

## طراحی یک عدسی مسطح پهن باند و به کارگیری آن در بازسازی سطح مقطع راداری میدان نزدیک

ایمان اکبری<sup>۱</sup>، جلیل راشد محصل<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات، ۲- استاد، دانشکده برق، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۰۹/۰۴؛ پذیرش: ۹۸/۱۲/۱۱)

### چکیده

تخمین سطح مقطع راداری (RCS) با استفاده از روش‌های میدان نزدیک به علت کم کردن هزینه اندازه‌گیری اهمیت زیادی دارد. این تحقیق به دنبال پیاده‌سازی سامانه بازسازی RCS با استفاده از تصویربرداری میدان نزدیک، با حجم پردازشی پایین، در محیط آزمایشگاه است. به این منظور یک عدسی فراسطح با ابعاد  $10 \times 10$  cm در باند فرکانسی ۱۰-۱۲ GHz طراحی و به کار گرفته شده و توانسته است پهنای پرتو آنتن استفاده شده را به کمتر از نصف برساند. بازدهی روزنه و پهنای باند ۱ dB- برای عدسی به ترتیب ۳۲٪ و ۷٪ به دست آمده است. سپس با استفاده از عدسی، RCS یک جسم فرضی با روش تصویربرداری میدان نزدیک، با حذف مرحله استخراج تصویر از میدان‌های دریافتی و فقط با استفاده مستقیم از میدان‌های دریافتی، بازسازی شده و با RCS دقیق مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود RCS محاسبه شده علاوه بر کاهش حجم پردازشی (با حذف مرحله بازسازی تصویر) و همچنین کاهش فاصله اندازه‌گیری است.

### واژگان کلیدی

سطح مقطع راداری، تصویربرداری میدان نزدیک، عدسی پهن باند مایکروویو، فرا سطوح

### ۱. مقدمه

روش دیگر محاسبه RCS روش‌های عملی و آزمایشگاهی است. در روش اندازه‌گیری عملی محدودیت‌هایی وجود دارد. چون RCS یک مولفه میدان دور از جسم است، برای اندازه‌گیری آن باید در میدان دور جسم قرار بگیریم [۱]. به علت این که اکثر اجسام مد نظر ابعاد بزرگی دارند (مانند هواپیما، کشتی یا پهپاد)، اندازه‌گیری RCS آن‌ها نیازمند اتاق آنتن‌هایی با ابعاد خیلی بزرگ است که باعث افزایش فراوان هزینه‌های اندازه‌گیری خواهد شد.

روش دیگری که در فاصله کم برای محاسبه RCS مورد استفاده قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری "برد متراکم" است. در این روش از بازتابنده‌های سهموی با دقت خیلی بالا استفاده می‌شود که هزینه ساخت بالایی دارند. از معایب دیگر بازتابنده‌ها می‌توان به انسداد تغذیه آن‌ها و همچنین حساسیت بالای آن‌ها به درصد خطای سطح اشاره کرد [۲]. در نتیجه روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان نزدیک جسم اهمیت خود را نشان می‌دهند. این تحقیق مرتبط با بهینه‌سازی یکی از این روش‌ها، یعنی روش اندازه‌گیری RCS با استفاده از تصویربرداری میدان نزدیک است.

رادارها امروزه به علت کاربردهای فراوان نظامی و غیر نظامی گسترش فراوانی یافته‌اند. در مسائل مربوط به رادار یکی از مهم‌ترین موضوعات تخمین سطح مقطع راداری (RCS) است.

برای اندازه‌گیری RCS روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. با توجه به این که حل تحلیلی دقیق فقط برای اجسام همگن با شکل هندسی ساده (صفحه تخت، کره، استوانه و...) امکان‌پذیر است، حل عددی و اندازه‌گیری عملی دو روش اجتناب‌ناپذیر برای تخمین سطح مقطع راداری اجسام پیچیده است. روش‌های عددی شامل روش‌هایی مانند روش ممان و رهگیری پرتو است.

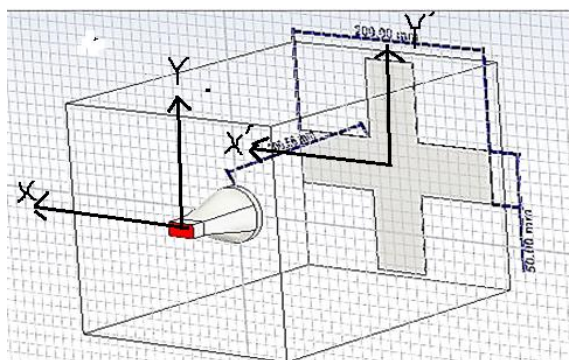
روش‌های عددی معمولاً برای اجسام با اندازه الکتریکی بزرگ، حجم پردازشی بالایی دارند و از طرف دیگر تقریب‌های به کار رفته در آن‌ها خطاهایی در RCS به دست آمده ایجاد خواهد کرد.

\* رایانامه نویسنده مسئول: jrashed@ut.ac.ir

بازسازی تصویر نیاز دارد که هرچند برای اجسام کوچک با رایانه‌های معمولی قابل انجام است ولی برای ساختارهای بزرگ این‌طور نیست و برای اطمینان از قابل پیاده‌سازی بودن این روش در آزمایشگاه، باید حجم پردازشی مورد نیاز را بهینه کرد.

معمولاً در بازسازی RCS با استفاده از تصویربرداری میدان نزدیک، برای استخراج تصویر جسم (تابع انعکاس) از روش ISAR استفاده می‌شود که آنتن‌ها ثابت‌اند و جسم روی یک صفحه گردان قرار می‌گیرد [۳]. در پژوهش ما با هدف بالا بردن قدرت تفکیک و هم‌چنین پیاده‌سازی روش تصویربرداری با میز X-Y-Z در آزمایشگاه، از روشی مشابه SAR دو بعدی استفاده می‌شود. به این صورت که آنتن صفحه  $z = 0$  را اسکن می‌کند و جسم در صفحه  $z = d_0$  ثابت است. آنتن با حرکت روی این صفحه اطلاعات اسکن مکانی و فرکانسی را ذخیره می‌کند. این روش شباهت زیادی با روش تصویربرداری هولوگرافی دارد [۴]. در مرجع [۳] فرمول‌بندی بازسازی تصویر بر اساس مختصات قطبی بیان شده است. در حالی که در این تحقیق، به‌علت ساختار تصویربرداری استفاده شده، مختصات دکارتی را مبنای فرمول‌بندی قرار خواهیم داد.

برای شبیه‌سازی این سامانه از نرم‌افزار شبیه‌سازی تمام موج CST با روش حوزه زمان استفاده خواهیم کرد. در شکل (۱) نمایی از شبیه‌سازی در محیط CST مشاهده می‌شود.



شکل (۱): ساختار سامانه تصویربرداری در نرم‌افزار CST

در این تحقیق جسم فرضی ما برای بازسازی تصویر و همین‌طور بازسازی RCS یک شکل "بعلاوه" (PLUS) با جنس رسانای کامل (PEC) است. انتخاب این شکل به‌علت وجود گوشه‌های مختلف و هم‌چنین طول و عرض متفاوت می‌تواند انتخاب

در ادامه در بخش دوم روش تصویربرداری استفاده شده بیان می‌شود و نتیجه بازسازی تصویر یک جسم فرضی با این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم روش بازسازی RCS با استفاده از تصویر به‌دست‌آمده توضیح داده می‌شود و نتیجه بازسازی RCS با استفاده از تصویر به‌دست آمده در بخش دوم، بررسی شده و معایب این روش بازسازی RCS بیان خواهد شد. هم‌چنین عنوان می‌شود که برای رفع این معایب از عدسی میکروویو استفاده خواهیم کرد. در بخش چهارم به بررسی و طراحی عدسی مدنظر پرداخته می‌شود و نتایج شبیه‌سازی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پنجم نتیجه بازسازی RCS با استفاده از این عدسی بررسی می‌شود. در نهایت در بخش ششم نتایج بازسازی RCS بدون عدسی و با استفاده از عدسی مقایسه شده و نتیجه بیان خواهد شد.

## ۲. تصویربرداری میدان نزدیک و بازسازی تصویر

کاربردهای تصویربرداری میدان نزدیک در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شود:

دسته اول کاربردهایی که از امواج میکروویو برای نفوذ به اجسام کدر در برابر نور استفاده می‌کنند. مانند رادارهای مشاهده پشت دیوار<sup>۱</sup>، آشکارسازی اسلحه مخفی<sup>۲</sup> و رادار نفوذ به زمین<sup>۳</sup>.

دسته دوم کاربردهایی که از امواج میکروویو مستقیماً برای اندازه‌گیری مشخصه‌ای از جسم استفاده می‌کنند. مانند تحلیل سطح مقطع راداری و ارزیابی غیر مخرب مواد [۲] که در این پژوهش مدنظر ما خواهد بود.

