دو).

نمودار مربوط به تلفات :



با توجه به شکل شماره 8 اگر در باند فرکانسی تا 34 گیگاهرتز کار کنیم تلفات نسبتاً قابل قبولی را خواهد داشت.

نمودار مربوط به ایزولاسیون: با توجه به تعریف ایزولاسیون (توان ورودی به پورت دو به پورت سه) شکل آن به صورت زیر است:

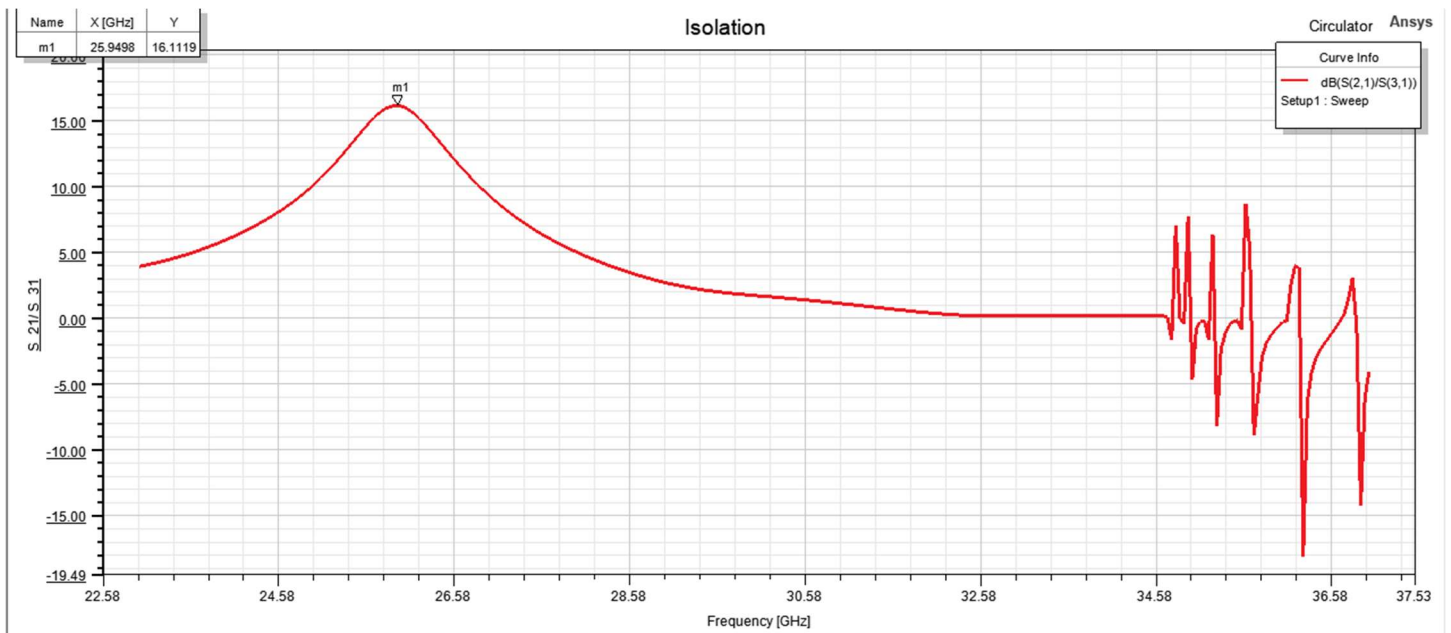


Figure9

در نتیجه در فرکانس 25.94 گیگاهرتز بهترین ایزولاسیون را داریم.

