



گزارش نهایی رادار

نویسنده: نسرین کریمی

شماره دانشجویی: ۴۰۱۴۴۸۱۴۷

جناب آقای دکتر مهرشاهی

اصول سیستم های رادار – پاییز ۱۴۰۲

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست شکل ها	۲
فصل ۱- آشنایی با رادار های ردیابی	۴
۱-۱- ردیابی زاویه	۴
فصل ۲- ردیابی تک پالس	۵
۲-۱- مقایسه دامنه در تک پالس	۵
۲-۲- مقایسه فاز در تک پالس	۹
فصل ۳- طراحی مبتنی بر مدل و شبیه سازی سیستم ردیابی مونو پالس	۱۳
۳-۱- مقدمه	۱۳
۳-۱-۱- تئوری یک سیستم مونو پالس	۱۴
۳-۱-۲- نتایج شبیه سازی زیرسیستم	۱۵
۳-۲- مدل شبیه سازی سیستم	۱۷
۳-۳- نتایج شبیه سازی	۱۹
۳-۴- نتیجه گیری	۲۳
۳-۵- کد برنامه	۲۴
فصل ۴- طراحی آنتن رادار ردیاب مونوپالس S-Band	۲۹
۴-۱- ایجاد هندسه آرایه آنتن	۲۹
۴-۲- ایجاد پیچ آنتن	۳۱
۴-۳- ساخت آرایه آنتنی	۳۱
۴-۴- ایجاد آنتن PCB از هندسه	۳۳
۴-۵- آنالیز آنتن	۳۴
4-6- محاسبه s – parameter	۳۵
۴-۷- رسم پترن تشعشی	۳۶
۴-۸- نتیجه گیری	۳۷
منابع	۳۸

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

شکل ۱-۲	پترن آنتن مونوپالس	۶
شکل ۲-۲	یک مقایسه کننده تک پالس برای تولید سیگنال های سیگما و دلتا	۶
شکل ۳-۲	پیکربندی هیبریدی برای تولید سیگنال های کانال سیگما و دلتا	۷
شکل ۴-۲	بلوک دیاگرام یک رادار تک پالس مقایسه دامنه دو مختصات	۸
شکل ۵-۲	بلوک دیاگرام یک رادار ردیابی تک پالس مقایسه فاز	۹
شکل ۶-۲	مقایسه فاز تک مختصات مونوپالس	۱۰
شکل ۷-۲	مقایسه فاز ردیاب مونوپالس نیم زاویه	۱۰
شکل ۱-۳	بلوک دیاگرام سیستم تک پالس	۱۴
شکل ۲-۳	هندسه آنتن	۱۵
شکل ۳-۳	پترن آنتن ارسال	۱۶
شکل ۴-۳	پترن آنتن دریافت	۱۶
شکل ۵-۳	کد برای محاسبه پترن	۱۷
شکل ۶-۳	مدل سیستم پیشنهادی	۱۸
شکل ۷-۳	مدل با بلوک های شیفتر فاز	۱۹
شکل ۸-۳	پترن جمع و تفاوت برای مدل	۲۱
شکل ۹-۳	هندسه کوپلر rat-race	۲۲
شکل ۱۰-۳	کد برای تولید فایل های s3p و s4p	۲۲
شکل ۱۱-۳	مدل با بلوک های پارامترهای s برای ویلکینسون و کوپلر rat-race	۲۳
شکل ۱-۴	نمای بالایی آنتن	۲۹
شکل ۲-۴	کوپلر rat-race	۳۰
شکل ۳-۴	آرایه پچ میکرواستریپ	۳۲
شکل ۴-۴	ایجاد آنتن PCB از هندسه	۳۴
شکل ۵-۴	ضریب انعکاس	۳۵
شکل ۶-۴	پترن گین	۳۶
شکل ۷-۴	پترن تشعشعی	۳۷



فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳-۱ مجموعه، آزمون و مقادیر اختلاف ارتفاع.....	۲۰

آشنایی با رادارهای ردیابی

رادارهای ردیاب اصطلاحی است که به رادارهایی اطلاق می‌شود که موقعیت مکانی را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌هایی را ارائه می‌دهند که ممکن است برای تعیین مسیر هدف و پیش‌بینی موقعیت آینده، در محدوده، زاویه ارتفاع، زاویه آزیموت و گاهی اوقات تغییر فرکانس داپلر مورد استفاده قرار گیرند. رادارهای ردیابی می‌توانند پیوسته یا گسسته باشند مانند رادارهای اسکن مسیری (TWS). ردیابی پیوسته، داده‌های ردیابی مداوم را در یک هدف خاص فراهم می‌کند. از سوی دیگر، رادارهای TWS حجم جستجوی معینی را اسکن می‌کنند و یک یا چند هدف را روشن می‌کنند، به طور دوره‌ای اطلاعات موقعیت مکانی و نرخ برد را استخراج می‌کنند و سپس آن را در یک کامپیوتر دیجیتال با استفاده از فیلترهای هموارسازی و پیش‌بینی پیچیده پردازش می‌کنند.

رادار ردیاب از یک پرتو مداد مانند برای یافتن هدف خود قبل از اینکه بتواند ردیابی کند، استفاده می‌کند. به همین دلیل است که یک رادار جستجوی جداگانه برای تسهیل دستیابی به هدف توسط ردیاب مورد نیاز است. رادار جستجو یا رادار اکتساب، با ارائه مختصات که در آن اهداف قرار است پیدا شوند، اهداف را برای رادار ردیابی تعیین می‌کند. رادار ردیاب با انجام جستجوی محدود در ناحیه مختصات هدف تعیین شده، هدف را به دست می‌آورد.