امواج میکروویو و میلی‌متری خواص منحصر به فردی دارند که کارکردهایی را که با تصویربرداری نوری یا فروسرخ غیر ممکن بوده، ممکن کرده است. از جمله این خواص قابلیت نفوذ بالای آن‌ها به اجسام کدر نسبت به نور است. میکروویو معمولاً به بازه فرکانسی ۳۰-۳۰۰ GHz (طول موج ۱-۱۰ cm) و موج میلی‌متری به بازه ۳۰-۳۰۰ GHz (طول موج ۱-۱۰ mm) اطلاق می‌شود.

معمولاً پراش محدودکننده قدرت تفکیک در اکثر سامانه‌های تصویربرداری است و در مورد امواج میکروویو به دلیل طول موج بزرگ این عامل اثر زیادی خواهد داشت. برای بهبود قدرت تفکیک از تصویربرداری در میدان نزدیک و روزه تصویربرداری بزرگ استفاده می‌کنیم [۲]. این روش حجم پردازشی بالایی برای

<sup>۱</sup> Through the wall RADAR

<sup>۲</sup> Concealed Weapon Detection

<sup>۳</sup> Ground Penetrating RADAR

با فرض این که جسم هدف در صفحه  $z = d_0$  باشد،  $D$  به شکل زیر به دست می آید:

$$D = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + d_0^2} \quad (2)$$

$x$  و  $y$  نقاط صفحه آنتن هستند،  $x'$  و  $y'$  نقاط صفحه جسم، فرکانس و  $\lambda$  طول موج و  $\Psi$  تابع انعکاس جسم است. اگر فاصله صفحه تصویربرداری (صفحه آنتن) تا صفحه جسم نسبت به ابعاد جسم بزرگ باشد، می توان  $D$  در مخرج عبارت بالا را با  $d_0$  تخمین زد.

حال اگر میدان بازگشتی روی یک صفحه دریافت شود می توان عکس تبدیل بالا را برای پیدا کردن تابع انعکاس به صورت زیر به دست آورد [۳]:

$$\Psi(x', y') = \iiint_{\text{frequency-imaging plane}} E_s(x, y, f) \cdot \xi(x, y, x', y', f) dx dy df \quad (3)$$

در این رابطه،  $\xi$  ضریب جبران فاز و دامنه است که برابر است با:

$$\xi(x, y, x', y', f) = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + d_0^2}} \cdot d_0^2 \quad (4)$$

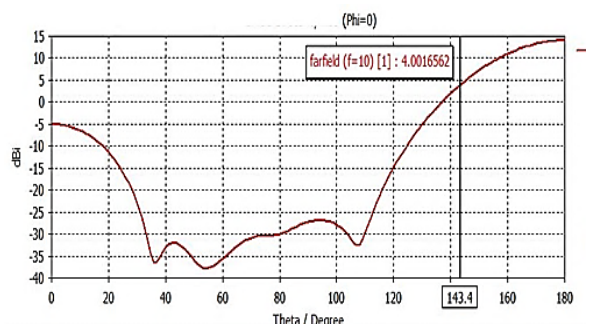
این رابطه مبنای ما برای بازسازی تصویر خواهد بود. در این تقریب تابع انعکاس از هدف ( $\Psi$ ) مستقل از فرکانس فرض شده است.

ابعاد صفحه تصویربرداری اگر از حدی کمتر باشد تصویر بازسازی شده یک تصویر فرکانس پایین از جسم خواهد بود که برای مثال گوشه های جسم را در تصویر به خوبی بازسازی نخواهد کرد. از طرف دیگر اگر ابعاد این صفحه از حدی بزرگ تر شود به علت این که آنتن در واقع جسم را در پهنای پرتو  $-3$  dB خود نمی بیند، این اطلاعات تاثیر چندانی در بازسازی تصویر نخواهد داشت و فقط حجم و زمان پردازش بالا خواهد رفت.

گام های حرکت آنتن روی صفحه تصویربرداری اگر از حدی بزرگتر باشد تصویر ما دچار ابهام یا الیاسینگ<sup>۲</sup> خواهد شد. این گام ها در بزرگترین حالت، باید از نصف قدرت تفکیک مد نظر کمتر باشد. از طرف دیگر کوچک کردن بیش از حد این گام ها به علت بالا بردن تعداد آزمایش، زمان و حجم پردازش را بسیار بالا خواهد برد. در نتیجه باید حد بهینه ای برای این گام ها بیابیم به شکلی که هم حجم پردازش اضافی بر کار تحمیل نشود و هم

مناسی برای مشاهده کارکرد سامانه تصویربرداری باشد. از طرف دیگر این شکل RCS متغیری نسبت به زاویه دارد که می تواند بازسازی RCS توسط الگوریتم را به خوبی محک بزند.

آنتن استفاده شده برای انجام تصویربرداری یک آنتن شیپوری با دهانه مخروطی است. در شکل (۲) الگوی تشعشعی آنتن در ۱۰ GHz قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود پهنای پرتو آنتن در صفحه  $\phi=0$  با معیار  $-3$  dB و  $-10$  dB به ترتیب حدوداً برابر ۴۰ و ۷۵ درجه است. قطر روزنه آنتن ۵ cm است. در نتیجه در فرکانس کاری ما فاصله میدان دور آنتن حدود ۲۰ cm می شود که ما جسم هدف را در صفحه  $z = 20$  cm می دهیم (با توجه به این مطلب که در فاصله میدان نزدیک جسم هستیم).



شکل (۲): الگوی تشعشعی آنتن استفاده شده در صفحه  $\phi = 0$  در فرکانس ۱۰ GHz

فرکانس کاری مورد نظر ۱۰-۱۲ GHz است. در سامانه تصویربرداری روش تک پایه<sup>۱</sup> برای آنتن فرستنده و گیرنده به کار گرفته شده است. یعنی آنتن فرستنده و گیرنده یکی است.

در الگوریتم بازسازی تصویر، جسم مجموعه ای از پراکنده گرهای نقطه ای در نظر گرفته می شود که ضریب انعکاس در هر کدام از این پراکنده گرها تابع انعکاس ( $\Psi$ ) را در صفحه جسم می سازد و هدف ما در بازسازی تصویر جسم، به دست آوردن این تابع انعکاس است.

با فرض تابش موج به جسم، می توان میدان دریافتی در نقطه آنتن را به صورت زیر در نظر گرفت [۳]:

$$E_S(x, y, f) = C \iint_{\text{object}} \Psi(x', y') \frac{e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (2D)}}{D^2} dx' dy' \quad (1)$$

در این فرمول  $C$  یک ثابت است که به پارامترهای سامانه وابسته است و  $D$  فاصله هر یک از نقاط جسم تا محل آنتن است.

<sup>2</sup> Aliasing

<sup>1</sup> Monostatic

متر بوده در حالی که ما در فاصله ۲۰ سانتی متری (فاصله میدان دور آنتن) تصویربرداری کرده ایم. هرچند که اگر بخواهیم از آنتنی با روزنه بزرگتر و پهنای پرتو کمتر و بهره بالاتر استفاده کنیم، این فاصله به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که احتمالاً در محیط کوچک آزمایشگاه قابل پیاده سازی نیست.

### ۳. بازسازی RCS با استفاده از تصویر به دست آمده

پس از بازسازی تصویر، به دنبال بازسازی RCS با استفاده از تصویر به دست آمده هستیم. برای بازسازی RCS مطابق رابطه (۵) برای محاسبه پارامتر پراکندگی<sup>۱</sup> از یک تبدیل استفاده می کنیم. این تبدیل در [۳] برای صفحه (دو بعد) نوشته شده است که ما پس از تعمیم آن به سه بعد، از آن به شکل رابطه (۵) استفاده می کنیم.