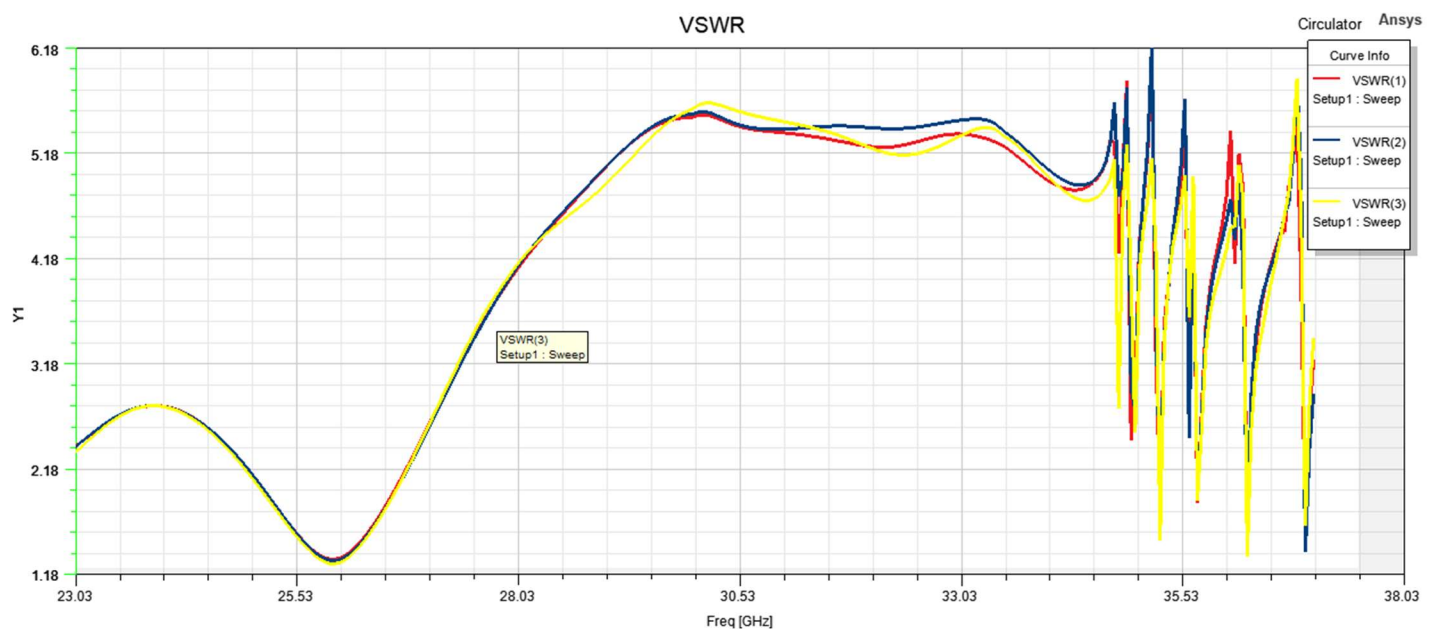


Figure10

نمдар VSWR که مشاهده میشود برای فرکانس 25.9 مقدار حدوداً یک را دارد.

برای بهتر کردن ساختار راه های زیر پیشنهاد میشود:

1. استفاده از دی الکترونیک در پورت ها.
2. گرفتن تیزی لبه ها.
3. تغییر ارتفاع فرایت یا استفاده از دو استوانه به جای یک استوانه در مرکز یا استفاده از ساختار هرمی.

با توجه به حجم محاسبات به طراحی فوق اکتفا میکنیم.

بررسی کاربرد ها و موارد تجاری:

با توجه به ویژگی های سیرکولاتور، این ساختار کاربرد های متعددی در صنعت دارد. میتوان یکی از پورت های آن را به یک امپدانس با مقدار مشخص وصل کرد (معمولا 50 اهم) و از آن به عنوان ایزولاتور استفاده کرد، به طوری که از پورت به طور مثال اگر پورت شماره دو را به یک امپدانس متصل کنیم آن گاه این قطعه تنها مینواند از یک به سه موج را هدایت بکند و اگر از سمت یک ورودی داشته باشیم به سمت امپدانس هدایت میشود.