کاربردهای عمده رادارهای ردیاب کنترل سلاح و ابزار دقیق برد موشک، کنترل ترافیک هوایی، کنترل توپخانه ضد هوایی و کنترل ماهواره‌ای است. در همه کاربردها به طور کلی به دقت بالایی و پیش‌بینی دقیق موقعیت آینده هدف نیاز است.

۱-۱- ردیابی زاویه

تعیین دقیق موقعیت هدف یکی از وظایف مهم سامانه‌های راداری است. با این حال، زمانی که تشخیص دقیق موقعیت زاویه‌ای هدف مورد نظر باشد، از چندین روش استفاده می‌شود. از جمله آنها می‌توان به لوبینگ متوالی، اسکن مخروطی و تک پالس اشاره کرد. ردیابی زاویه به ایجاد اندازه‌گیری‌های پیوسته موقعیت زاویه‌ای در مختصات آزیموت و ارتفاع مربوط می‌شود. هر یک از این روش‌ها شامل استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از آنتن‌های آفست برای ایجاد سیگنال‌های مربوط به خطاهای زاویه‌ای بین موقعیت هدف و محور بینایی آنتن ردیابی است. سیگنال خطای حاصل نشان می‌دهد که هدف چقدر از محور پرتو اصلی منحرف شده است. پرتو آنتن در رادار ردیابی زاویه به طور مداوم توسط یک مکانیزم سروومکانیسمی که توسط سیگنال خطا فعال می‌شود در یک زاویه قرار می‌گیرد تا سیگنال خطای صفر تولید کند. سیگنال خطا باید تابعی خطی از زاویه انحراف باشد.

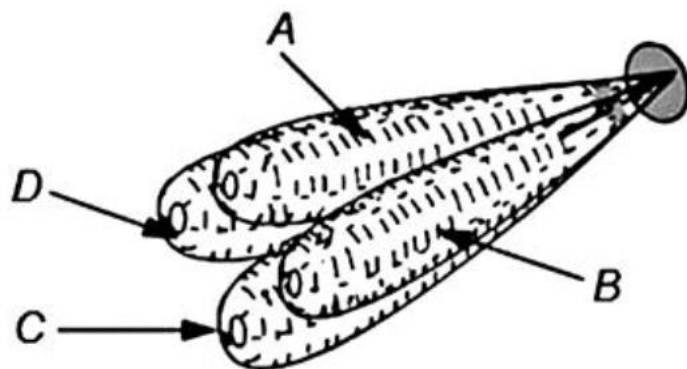
فصل ۲- ردیابی تک پالس

نوسانات در سیگنال اکو می تواند اثرات جدی در برخی کاربردها داشته باشد تا به شدت دقت اسکن مخروطی و رادارهای ردیابی لوبینگ متوالی را محدود کند که نیاز به پالس های زیادی برای پردازش در استخراج سیگنال خطا دارند. اگر اندازه گیری زاویه ای بر اساس یک پالس انجام شود و نه تعداد زیادی، این اثرات بر دقت ردیابی را می توان حذف کرد. بیش از یک پرتو آنتن به طور همزمان در این روش ها استفاده می شود، برخلاف اسکن مخروطی یا رادار ردیابی لوبی متوالی، که از یک پرتو آنتن بر اساس زمان مشترک استفاده می کند. زاویه ورود سیگنال اکو را می توان در یک سیستم تک پالس با اندازه گیری دامنه نسبی سیگنال اکو دریافتی در هر پرتو تعیین کرد.

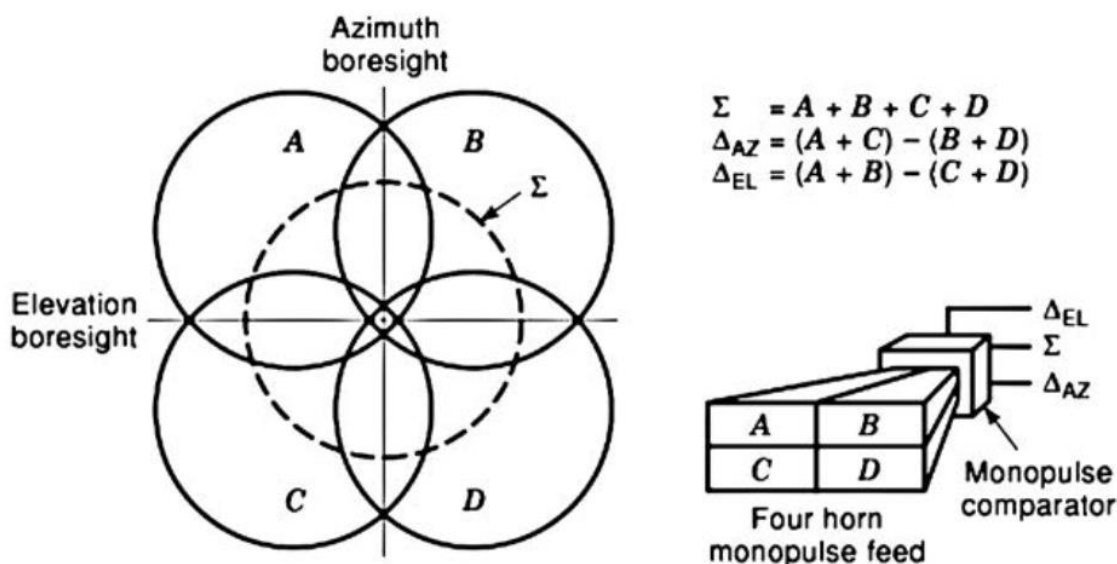
سیستم های ردیابی که از یک پالس برای استخراج تمام اطلاعات لازم برای تعیین خطاهای زاویه ای استفاده می کنند، سیستم های تک پالس نامیده می شوند. خطاهای زاویه ای در این سیستم ها با استفاده از تک پالس مقایسه دامنه یا تک پالس مقایسه فاز به دست می آیند. از مزایای می توان به راندمان بیشتر اندازه گیری، سرعت داده بالاتر و کاهش آسیب پذیری برای به دست آوردن وارونگی و پارازیت AM اشاره کرد. همچنین، ردیابی تک پالس دقیق تر است، و مستعد ابتلا به ناهنجاری های لوبی نیست.