همچنین برای محاسبه RCS دو پایه<sup>۲</sup>، یعنی فرض تابش موج صفحه ای به جسم در زاویه نرمال و سپس مشاهده میدان بازگشتی در زوایای مختلف، باید جمله نمایی در رابطه محاسبه پارامتر پراکندگی در مقاله گفته شده به شکل زیر بازنویسی شود:

$$\sigma(f, \theta, \varphi) = e^{-\frac{2\pi}{\lambda}R} \cdot \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \Psi(x, y) e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x \sin(\theta) \cos(\varphi) + y \sin(\theta) \sin(\varphi))} dx dy \quad (5)$$

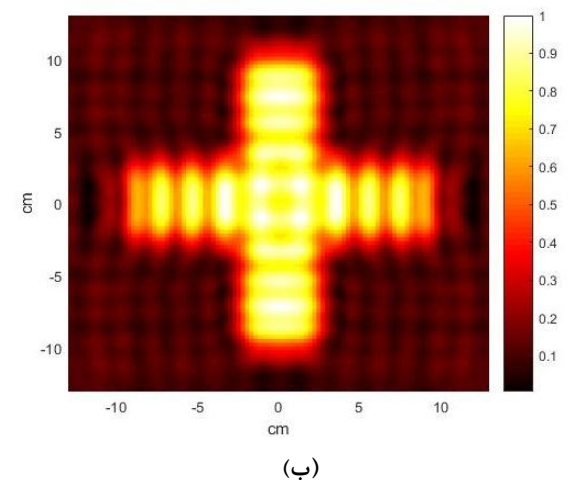
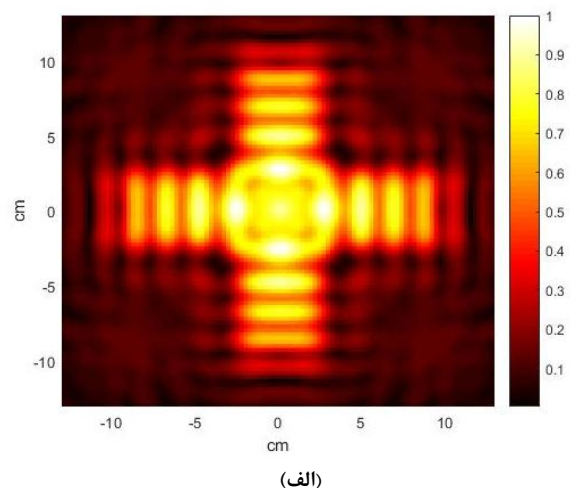
در ادامه تا آخر مقاله منظورمان از RCS همان RCS دو پایه خواهد بود. سپس RCS به شکل زیر به دست خواهد آمد [۳]:

$$RCS(f, \theta) = |\sigma(f, \theta)|^2 \quad (6)$$

همان طور که قبلاً بیان شد برای بازسازی تصویر و استخراج RCS از یک تبدیل انتگرالی استفاده می کنیم که یک ثابت وارد نتیجه خواهد کرد. در نتیجه برای بازسازی RCS نیاز به یک کالیبره سازی است تا این اثر حذف شود. برای کالیبره کردن از یک مربع ۱×۱ cm با جنس رسانای کامل (PEC) استفاده می کنیم. بدین صورت که RCS آن را با الگوریتم گفته شده و هم چنین RCS را به صورت دقیق به طور مستقیم توسط CST محاسبه می کنیم و با تقسیم این دو نسبت در زوایای مختلف، ضریبی را با عنوان ضریب کالیبراسیون، به دست می آوریم. RCS بازسازی شده از تصویرهای شکل (۳) در شکل (۴) مشاهده می شود.

حداقل قدرت تفکیک مورد نظر به دست بیاید. طبق این اطلاعات به تصویربرداری می پردازیم.

برای انجام تصویربرداری از شکل “بعلاوه”، ابتدا صفحه ۲۶×۲۶ cm و سپس صفحه ۳۰×۳۰ cm با گام ۱ cm اسکن شده است. نتیجه تصویر بازسازی شده در شکل (۳-الف و ب) آورده شده است:



شکل (۳): تصویر بازسازی شده از هدف با فاصله گام ۱ cm. (الف): اسکن صفحه ۲۶×۲۶ cm (ب): اسکن صفحه ۳۰×۳۰ cm

همان طور که مشاهده می شود در شکل (۳-الف) کلیت “بعلاوه” بازسازی شده است اما قدرت تفکیک خوبی برای تصویر بازسازی شده نداریم. اما شکل (۳-ب) کیفیت بالاتر و قدرت تفکیک بهتری دارد.

این تصویر با روش تصویربرداری میدان نزدیک حاصل شده است. زیرا به علت ابعاد جسم فاصله میدان دور جسم تقریباً سه

<sup>1</sup> Scattering

<sup>2</sup> Bistatic

طرف دیگر حجم و زمان پردازش مورد نیاز برای بازسازی تصویر با استفاده از اطلاعات میدان‌های دریافتی در صفحه  $z = 0$ ، بالا خواهد بود.

برای کم کردن حجم پردازش اگر پهنای پرتو تابیده شده به جسم به اندازه کافی باریک شود خواهیم توانست با حذف مرحله بازسازی تصویر و صرفاً با استفاده از میدان‌های دریافتی، RCS را بازسازی کنیم که این کار حجم پردازش را به شدت کم خواهد کرد. برای این کار در صورت استفاده از آنتن با رزوننه بزرگ‌تر به علت این که باید جسم در فاصله میدان دور آنتن باشد، احتمالاً سامانه بازسازی RCS در محیط آزمایشگاه قابل پیاده‌سازی نخواهد بود و هم‌چنین هزینه آزمایش بالا خواهد رفت. در نتیجه دنبال روشی قابل پیاده‌سازی در فاصله محدود آزمایشگاه، برای بالا بردن کیفیت RCS بازسازی شده هم‌زمان با کم کردن حجم پردازش مورد نیاز، هستیم.

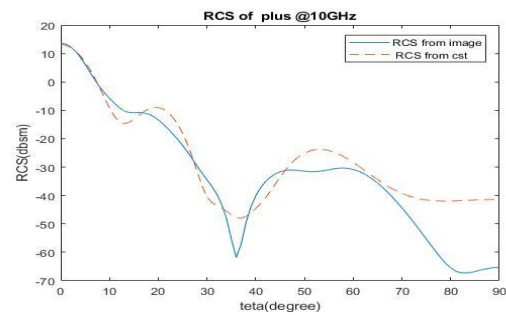
در نتیجه برای بالا بردن کیفیت تصویر و RCS بازسازی شده، از عدسی میکروویو استفاده خواهیم کرد. استفاده از عدسی دو مزیت اصلی را برای ما به ارمغان خواهد آورد.

اولاً با باریک کردن پهنای پرتو آنتن، بدون نیاز به دور کردن جسم (مانند حالت استفاده از آنتن با رزوننه بزرگ‌تر)، کیفیت تصویر را بالا خواهد برد. حتی به علت این که پس از عدسی، موج خروجی مشابه میدان دور، در یک صفحه هم فاز است (موج صفحه‌ای است)، می‌توانیم جسم را در فاصله‌ای کمتر از فاصله میدان دور آنتن قرار دهیم و فاصله انجام آزمایش کم خواهد شد. (عدسی اطلاعات میدان دور به فاصله کمتری آورده است)

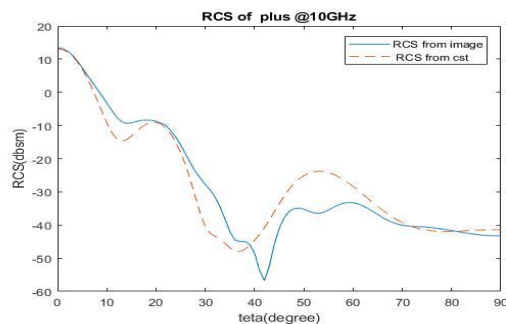
دوم این که در صورتی که عدسی بتواند به اندازه کافی پهنای پرتو تابیده شده را باریک کند خواهیم توانست با حذف مرحله بازسازی تصویر (که حجم پردازشی بالایی نیاز دارد) و صرفاً با استفاده از میدان‌های دریافتی، تصویر جسم هدف را به‌دست بیاوریم.

#### ۴. عدسی میکروویو و طراحی آن

عدسی‌ها وسایلی هستند که برای متمرکز کردن توان استفاده می‌شوند. عدسی‌ها را می‌توان در حالت کلی به سه نوع پراشی<sup>۲</sup>، انکساری<sup>۳</sup> و عدسی‌های مبتنی بر فراسطوح<sup>۴</sup> تقسیم کرد. عدسی‌های پراشی مانند عدسی‌های مبتنی بر صفحات نواری



(الف)



(ب)

شکل (۴): RC بازسازی شده از تصویر در ۱۰ GHz

مشاهده می‌شود که روند کلی RCS بازسازی شده شباهت خوبی با RCS به‌دست آمده توسط CST دارد. تفاوت‌های دیده شده در RCS بازسازی شده از تصویر و RCS به‌دست‌آمده توسط CST، ناشی از کیفیت ناکافی تصویر به‌دست آمده است.

در RCS بازسازی شده در بعضی زاویه‌ها صفرهای<sup>۱</sup> عمیقی مشاهده می‌کنیم که در RCS به‌دست‌آمده توسط CST مشاهده نمی‌شود. به علت این که ما جسم را به‌عنوان پراکنده‌گرهای مستقل در نظر گرفته‌ایم در زوایای مشخصی اثر میدان بازگشتی این پراکنده‌گرها دارای فازی خواهند بود که اثر مجموع آن‌ها یک‌دیگر را خنثی می‌کنند و RCS به شدت افت می‌کند. اما در هنگام بازسازی RCS دقیق با CST اثر پراکنده‌گی از لبه اجازه نمی‌دهد که RCS صفری عمیق با این اندازه داشته باشد، چون همیشه اثر لبه داریم. اما به علت محدود بودن صفحه اسکن شده، در تصویر بازسازی شده این اثر پراکنده‌گی از لبه به‌طور کامل وجود ندارد که این مطلب عامل ایجاد این صفرهای بزرگ است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد RCS به‌دست‌آمده با این روش وابستگی زیادی به کیفیت تصویر بازسازی شده دارد.