دیگر کاربرد سیرکولاتور در دوپلکسر هاست. با توجه به نیاز ارسال و دریافت همزمان در رادار ها میتوان از سیرکولاتور به نحوی استفاده کرد که سیگنال دریافتی را به گیرنده و سیگنال ارسالی را به آنتن انتقال دهد. این قطعه در تقویت کننده های منعکس کننده، تقویت کننده های قدرت و آنتن ها کاربرد های بسیاری دارد.

برای انتخاب سیرکولاتور باید توجه داشت که برای چه کاربردی نیاز وجود دارد. زیرا سیرکولاتور ها میتوانند فرکانس کار، توان قابل انتقال و ابعاد مختلفی داشته باشند. برای نمونه برخی از دیتا شیت ها برای موجبر WR 34 که ما به طراحی آن پرداختیم نگاه می اندازیم.

مورد دیگر فرکانس کاری 22-33 گیگا هرتز (مشابه پروژه) با مشخصات زیر:

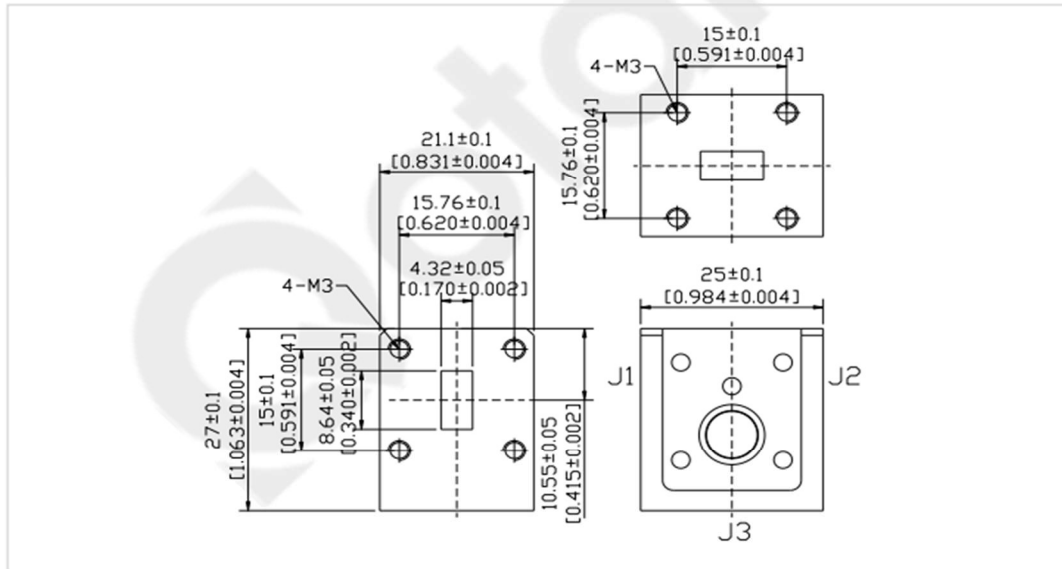
| Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units |
|--------------------|----------------|-------|------|----------|
| Frequency Range | | 22-33 | | GHz |
| Insertion Loss | | 0.40 | 0.50 | dB |
| Isolation (Note 1) | 18 | 19 | | dB |
| VSWR | | 1.25 | 1.30 | :1 |
| Forward Power (CW) | | | 25 | W |
| Rotation | Clockwise | | | |
| Flange Type | UBR260 | | | |
| Finish | Silver plated | | | |
| Case Material | Aluminum Alloy | | | |
| Weight | | 1.06 | | ounces |
| Impedance | | ----- | | Ω |

Note1 :

Units which have a narrower frequency bandwidth can achieve higher isolation & lower insertion loss
 Bandwidth (5 ~10) % x Center Frequency (Isolation >22dB)
 Bandwidth (20~30) % x Center Frequency (Isolation >21dB)
 Bandwidth (40~60) % x Center Frequency (Isolation >20dB)
 Ask manufacture for detail

Outline Drawing:

All Dimensions in mm (inches)



Note:

Due to the isolators and circulators belong to magnetic components, please far away from the magnetic matters by over 2 inches when you install or place.