۲-۱- مقایسه دامنه در تک پالس

تولید خطاهای مسیر زاویه ای در ردیابی زاویه تک پالس مقایسه دامنه مشابه با لوب است به این معنا که پرتوهای آنتن متعدد و دامنه نسبی پژواک در هر پرتو برای تعیین خطای زاویه ای مورد نیاز است. تفاوت این است که بیم ها به طور همزمان تولید می شوند نه متوالی. روش های مختلفی برای ردیابی تک پالس وجود دارد که فقط برخی از آنها از چهار پرتو استفاده می کنند. ما بحث های خود را فقط به چهار پرتو محدود می کنیم. رادارهای ردیاب تک پالس می توانند از آنتن های بازتابنده و همچنین آنتن های آرایه فازی برای تولید چهار پرتو آنتن تا حدی همپوشانی استفاده کنند. در مورد آنتن های بازتابی، یک تغذیه ترکیبی از چهار آنتن شاخ در کانون سهموی قرار می گیرد. الگو، در مورد سیگنال هایی که از خارج از محور می رسند، با مقدار و جهت آفست زاویه ای سیگنال از محور بازتابنده تعیین می شود. فواصل بین بیم ها کم است و فازهای چهار سیگنال A، B، C و D در چند درجه از یکدیگر قرار دارند. فرض بر این است که فازها برای تمام اهداف عملی یکسان هستند. ردیابی تک پالس مقایسه دامنه با آنتن های آرایه فازی پیچیده تر از بازتابنده است.



شکل ۱-۲ پترن آنتن مونوپالس

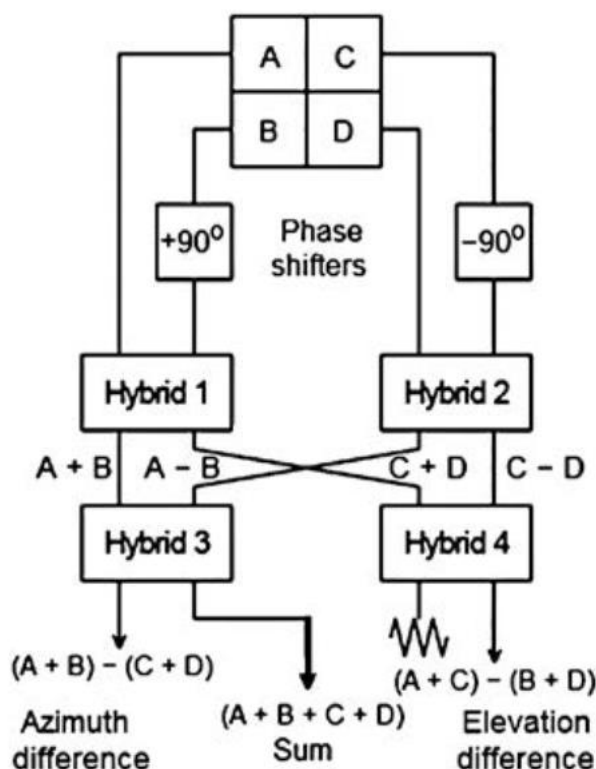


شکل ۲-۲ یک مقایسه کننده تک پالس برای تولید سیگنال های سیگما و دلتا

یک الگوی آنتن معمولی یک رادار ردیابی تک پالس با چهار پرتو که چهار موقعیت پرتو را نشان می دهد در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. هنگامی که از جلو مشاهده می شود، الگوهای بیم ها مقطعی هستند که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. هر چهار فید الگوی جمع (سیگما) را تولید می کنند. الگوی تفاوت (دلتا) در یک صفحه با گرفتن مجموع دو فید مجاور و کم کردن آن از مجموع سایر فیدهای مجاور تشکیل می شود. الگوی تفاوت در صفحات متعامد با اضافه کردن تفاوت های جفت های متعامد مجاور به دست می آید.

همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، در مجموع چهار اتصال ترکیبی کانال مجموع، کانال اختلاف آزیموت و کانال اختلاف ارتفاع را ایجاد می کنند. پردازش تک پالس شامل محاسبه مجموع Σ و دو تفاوت Δ (یکی برای آزیموت و دیگری برای ارتفاع) الگوهای آنتن است. الگوهای تفاوت بزرگی خطای زاویه ای را ارائه می دهند، در حالی که الگوی مجموع اندازه گیری محدوده را ارائه می دهد و همچنین به