یکی از راه حل‌ها برای بالا بردن کیفیت تصویر، کم کردن فاصله گام آزمایش‌های مختلف و افزایش تعداد آزمایش‌ها است. این کار زمان انجام کار تصویربرداری را بسیار بالا می‌برد و از

<sup>2</sup> Diffractive

<sup>3</sup> Refractive

<sup>4</sup> Metasurface

<sup>1</sup> NULL



حداکثر، مقدار مشخصی گستره فازی<sup>۳</sup> برای جبران فاز، ایجاد کند. این مقدار بسته به این که از معیار  $-1$  dB یا  $-3$  dB برای عبور استفاده کنیم متغیر است و در حالت کلی در معیار  $-1$  dB برای داشتن گستره فازی کامل ( $360^\circ$  درجه) نیاز به چهار لایه سطوح انتخاب‌گر فرکانس (FSS<sup>۴</sup>) است و برای معیار  $-3$  dB نیاز به سه لایه است که این حد باید برای طراحی عدسی مد نظر قرار بگیرد.

در مقاله [۸] برای ساختن آرایه عبوری، ساختاری متشکل از دو پالایه<sup>۵</sup> انتخاب‌گر فرکانس میان‌گذر و میان‌ناگذر پیشنهاد شده است که به شکل صلیب با زائده‌ای در انتها هستند و پالایه‌ها با مدل سلف و خازنی شبیه‌سازی شده است. در نهایت با کنار هم قراردادن این دو توانسته است به پهنای باند  $-1$  dB،  $14\%$  و بازده روزنه  $38\%$  برسد.

در مقاله [۱۰] یک آرایه عبوری ۴ لایه پیشنهاد شده که در فرکانس  $30$  GHz به پهنای باند  $-1$  dB،  $7/5\%$  و بازده روزنه  $47\%$  رسیده است. این مقاله ساختاری متشکل از دو حلقه مربعی دارد که با کنار هم قرار دادن لایه‌هایی از این ساختارها به مطلوب مسئله، یعنی افزایش گستره فازی با حفظ پهنای باند عبور بالا، رسیده است. ابعاد این حلقه‌ها متغیر بوده و بهینه‌سازی شده است.

مقاله [۱۱] یک ساختار سه لایه آرایه عبوری را پیشنهاد می‌دهد که به شکل مارپیچی است و در باند X توانسته است  $360^\circ$  درجه گستره فازی را با عبور بهتر از  $-4/2$  dB به دست آورد. بازده روزنه این ساختار  $30\%$  و پهنای باند  $-1$  dB،  $9\%$  به دست آمده است.

مقاله [۱۲] ساختار عدسی فراسطحی را طراحی کرده است که توانسته در باند X پهنای پرتو قرار گرفته در نقطه کانونی را  $66^\circ$  درجه کم کند و بهره را  $-11/6$  dB افزایش دهد و گستره فازی  $360^\circ$  درجه را به دست آورد. ساختار سلول واحد پیشنهادی این مقاله شامل چهار لایه فلز و سه لایه دی‌الکتریک میان آنهاست که هر لایه فلزی شامل یک مربع خارجی و یک پچ دایروی داخلی است.

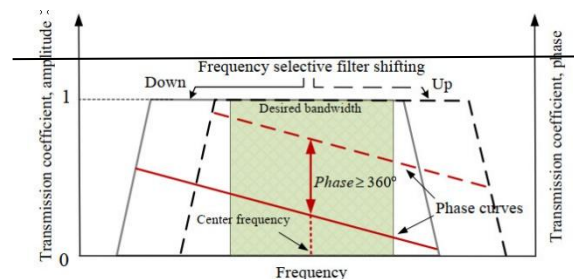
در نهایت مقاله [۱۳] که مبنای طراحی ما بوده با پیشنهاد یک ساختار متشکل از دو لایه فلز و دو لایه دی‌الکتریک توانسته است در باند تراهرتز به پهنای باند  $28\%$  برسد. در این مقاله هم برای تحلیل از مدل سلف و خازنی استفاده کرده است. طبق [۱۳] برای داشتن ساختار با پهنای باند زیاد و بازتاب کم، باید ساختار شامل دولایه با انعکاس دامنه مشابه ولی فاز عبوری

فرنل<sup>۱</sup> [۴] پهنای باند باریکی دارند که مناسب کار تصویربرداری نیست [۵]. عدسی‌های انکساری مانند عدسی لونیبرگ<sup>۲</sup>، دارای ابعاد بزرگ و وزن بالایی هستند که بازهم برای کار تصویربرداری در محیط آزمایشگاه مناسب نخواهد بود [۶]. در نتیجه از عدسی فراسطح استفاده خواهیم کرد.

فراسطوح، فرامواد صفحه‌ای با ضخامت کمتر از طول موج است. این ساختارها شامل یک یا چندلایه تخت است که به سادگی توسط دستگاه‌های چاپ PCB قابل ساخت هستند [۷].

اساس کار عدسی‌های مبتنی بر فراسطوح بر جبران اختلاف فاز در صفحه عدسی و هم‌فاز کردن جبهه موج رسیده به صفحه عدسی پس از عبور از آن، بنا شده است. با این کار روزنه بزرگ‌تر و پهنای پرتو باریک‌تر خواهیم داشت. این امر با چیدن سلول واحد‌های مختلف در صفحه عدسی ایجاد می‌شود.

برای طراحی این عدسی‌ها نیازمند سلول واحد‌هایی با پهنای باند بالا در عبور و همچنین دارای فاز عبور خطی در باند کاری مدنظر هستیم [۸]. علت این امر این است که مطابق شکل (۵) بتوانیم با تغییر پارامتری از سلول واحد جابه‌جایی فازی مناسب را به دست بیاوریم و اختلاف فازها را در صفحه جبران کنیم.



شکل (۵): ضریب عبور و فاز عبوری برای سلول واحد با تغییر پارامتر [۸]

اگر فاز عبوری (فاز  $S_{12}$ ) در باند کاری خطی نباشد ولی به ازای تغییر پارامتر سلول واحد، فاز برای فرکانس‌های مختلف رفتار مشابهی داشته باشد (نمودار فاز بر حسب تغییر پارامتر، به ازای فرکانس‌های مختلف موازی باشد) بازهم برای ساخت عدسی مناسب است. چون اعوجاج در فرکانس‌ها ایجاد نمی‌کند.

مقاله [۹] از مقالات اصلی مدنظر در طراحی عدسی و استفاده از آن است. در این مقاله با استفاده از فرمول‌بندی ریاضی و مدل‌سازی مناسب به این نتیجه رسیده است که در طراحی عدسی مایکروویو یا آرایه عبوری هر لایه فلز و دی‌الکتریک در بهترین طراحی سلول واحد و با چینش مناسب خواهد توانست

<sup>3</sup> Phase range

<sup>4</sup> Frequency Selective Surfaces

<sup>5</sup> Filter

<sup>1</sup> Fresnel zone plate

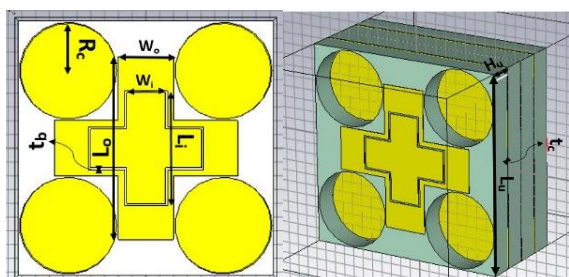
<sup>2</sup> Luneburg

پس از شبیه سازی ساختار، دنبال بهینه سازی رفتار سلول واحد یعنی افزایش پهنای باند و بازه دارای فاز خطی و افزایش گستره فازی سلول واحد (افزایش شیب نمودار فاز  $S_{12}$ ) هستیم.

برای افزایش پهنای باند سلول واحد، یک تشدید جدید در ساختار ایجاد می کنیم. برای این کار یک “بعلاوه” در وسط “بعلاوه” قبلی در لایه اول ایجاد می کنیم و همین طور در لایه سوم که مکمل لایه اول است هم همین تغییر را ایجاد می کنیم. پس از بهینه سازی مجدد ابعاد، پهنای باند سلول واحد به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

برای ایجاد عدسی باید پارامترهایی از ساختار سلول واحد را تغییر بدهیم تا بتوانیم با جابه جایی تشدیدها، به جابه جایی فازی مناسب دست پیدا کنیم و سپس با چیدن این سلول واحدهای تغییر یافته در سطح عدسی، اختلاف فازها را در صفحه جبران کنیم. اختلاف فاز میان سلول واحد اصلی و آخرین سلول واحدی که پارامتر آن را تغییر می دهیم گستره فازی را مشخص می کند که این محدوده به شیب نمودار فاز در قسمت خطی، وابستگی زیادی دارد (شکل (۵)). پارامتر انتخابی ما برای تغییر در این ساختار، طول “بعلاوه” ها خواهد بود. به علت این که عامل اصلی تعیین فرکانس این تشدیدها این طولهاست و از طرفی با ثابت نگه داشتن عرض “بعلاوه” ها و تنها تغییر طول آنها، درصد خطای ساخت کاهش خواهد یافت.