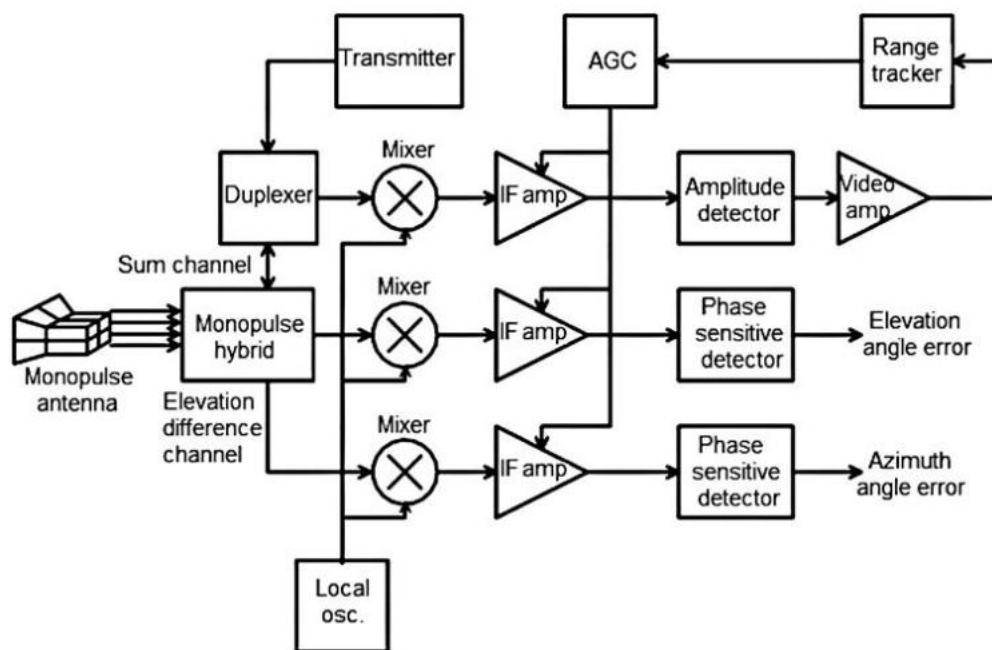
عنوان مرجع برای استخراج علامت سیگنال خطا استفاده می شود. الگوهای تفاوت Δ_{EL} و Δ_{AZ} در دریافت با استفاده از یک مدار هیبریدی مایکروویو به نام مقایسه کننده تک پالس تولید می شوند.



شکل ۲-۳ پیکربندی هیبریدی برای تولید سیگنال های کانال سیگما و دلتا

همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، هیبریدها اضافه و تفریق فاز سیگنال RF را برای تولید سیگنال های خروجی انجام می دهند. اگر هدفی روی بارسیت باشد، دامنه سیگنال های دریافتی در چهار کانال (A, B, C, D) برابر خواهد بود و بنابراین سیگنال های اختلاف صفر خواهند بود.

با این حال، هنگامی که هدف از محدوده دید خارج می شود، دامنه سیگنال های دریافتی متفاوت خواهد بود و سیگنال اختلاف علامت و بزرگی متناسب با خطای افزایش دامنه با افزایش جابجایی هدف از محور آنتن به خود می گیرد. سیگنال های اختلاف نیز 180° درجه در فاز از یک سمت مرکز به سمت دیگر تغییر می کنند. مجموع هر چهار خروجی بوق، ورودی ویدئو را به سیستم ردیابی برد ارائه می کند و سطح ولتاژ AGC را برای کنترل بهره خودکار تعیین می کند.



شکل ۲-۴ بلوک دیاگرام یک رادار تک پالس مقایسه دامنه دو مختصات.

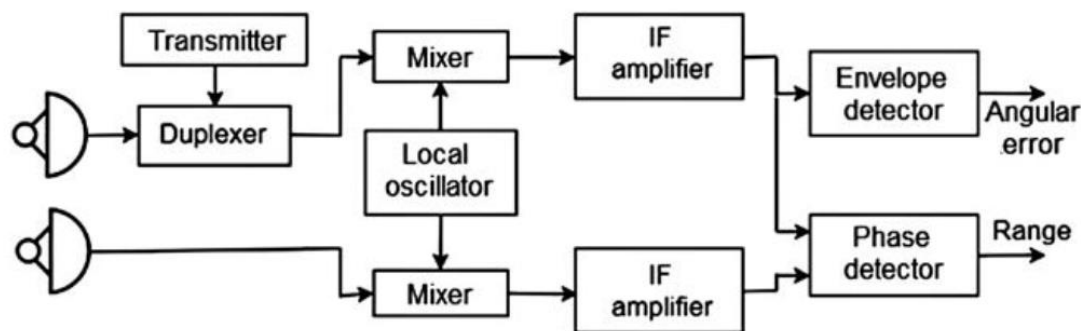
برای زوایای کوچک، نسبت دامنه های نسبی بازده هدف از مجموع و مجموع کانال های اختلاف منجر به ولتاژی متناسب با خطای زاویه ای می شود. این نسبت را می توان با استفاده از یک مدار AGC به دست آورد که روی دو کانال متفاوت کار می کند و توسط خروجی مجموع کانال شناسایی شده از دروازه ردیابی یا با تقسیم در یک ردیاب دیجیتال هدایت می شود. آشکارسازهای فاز، سیگنال های خطای آزیموت و ارتفاع را با استفاده از سیگنال IF کانال مجموع به عنوان مرجع برای تولید دو ولتاژ خطا، تحلیل می کنند. اینها همچنین باید دارای دریچه برد باشند تا اندازه آنها نشان دهنده سیگنال های خطا از هدف صحیح باشد.

بلوک دیاگرام یک رادار تک پالس مقایسه دامنه با پیش بینی استخراج سیگنال های خطا در هر دو سمت در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. اتصالات ترکیبی کانال مجموع، کانال اختلاف آزیموت و کانال اختلاف ارتفاع را ایجاد می کنند. دو آشکارساز حساس به فاز برای استخراج اطلاعات خطای زاویه ای، یکی برای آزیموت و دیگری برای ارتفاع، گنجانده شده است، در حالی که اطلاعات محدوده از خروجی کانال مجموع استخراج می شود.

اختلاف فاز بین کانال ها باید تا ۲۵ درجه یا بهتر حفظ شود. AGC برای حفظ یک سیستم سروو کنترل حلقه بسته پایدار برای ردیابی زاویه مورد نیاز است. AGC در یک رادار تک پالس با استفاده از یک ولتاژ متناسب با مجموع کانال خروجی IF برای کنترل بهره هر سه کانال گیرنده به دست می آید.

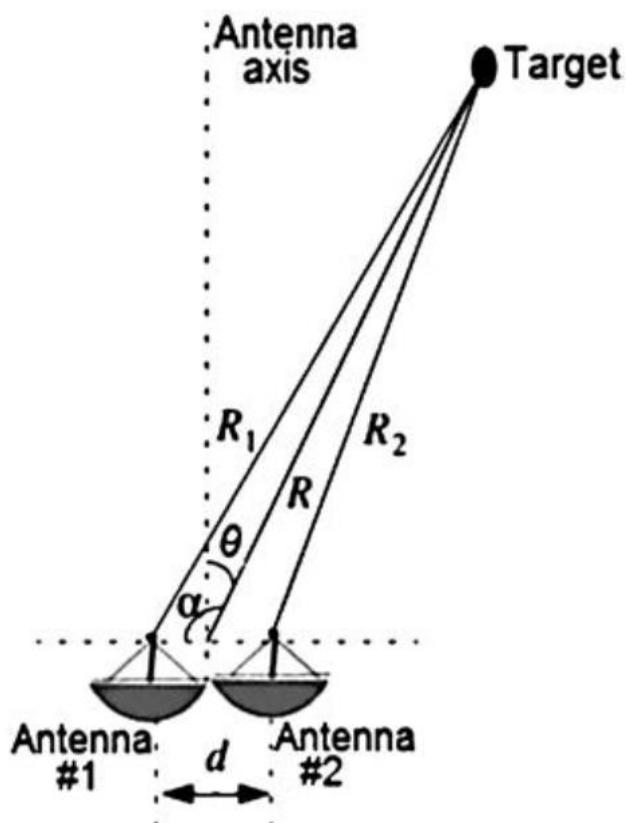
۲-۲- مقایسه فاز در تک پالس

تک پالس مقایسه فاز با تک پالس مقایسه دامنه تفاوت دارد زیرا فاز سیگنال دریافتی در عناصر آنتن مختلف خطاهای زاویه ای را تعیین می کند. تفاوت عمده این است که چهار سیگنال تولید شده در تک پالس مقایسه دامنه دارای فازهای مشابه اما دامنه های متفاوت هستند، اما در تک پالس مقایسه فاز؛ سیگنال ها دامنه های یکسان اما فازهای متفاوتی دارند. رادار ردیابی تک پالس مقایسه فاز از آرایه ای از حداقل دو آنتن استفاده می کند که با فاصله ای از یکدیگر جدا شده اند. آرایه های جداگانه برای آزمون و ارتفاع مورد نیاز است، با یک رادار ردیابی تک پالس مقایسه کامل فاز که حداقل به چهار آنتن نیاز دارد. فازهای سیگنال های دریافت شده توسط عناصر با هم مقایسه می شوند. اگر محور آنتن به سمت هدف باشد، فازها برابر هستند. اگر نه، آنها متفاوت هستند. مقدار و جهت اختلاف فاز، بزرگی و جهت خطا است و برای راه اندازی آنتن استفاده می شود.



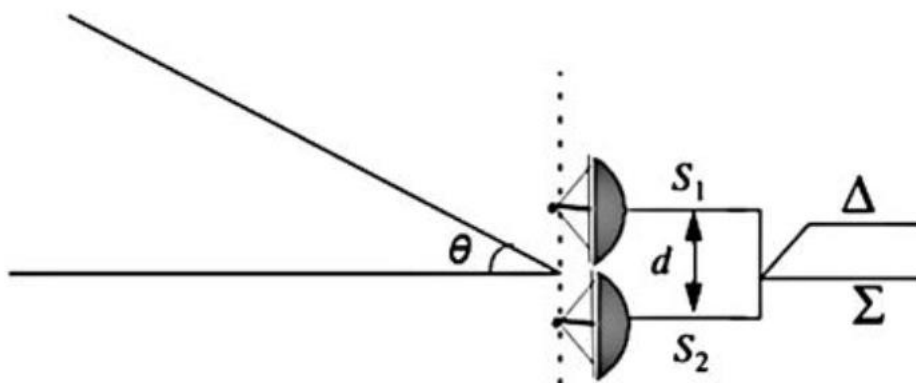
شکل ۲-۵ بلوک دیاگرام یک رادار ردیابی تک پالس مقایسه فاز

شکل ۲-۵ آرایه آنتن دو عنصر و گیرنده را برای یک ردیابی مختصات زاویه ای توسط تک پالس مقایسه فاز نشان می دهد. هر گونه تغییر فازی که در مراحل میکسر و تقویت کننده IF رخ می دهد باعث تغییر در بارسیت سیستم می شود. تجزیه و تحلیل ریاضی در به دست آوردن اختلاف فاز، آنتن آرایه دو عنصری را برای هر یک از آزمون و ارتفاع فرض می کند، همانطور که توسط نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ مقایسه فاز تک مختصات مونوپالس

شکل ۲-۶ که شامل دو آنتن است که با فاصله d از هم جدا شده اند. هدف در محدوده R قرار دارد و در مقایسه با جداسازی آنتن بزرگ فرض می شود.