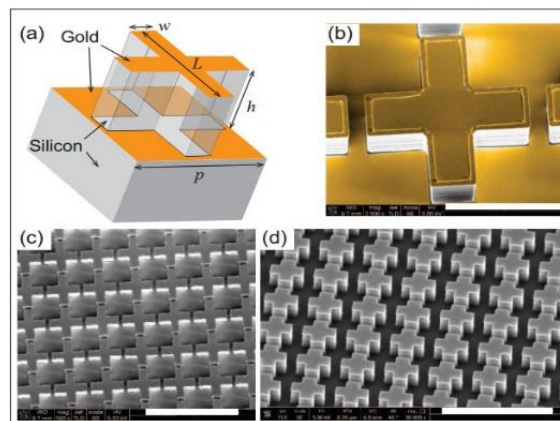
پس از تغییر پارامتر مدنظر برای سلول واحدها مشاهده شد که گستره فازی به دست آمده حدود ۱۴۰ درجه است که برای ساخت عدسی کافی نیست. برای افزایش گستره فازی با چهار لایه کردن ساختار سلول واحد به گستره فازی ۲۵۶ درجه دست پیدا می کنیم که برای ساخت عدسی مدنظر ما با طول ۱۰ cm کافی است. در شکل (۷) سلول واحد نهایی در نظر گرفته شده مشاهده می شود.



شکل (۷): سلول واحد ۴ لایه طراحی شده برای ساخت عدسی

پس از بهینه سازی ابعاد به منظور افزایش پهنای باند و محدوده فاز خطی  $S_{12}$ ، نتایج ابعاد ساختار بهینه در جدول (۱) آورده شده است.

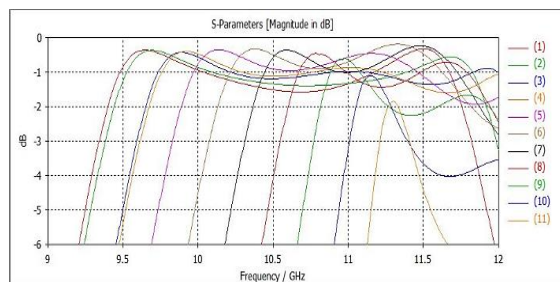
مخالف با هم باشد تا این دو در بازه فرکانسی بزرگی با ایجاد تشدید، اثر هم را خنثی کنند و عبور زیاد و انعکاس کم داشته باشیم. برای تحقق این ویژگی ها، از صفحه ای شامل ساختار “بعلاوه” و صفحه ای شامل دو شکاف عمود برهم که مکمل شکل “بعلاوه” است، استفاده شده است. بین این دو صفحه نیز لایه ای با جنس سیلیکون به کار رفته است. شکل (۶) سلول واحد این مقاله را نشان می دهد:



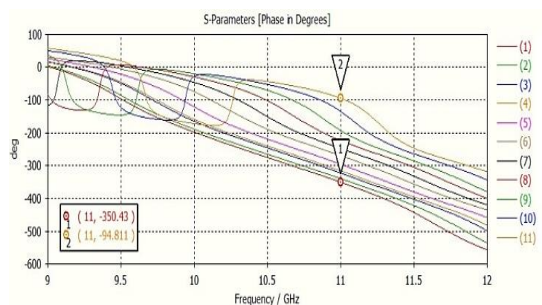
شکل (۶): سلول واحد مقاله [۱۳] برای دستیابی به ساختار با بازتاب کم

مرجع [۱۳] توانسته است به ساختاری با عبور مناسب و انعکاس اندک با پهنای باند ۲۸٪ در باند تراهرتز دست پیدا کند. هدف اصلی این مقاله معرفی ساختاری بدون انعکاس برای باند تراهرتز بوده است در حالی که ما به دنبال طراحی عدسی با پهنای باند بالا هستیم. به علت پهنای باند بالای به دست آمده در مرجع [۱۳]، سلول واحد این ساختار را مورد نظر قرار داده و ابعاد را با یک ضریب تغییر اندازه به باند مایکروویو آوردیم [۱۴]. به این ترتیب ابعاد اولیه تقریبی برای سلول واحد و “بعلاوه ها” برای بهینه سازی به دست می آید. در [۱۳] به علت باند تراهرتز از طلا به عنوان فلز استفاده شده است که در این تحقیق به جای آن از مس استفاده می کنیم. هم چنین به علت باند کاری مورد نظر (۱۰-۱۲ GHz) به جای سیلیکون از ماده تاکونیک (CER10) به عنوان ماده زیرلایه استفاده می کنیم. علت این انتخاب  $\epsilon_r$  بالا (برابر ۱۰) است که با ایجاد اختلاف فاز بالا در فاصله کم برای طراحی عدسی مناسب است. پس از تغییر ماده زیر لایه دوباره ابعاد را برای سلول واحد، بهینه سازی می کنیم.

هنگام ساخت، ایجاد گوشه های تیز زیر ساختار “بعلاوه” کار مشکلی است. در حالی که ایجاد حفره های استوانه ای شکل کار راحت و کم هزینه ای است. در نتیجه ما این چهار گوشه (زیر ساختار “بعلاوه”) را در سلول واحد، به شکل استوانه ای قرار می دهیم و طراحی را مطابق آن انجام می دهیم.



(الف)

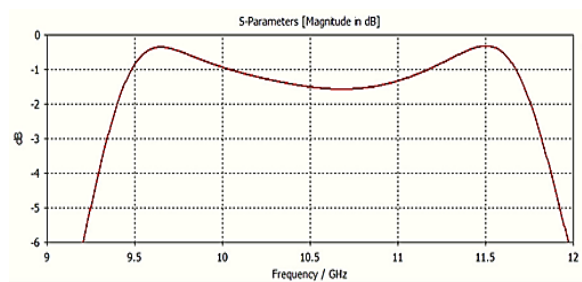


(ب)

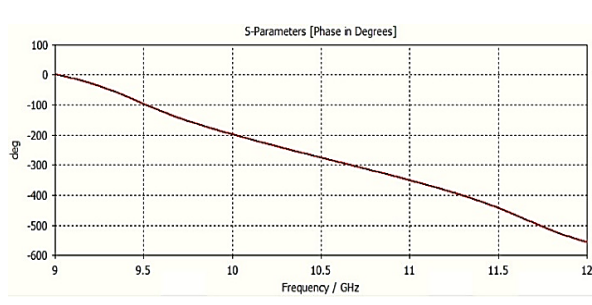
شکل (۹): میدان عبوری به ازای تغییر پارامتر طول “بعلاوه”ها. (الف): اندازه  $S_{12}$ , (ب): فاز  $S_{12}$

در شکل (۹-الف)، مشاهده می‌شود که اندازه عبور سلول واحد به ازای چند آزمایش آخر به میزان زیادی کاهش یافته است. چون این سلول واحدها در دورترین فاصله نسبت به مرکز عدسی هستند و از طرف دیگر چون اکثر توان تابشی از آنتن به مرکز و سلول واحدهای نزدیک مرکز عدسی می‌تابد، این کم بودن ضریب عبور برای سلول واحدهای دور از مرکز عدسی، هنگامی که این سلول واحدها فاز را به شکل مطلوب تغییر می‌دهند، در عملکرد عدسی تاثیر چندانی نخواهد داشت. هم‌چنین شکل (۹-ب)، نشان می‌دهد که گستره فازی به‌دست آمده در فرکانس ۱۰ GHz کمتر از ۲۵۶ درجه است. نتیجه این امر اختلاف پهنای پرتو در این فرکانس نسبت به فرکانس مرکزی خواهد بود. هرچندکه به علت کم بودن این تفاوت گستره فازی در فرکانس ۱۰ GHz نسبت به فرکانس مرکزی، این تفاوت پهنای پرتو اندک خواهد بود و در عملکرد پهن باند عدسی تاثیر کمی خواهد داشت.

برای مشاهده مشخصات میدان عبوری سلول واحدهای مختلف به ازای تغییر طول “بعلاوه”ها، در شکل (۱۰) فاز و اندازه میدان عبوری به ازای سلول واحد مختلف (با کاهش طول “بعلاوه”ها) رسم شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۸): میدان عبوری از سلول واحد با ابعاد جدول (۱). (الف): اندازه  $S_{12}$ , (ب): فاز  $S_{12}$

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مختلف سلول واحد طراحی شده

پارامتر	$t_b$	$t_c$	$R_c$	$L_u$	$H_u$	$W_o$	$W_i$	$L_o$	$L_i$
مقدار (mm)	۰/۱۵	۰/۰۳۵	۱/۷	۹/۲	۲/۲	۲	۱/۴	۶/۶	۴

اندازه و فاز  $S_{12}$  پس از شبیه‌سازی برای ساختار با اندازه‌های جدول (۱) در شکل (۸) قابل مشاهده است.