شکل ۲-۷ مقایسه فاز ردیاب مونوپالس نیم زاویه

LOS به هدف یک زاویه θ را نسبت به عمود بر خطی که به دو آنتن می پیوندد ایجاد می کند. بنابراین، از شکل ۲-۷ نتیجه می گیرد که فاصله آنتن ۱ تا هدف را می توان با اعمال قانون کسینوس بدست آورد.

$$R_1^2 = R^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 - 2R\left(\frac{d}{2}\right)\cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-2)$$

$$= R^2 + \frac{d^2}{4} + dR\sin\theta.$$

$$R_1 = R\left[1 + \left(\frac{d}{2R}\right)^2 + \frac{d}{R}\sin\theta\right]^{1/2} \quad (2-2)$$

$$\approx R\left[1 + \frac{d}{R}\sin\theta\right]^{1/2}.$$

$$R_1 \approx R\left(1 + \frac{d}{2R}\sin\theta\right) = R + \frac{d}{2}\sin\theta. \quad (3-2)$$

$$R_2 = R - \frac{d}{2}\sin\theta. \quad (4-2)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) = \frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta \quad (5-2)$$

که در آن λ طول موج است. اختلاف فاز $\Delta\phi$ برای تعیین موقعیت زاویه ای هدف استفاده می شود. برای $\theta = 0$ ، هدف روی محور آنتن ها خواهد بود. برای زوایای کوچک، $\sin\theta \approx \theta$ ، اختلاف فاز $\Delta\phi$ تابع خطی خطای زاویه ای است و ممکن است برای قرار دادن آنتن با استفاده از سیستم کنترل سروو استفاده شود.

معایب تک پالس مقایسه فاز در مقایسه با تک پالس مقایسه دامنه، دشواری نسبی در حفظ خطاها بسیار پایدار و دشواری در ارائه مخروطی روشنایی آنتن مورد نظر برای سیگنال های مجموع و اختلاف است. مسیرهای طولانی تر از خروجی آنتن به مدار مقایسه کننده، سیستم مقایسه فاز را به دلیل بارگذاری یا افتادگی مکانیکی، گرمایش دیفرانسیل و غیره مستعد تغییر در گذرگاه می کند. تکنیکی که پایداری آینده نگری بیشتر را فراهم می کند، دو خروجی آنتن را در RF با مدار غیرفعال ترکیب می کند همانطور که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. سپس ممکن است این سیگنال ها مانند یک گیرنده مقایسه دامنه معمولی پردازش شوند. سیگنال های مجموع مختصات و تفاضل به ترتیب توسط اینها داده می شوند:

$$\Sigma(\theta) = S_1 + S_2 \quad (6-2)$$

$$\Delta(\theta) = S_1 - S_2$$

که در آن S_1 و S_2 سیگنال های دو عنصر آنتن هستند. از آنجایی که S_1 و S_2 دامنه یکسانی دارند اما در فازها با $\Delta\phi$ متفاوت هستند، می توانیم بنویسیم:



$$S_1 = S_2 e^{-j\Delta\phi}. \quad (7-2)$$

$$\Sigma(\theta) = S_2(1 + e^{-j\Delta\phi}),$$

$$\Delta(\theta) = S_2(1 - e^{-j\Delta\phi}).$$

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{1 - e^{-j\Delta\phi}}{1 + e^{-j\Delta\phi}} = j \tan\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right).$$

$$\left| \frac{\Delta}{\Sigma} \right| = \tan\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right). \quad (8-2)$$

این نوع ردیاب مونو پالس مقایسه فاز گاهی اوقات ردیاب نیمه زاویه نامیده می شود.

فصل ۳- طراحی مبتنی بر مدل و شبیه سازی سیستم ردیابی مونس پالس

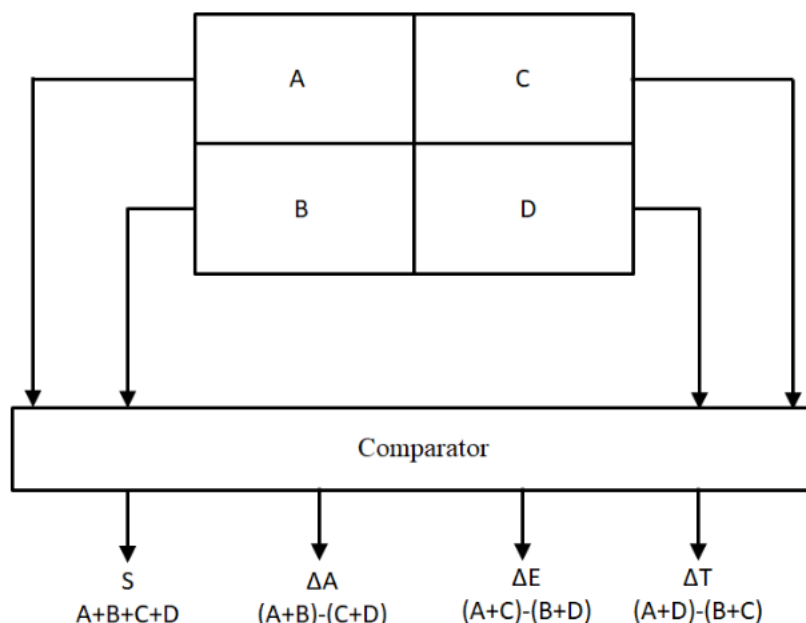
اصل تک پالس در بسیاری از کاربردهای رادار برای تخمین موقعیت هدف در فضا با محاسبه خطا در جهت آزمون و ارتفاع استفاده می شود. ردیابی تک پالس را می توان با استفاده از پیکربندی های مختلف آنتن ها و مقایسه کننده ها به دست آورد. پیکربندی های مختلفی را می توان بر اساس الزامات مورد استفاده قرار داد، اما یکپارچگی آنتن و مقایسه کننده برای دستیابی به نتایج مطلوب باید کامل باشد. در این گزارش، MATLAB®، Simulink®، و RF Blockset™ برای ساخت مدلی برای یک سیستم ردیابی تک پالس با ادغام آنتن فرستنده، آنتن گیرنده و مقایسه کننده استفاده شده است. این مدل را می توان بر روی آنتن ها و مقایسه کننده های مختلف آزمایش کرد و طراحی آن را برای به دست آوردن نتایج دلخواه بهینه کرد. یکپارچه سازی آنتن و مقایسه مستقیم روی سخت افزار منجر به عدم تطابق دامنه و فاز می شود که می تواند خروجی ها را تغییر دهد. از این رو، شبیه سازی مدل یکپارچه برای به دست آوردن نتایج دقیق، پیش بینی عدم تطابق در فاز، و ابداع یک اقدام اصلاحی قبل از ساخت سخت افزار مهم است. آنتن ها و کوپلر ها به ترتیب در TM Antenna Toolbox و TM RF PCB Toolbox به عنوان عناصر کاتالوگ موجود هستند.

۳-۱- مقدمه

سیستم های راداری مدرن از تکنیک های زیادی برای ردیابی هدف استفاده می کنند و یکی از این تکنیک ها مونس پالس نام دارد. زیرسیستم های مهم برای دستیابی به تک پالس، کانال های آنتن، مقایسه کننده و گیرنده RF هستند. آنتن تک پالس دارای چهار ربع است و توان دریافتی از هر یک از ربع ها به مقایسه کننده داده می شود که مجموع، اختلاف زاویه و اختلاف ارتفاع را نشان می دهد. پیکربندی های آنتن و مقایسه کننده زیادی وجود دارد که می توان از آنها برای دستیابی به نتیجه مطلوب استفاده کرد. عدم تطابق فاز در آنتن گیرنده می تواند عمق صفر را در آزمون یا اختلاف ارتفاع کاهش دهد. از این رو، شبیه سازی مدل یکپارچه آنتن و مقایسه کننده با بهینه سازی پارامترها برای اطمینان از بدست آوردن عمق تهی مورد نیاز، مهم است. همچنین می توان از این مدل برای محاسبه توان دریافتی در اختلاف آزمون و پورت اختلاف ارتفاع با تغییر زاویه ورود به آنتن گیرنده استفاده کرد. پیکربندی های زیادی از آنتن ها و مقسم ها وجود دارد که می توانند در این مدل برای شبیه سازی سیستم تک پالس وارد شوند. پارامترهای پراکندگی محاسبه شده با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی موج کامل را می توان به مدل وارد کرد تا یک نتیجه عملی برای تأیید سیستم به دست آورد. توان دریافتی در پورت های مجموع، آزمون و اختلاف ارتفاع را می توان از مدل برای تعیین خطای تک پالس به دست آورد.

۳-۱-۱- تئوری یک سیستم مونوپالس

از رادار ردیابی تک پالس می توان برای ردیابی اهداف منفرد یا چندگانه با تخمین موقعیت هدف در فضا استفاده کرد. انواع مختلفی از آنتن ها برای اجرای تکنیک تک پالس استفاده می شود و توان دریافتی از چهار ربع آنتن به شبکه مقایسه غیرفعال داده می شود تا مجموع (S)، اختلاف زاویه (ΔA)، اختلاف ارتفاع (ΔE) و یک اختلاف ربع متقاطع (ΔT) که توسط معادلات زیر ارائه می شود. بلوک دیاگرام تک پالس در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۳-۱-۱ بلوک دیاگرام سیستم تک پالس

سیگنال های تفاوت ΔE و ΔA برای محاسبه خطای زاویه ای هدف با توجه به دید باریکه استفاده می شوند.

$$(A + B + C + D) = S \quad \dots (1)$$

$$(A + B) - (C + D) = \Delta A \quad \dots (2)$$

$$(A + D) - (B + C) = \Delta E \quad \dots (3)$$

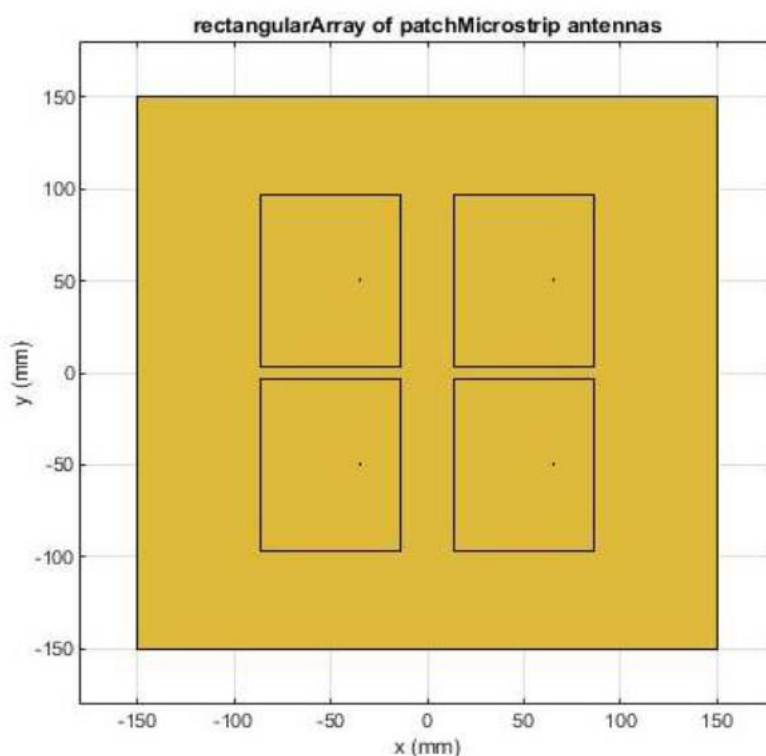
$$(A + C) - (B + D) = \Delta T \quad \dots (4)$$

برای پردازش این خروجی ها به سه کانال گیرنده نیاز است و محدوده و موقعیت هدف را می توان با استفاده از یک پالس تخمین زد. از این رو به این تکنیک مونوپالس می گویند. در نمای باریکه، الگوی مجموع و تفاوت به ترتیب دارای مقدار حداکثر و حداقل هستند و این عمق صفر، وضوح زاویه ای و دقت

ردیابی هدف را مشخص می کند. عمق تهی را می توان با بهبود طراحی مقایسه کننده افزایش داد. شبیه سازی ترکیبی آنتن و مقایسه کننده مهم است زیرا الگوهای مجموع و تفاوت را ارائه می دهد که در محاسبه سیگنال خطای تک پالس ضروری هستند.