باتوجه به شکل (۸)، ضریب عبور سلول واحد برای پهنای باند دو گیگاهرتز، در حدود -۱ dB نگه داشته شده است و فاز عبوری مطابق نیاز به شکل تقریباً خطی به‌دست آمده است. در نتیجه این سلول واحد با ابعاد گفته شده در جدول (۱) به‌عنوان سلول واحد اصلی برای تغییر پارامتر و طراحی عدسی مورد نظر قرار می‌گیرد.

پس از تغییر (کاهش) طول “بعلاوه”ها، اندازه و فاز  $S_{12}$  برای سلول واحدهای تغییر یافته در شکل (۹) مشاهده می‌شود. مطابق شکل گستره فازی ۲۵۶ درجه برای فرکانس مرکزی بازه (۱۱ HzG) به‌دست آمده و هم‌چنین اندازه  $S_{12}$  به ازای تغییر طول “بعلاوه”ها در حد مشخصی نگه داشته شده است.



کاهش طول "بعلاوه"ها را برای طراحی عدسی استفاده خواهیم کرد.

ابعاد عدسی مورد نظر برای این تحقیق  $10 \times 10$  cm است. به منظور دست‌یابی به بهره بالا و بهینه پس از عدسی، آن را در محل پهنای پرتو  $-10$  dB آنتن قرار می‌دهیم. (برای ایجاد حد توازن مناسب بین تلف توان سرریز و تلف روشن نشدن کامل عدسی؛ مشابه قرار گیری بازتابنده در محل  $-10$  dB تغذیه). حال با داشتن پهنای پرتو  $-10$  dB آنتن و ابعاد عدسی، فاصله عدسی تا آنتن (فاصله کانونی عدسی) مشخص می‌شود.

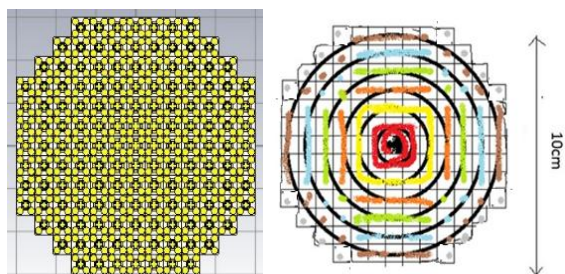
مطابق شکل (۲) نصف پهنای باند  $-10$  dB آنتن شیپوری اولیه در صفحه  $\phi = 0$  حدوداً برابر  $37$  درجه است. با در نظر گرفتن  $10$  cm برای طول عدسی و با یک رابطه ساده ریاضی، فاصله کانونی عدسی ( $f$ ) را  $7$  cm در نظر می‌گیریم.

پس از مشخص شدن فاصله کانونی عدسی و ابعاد عدسی، می‌توان میزان اختلاف فاز مورد نیاز برای نقاط مختلف عدسی را مطابق رابطه (۷) به عنوان تابعی از فاصله آن نقطه تا مرکز عدسی ( $r$ )، محاسبه کرد.

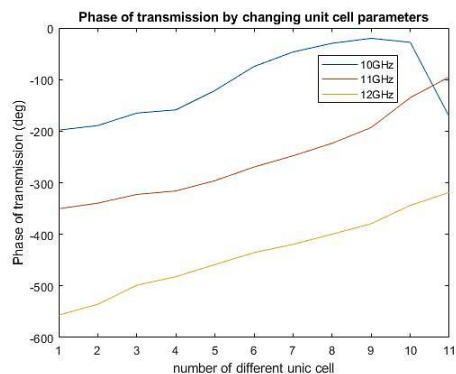
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \sqrt{f^2 + r^2} - f \right) \quad (7)$$

سپس تغییر طول مورد نیاز "بعلاوه"ها مطابق این اختلاف فاز، برای هر سلول واحد محاسبه می‌شود [۹]. برای طراحی عدسی دایره‌های هم مرکزی به شکل (۱۱-الف) در سطح عدسی در نظر می‌گیریم.

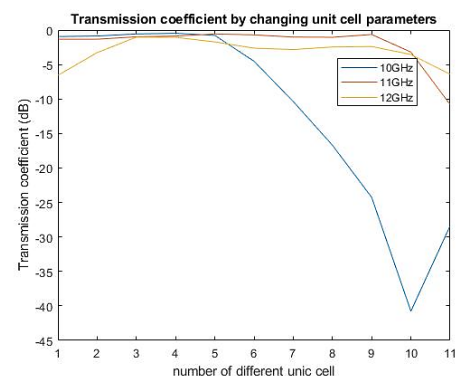
هر دایره شامل سلول واحدی با طول "بعلاوه" مشخص است که در تعداد مورد نیاز در صفحه چیده شده است. جدول (۲) طول "بعلاوه"های داخلی و خارجی را برای هر دایره نشان می‌دهد. نمای کلی عدسی ساخته شده در شکل (۱۱-ب) قابل مشاهده است.



شکل (۱۱): سطح عدسی. (الف): دایره‌های هم فاز روی عدسی (ب): عدسی



(الف)



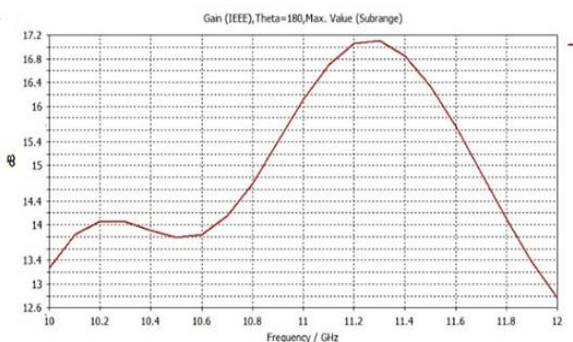
(ب)

شکل (۱۰): میدان عبوری به ازای تغییر طول "بعلاوه"ها برای سه فرکانس ابتدایی، میانی و انتهایی باند کاری، (الف): فاز  $S_{12}$ ، (ب): اندازه  $S_{12}$

همان‌طور که شکل (۱۰) الف نشان می‌دهد به‌ازای تغییر پارامتر طول "بعلاوه"ها، رفتار سه فرکانس ابتدایی، میانی و انتهایی تقریباً مشابه است و به جز آزمایش آخر در  $10$  GHz (که به علت دور بودن از مرکز عدسی تأثیر زیادی روی نتایج ندارد) در بقیه آزمایش‌ها تقریباً موازی هستند. پس اعوجاج در فرکانس‌ها ایجاد نخواهد شد. مطابق شکل (۱۰-ب) اندازه میدان عبوری به‌ازای فرکانس‌های  $11$  GHz و  $12$  GHz با کاهش طول "بعلاوه"ها در حد مطلوبی نگه داشته شده است. تنها به‌ازای فرکانس  $10$  GHz این اندازه با تغییر طول "بعلاوه"ها در سلول واحدهای دور از مرکز کاهش زیادی داشته است. این امر باعث کاهش پهنای باند عدسی خواهد شد. اما همان‌طور که گفته شد به علت این‌که اکثر توان عبوری از عدسی از سلول واحدهای نزدیک به مرکز عدسی می‌گذرد و در این سلول واحدها عبور برای فرکانس  $10$  GHz بالا است، این کاهش عبور برای سلول واحدهای دور از مرکز عدسی، تأثیر زیادی در عملکرد عدسی نخواهد داشت. در نتیجه این سلول واحدهای مختلف به‌ازای

جدول (۲): مقادیر پارامترهای سلول واحدها در سطح عدسی حلقه

مقادیر پارامترهای سلول واحدها در سطح عدسی حلقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
$L_i$	۲	۲	۱/۹۵	۱/۸۸	۱/۷۷	۱/۷	۱/۶	۱/۵۵
$L_o$	۳/۳	۳/۲	۳/۱	۲/۹	۲/۷	۲/۵	۲/۴	۲/۳



شکل (۱۳): بهره بیشینه به ازای فرکانس های مختلف

### ۵. بازسازی RCS با استفاده از عدسی در تصویربرداری

پس از طراحی عدسی، کار تصویربرداری را با استفاده از آن انجام می دهیم. به این منظور جسم "بعلاوه" استفاده شده در بخش دوم را بعد از عدسی قرار می دهیم. برای فاصله جسم و عدسی، فاصله ۴ cm را در نظر می گیریم. با این کار فاصله جسم تا آنتن را از ۲۰ cm به ۱۱ cm رسانده ایم که با این کار، یکی از اهداف این تحقیق یعنی کم کردن فاصله آنتن و جسم محقق شده است.

پس از تصویربرداری و اسکن صفحه ۲۶×۲۶ cm با فاصله گام ۱ cm (مشابه حالت بدون عدسی)، اندازه میدان دریافتی را در صفحه رسم می کنیم.

برای ترکیب نتایج کل باند فرکانسی، مشابه انتگرال روی فرکانس در الگوریتم بازسازی تصویر، میدان های دریافتی را روی فرکانس های ۱۰ GHz تا ۱۲ GHz جمع می کنیم.

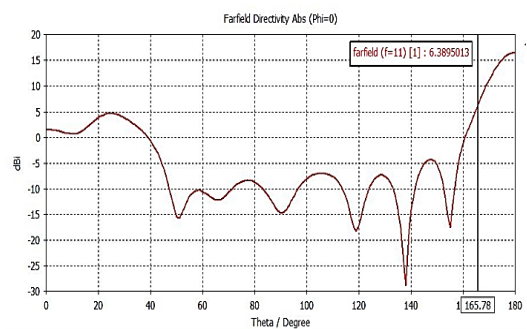
به علت این که صرفاً اندازه میدان های دریافتی رسم شده است (و مرحله بازسازی تصویر حذف شده است)، تعداد نمونه (پیکسل) در صفحه تصویر برابر تعداد آزمایش انجام شده است (۷۲۹ نمونه). این مقدار نسبت به تعداد پیکسل موجود در تصویر بازسازی شده در بخش ۲ (تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه در صفحه) کم است. در نتیجه دامنه نقاط تصویر نسبت به یکدیگر جهش های

نتیجه میدان تشعشعی در صفحه  $\phi=0$  پس از شبیه سازی عدسی در شکل (۱۲) آورده شده است.

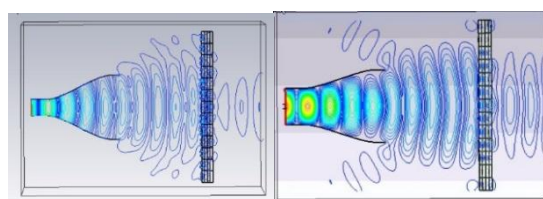
شکل (۱۳) میدان ها را پس از عدسی نشان می دهد. قابل مشاهده است که جبهه موج کروی پس از عبور از عدسی به موج صفحه ای تبدیل شده است که کارکرد مورد نیاز ما برای عدسی محقق شده است.

همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می شود نصف پهنای پرتو -۱۰ dB در صفحه  $\phi=0$  از حدود ۳۷ درجه بدون عدسی (شکل (۲)) به حدود ۱۴ درجه رسیده است. همچنین مطابق شکل (۱۴)، پهنای باند -۱ dB برابر ۷٪ به دست آمده است. از طرف دیگر با توجه به ابعاد عدسی و بهره به دست آمده در فرکانس مرکزی ۱۱ GHz که ۱۶/۵ dB بوده است، بازدهی روزنه مطابق رابطه (۸) حدود ۴۰٪ حاصل شده است.

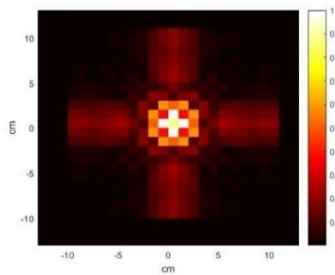
$$\epsilon_{ap} = \frac{G}{D_{max}} D_{max} = \frac{4\pi A}{\lambda_0^2} \quad (8)$$



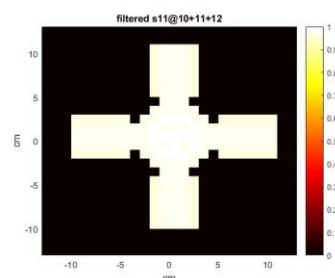
شکل (۱۲): الگوی تشعشعی با حضور عدسی در صفحه  $\phi=0$  فرکانس ۱۰ GHz



شکل (۱۳): جبهه موج قبل و پس از لنز-الف: صفحه  $\phi=0$  -ب: صفحه  $\phi=90$

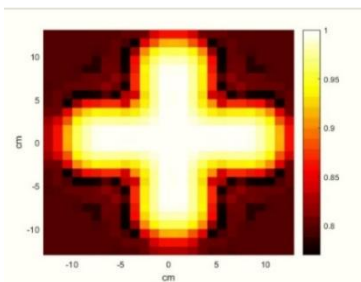


(الف)



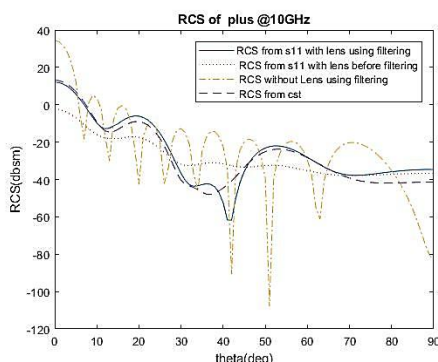
(ب)

شکل (۱۵): اندازه میدان دریافتی در صفحه (الف): قبل از فیلتر شدن، (ب): پس از فیلتر شدن



شکل (۱۶): اندازه میدان دریافتی بدون عدسی پس از فیلتر شدن

RCS بازسازی شده از میدان دریافتی فیلتر شده و RCS بازسازی شده از میدان دریافتی با حضور عدسی قبل از فیلتر شدن و RCS بازسازی شده از میدان های دریافتی فیلتر شده بدون استفاده عدسی و برای مقایسه اثر عدسی، در کنار RCS به دست آمده از CST در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱۷): RCS بازسازی شده از میدان های دریافتی و CST

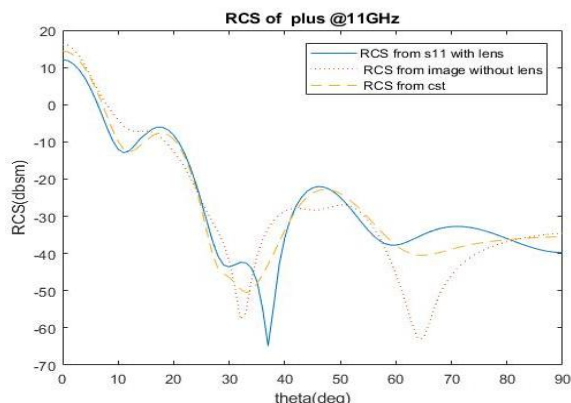
بزرگ و غیر واقعی خواهند داشت. این جهش های بزرگ در شکل (۱۵-الف) قابل مشاهده است. این جهش ها در تصویر باعث کاهش دقت بازسازی RCS و عدم امکان تشخیص دامنه پیک و ناله ها به اندازه واقعی و کاهش این دامنه های تخمین زده شده خواهد شد. بنابراین با یک فیلترینگ به دنبال کم کردن این جهش های ناگهانی دامنه میدان و نرم کردن این تغییرات و بهبود دقت بازسازی RCS هستیم.

از طرف دیگر در بعضی نقاط تصویر دامنه خیلی کمی وجود دارد که ناشی از زمینه تصویربرداری یا خطاهای تصویربرداری است که باید تا حد امکان حذف شود. برای این دو منظور ابتدا قرار دادن یک آستانه خطاهای پس زمینه را حذف می کنیم. به این شکل که در نقاط تصویر هر نقطه ای که اندازه میدان دریافتی (هنجار<sup>۱</sup> شده به بزرگ ترین مقدار این میدان در صفحه تصویر) زیر ۰/۱ باشد را صفر می کنیم. سپس از تابعی استفاده می کنیم که مقادیر بالا (نزدیک یک) که شامل جواب دقیق هستند را به یک دیگر نزدیک کند و به اصطلاح پاسخ را نرم کند. برای این مقصود باید نمودار تابع مدنظر در این حدود خطی با شیب کم باشد (نزدیک به خط افقی) تا داده های تصویر را به یک دیگر نزدیک کند. به این منظور از رادیکال با فرجه های بالا استفاده می کنیم. هرچه فرجه بالاتر برود این نرم شدن جواب بیشتر و میدان ها در صفحه به هم نزدیک تر می شوند. اگر این فرجه از حدی بیشتر شود اثر پراکندگی از لبه را در میدان دریافتی در صفحه تقریباً حذف می کند و باعث ایجاد صفرهای عمیق در RCS خواهد شد. برای تعیین فرجه مناسب برای رادیکال گیری پس از انجام آزمایش های مختلف فرجه ۱۶ انتخاب شد.

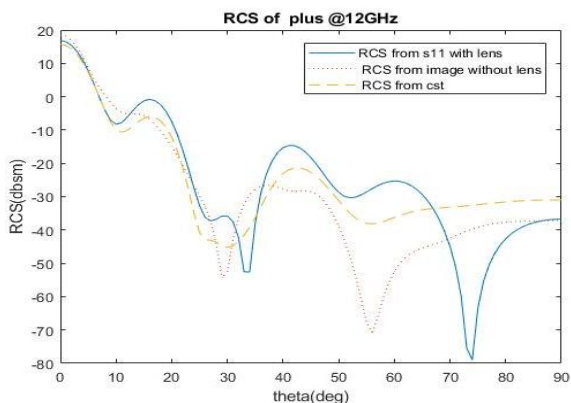
شکل (۱۵) اندازه میدان دریافتی را قبل و بعد از فیلتر شدن نشان می دهد.

همان طور که از شکل (۱۵) قابل ملاحظه است اندازه میدان دریافتی پس از فیلتر شدن شباهت زیادی با شکل اصلی دارد. برای مقایسه با حالت بدون عدسی، اندازه میدان در حالت بدون عدسی پس از عبور از همان فیلتر در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مشاهده می شود که اندازه میدان دریافتی با حضور عدسی به علت باریک شدن پهنای پرتو نسبت به حالت بدون عدسی از قابلیت تفکیک بهتری نسبت به پس زمینه برخوردار است. به همین علت حاشیه های جسم هدف به خوبی بازسازی شده است و این دقت بازسازی RCS را به میزان زیادی بالا خواهد برد.

<sup>۱</sup> Normalize



(ب)



(ج)

شکل (۱۸): مقایسه RCS بازسازی شده در سه حالت با عدسی،

بدون عدسی و دقیق با CST، (الف): ۱۰ GHz، (ب): ۱۱ GHz،

(ج): ۱۲ GHz

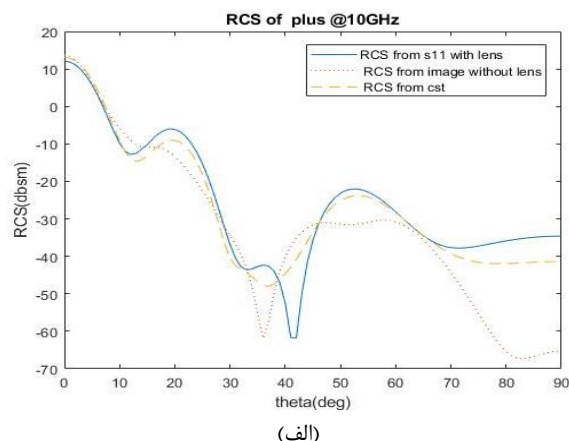
## ۶. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در شکل (۱۸) می‌بینیم RCS بازسازی‌شده با استفاده از عدسی نسبت به RCS بازسازی‌شده از تصویر (با تعداد آزمایش برابر)، دقت بیشتری دارد و بیشتر به RCS به‌دست آمده از CST که جواب دقیق است، شبیه شده است. همچنین اثر بعضی از صفرهای بزرگ که در RCS بازسازی‌شده از تصویر وجود داشته است در RCS بازسازی‌شده از میدان دریافتی حذف شده که علت این امر بالاتر بودن کیفیت تصویر مورد استفاده در الگوریتم بازسازی RCS در حالت با حضور عدسی است. البته هم‌چنان در فرکانس ۱۲ GHz در زاویه حدود ۷۵ درجه این صفر بزرگ وجود دارد که ناشی از نبودن اثر پراکندگی از لبه به طول کامل در میدان دریافتی است (که علت این امر می‌تواند کوچک بودن صفحه اسکن شده توسط آنتن باشد). در نتیجه با استفاده از عدسی توانستیم کیفیت بازسازی RCS را بالا ببریم. علاوه بر آن،

مشاهده می‌شود که RCS بازسازی‌شده از میدان دریافتی با حضور عدسی شباهت زیادی با RCS دقیق دارد. جز در زاویه حدود ۴۰ درجه که دارای صفر عمیقی است که علت این امر عدم وجود اثر پراکندگی از لبه به‌طور کامل در تصویر است. برای رفع این مشکل می‌توان صفحه اسکن را بزرگ‌تر کرد.

RCS بازسازی‌شده از میدان دریافتی با حضور عدسی و قبل از فیلتر شدن همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است نتوانسته دامنه پیک و ناله‌ها را به‌اندازه واقعی بازسازی کند که علت این امر همان‌طور که گفته شد جهش غیر واقعی دامنه در میدان‌های دریافتی است. این جهش‌ها و مخصوصاً کاهش غیر واقعی دامنه در کناره‌های جسم باعث کاهش دامنه پیک و ناله‌ها و به‌طور کلی باعث کمتر تخمین زدن RCS شده است. اما پس از فیلتر کردن میدان دریافتی، نزدیک شدن این دامنه میدان‌ها به یک‌دیگر و نرم‌تر شدن تغییرات در پیکسل‌ها و شبیه‌تر شدن میدان دریافتی به شکل اصلی باعث افزایش دامنه پیک و ناله‌ها در RCS تخمینی شده و دقت بازسازی RCS به میزان زیادی افزایش یافته است. اما RCS به‌دست آمده از میدان فیلتر شده بدون استفاده از عدسی دارای نوسان‌های زیادی است که علت این امر مطابق شکل (۱۶) عدم تفکیک مناسب جسم نسبت به پس‌زمینه و وجود پس‌زمینه با دامنه بالا است. در نتیجه استفاده از عدسی توانسته است با باریک‌کردن پهنای پرتو کیفیت بازسازی RCS را به میزان زیادی بهبود ببخشد.

برای مقایسه نتیجه استفاده از عدسی، RCS بازسازی شده از تصویر شکل (۳-الف) و همچنین RCS بازسازی شده از میدان‌های دریافتی (شکل (۱۴-ب)) که هر دو آزمایش صفحه ۲۶×۲۶ cm را با گام ۱ cm اسکن کرده‌اند را برای فرکانس ۱۰ GHz و ۱۱ GHz و ۱۲ GHz در شکل (۱۸) آورده شده است.



(الف)

- [8] M. R. Chaharmir, S. Member, J. Shaker, and S. Member, "Broadband Transmitarray Antenna Design Using Polarization-Insensitive Frequency Selective Surfaces," no. c, 2015.
- [9] A. H. Abdelrahman, S. Member, A. Z. Elsherbeni, F. Yang, and S. Member, "Transmission Phase Limit of Multilayer Frequency-Selective Surfaces for Transmitarray Designs," vol. 62, no. 2, pp. 690–697, 2014.
- [10] C. G. M. Ryan et al., "A Wideband Transmitarray Using Dual-Resonant Double Square Rings," vol. 58, no. 5, pp. 1486–1493, 2010.
- [11] A. H. Abdelrahman, A. Z. Elsherbeni, F. Yang, and A. U. C. Element, "High-Gain and Broadband Transmitarray Antenna Using Triple-Layer Spiral Dipole Elements," vol. 13, pp. 1288–1291, 2014.
- [12] H. Li, G. Wang, H. Xu, and T. Cai, "X-Band Phase-Gradient Metasurface for High-Gain Lens Antenna Application," no. c, 2015.
- [13] L. Huang et al., "Bi-Layer Metasurfaces for Dual and Broadband Optical Antireflection," 2017.
- [14] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, Radar Cross Section Second Edition.

حجم پردازشی برای بازسازی RCS بسیار کمتر شد و همچنین فاصله تصویربرداری به میزان زیادی کم شد که برای ممکن بودن پیاده‌سازی سامانه در آزمایشگاه ضروری است.

## ۷. مراجع

- [1] C. Larsson, "Nearfield RCS Measurements of Full Scale Targets Using ISAR," 2014.
- [2] D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, "Near Field Imaging at Microwave and Millimeter Wave Frequencies," pp. 0–3, 2007.
- [3] A. Broquetas, L. Jofre, and A. Cardama, "Spherical Wave Near-Field Imaging and Radar Cross-Section Measurement," vol. 46, no. 5, pp. 730–735, 1998.
- [4] D. Hristo and A. J. Herben, "Millimeter- Wave Fresnel-Zone Plate Lens and Antenna," vol. 43, no. 12, 1995.
- [5] N. Gagnon, A. Petosa, and D. A. McNamara, "Thin microwave phase-shifting surface lens antenna made of square elements," vol. 46, no. 5, pp. 9–11, 2010.
- [6] L. C. Gunderson and G. T. Holmes, "Microwave Luneburg Lens," no. 5, pp. 801–804, 1967.
- [7] H. Chen, "A review of metasurfaces: Physics and tions," no. May 2016.



---

## Design and Implementation of a Wideband Flat Lens in Near Field RADAR Cross Section Reconstruction

I. Akbari, J. Rashe Mohassel<sup>\*</sup>, M. Dehmollaian

University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 25/11/2019, Accepted: 01/03/2020)

### Abstract

Estimating RCS by near field methods has achieved great significance because of noticeable cost reductions. In this research we pursue RCS reconstruction by near field imaging with small processing load in laboratory conditions. A 10×10 cm meta surface lens in the 10-12 GHz frequency is designed and simulated for estimation of RCS, using near field imaging method which obtains the aperture efficiency and -1dB bandwidth of 32% and 7% respectively. This microwave lens is able to reduce the beam width by half. In this method, we ignore the image reconstruction step and use the obtained fields directly on a plane to estimate the RCS, causing a reduction in the volume of processing. The results show improvement in the estimated RCS, in addition to reducing the experiment distance, thus ensuring the possibility of implementation in the laboratory.

**Keywords:** Near Field Imaging, RADAR Cross Section, Microwave Lens, Meta surface

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: jrashed@ut.ac.ir