۲-۱-۳- نتایج شبیه سازی زیر سیستم

مدل سیستم تک پالس برای یک آنتن فرستنده و گیرنده ساخته شده است که دارای چهار عنصر است که در یک آرایه مستطیلی به اندازه 2×2 مرتب شده اند. هندسه آنتن در شکل زیر نشان داده شده است.



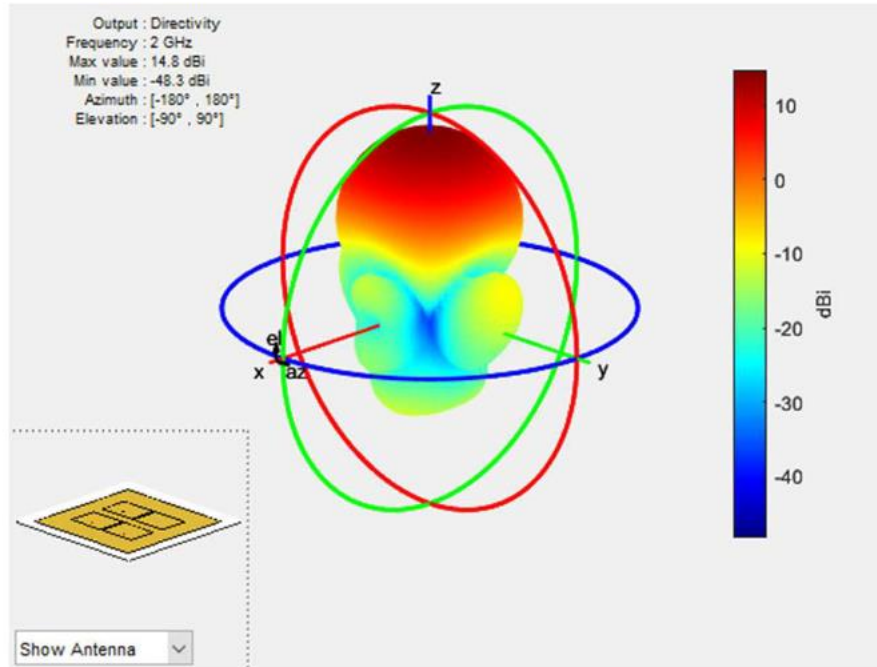
شکل ۲-۳ هندسه آنتن

الگوی آنتن فرستنده و گیرنده در فرکانس ۲ گیگاهرتز به ترتیب در شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳ آورده شده است. حداکثر مقدار برای [ارتفاع ازیموت] $[0^\circ 90^\circ]$ به دست می آید و بهره ۱۴.۸ dBi است. از همان آنتن در گیرنده استفاده می شود، اما ۱۸۰ درجه کج می شود تا دو آنتن روبروی یکدیگر قرار گیرند. الگوی محاسبه شده دارای حداکثر مقدار برای $[0^\circ - 90^\circ]$ است.

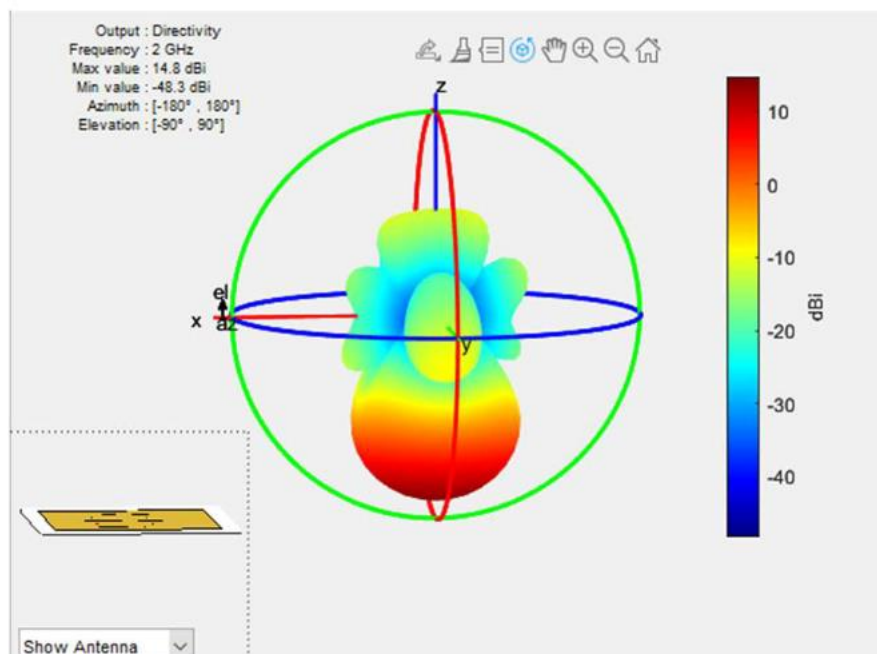
حل آنتن ها با استفاده از روش شبیه ساز تمام موج مبتنی بر لحظه انجام می شود. شی آنتن به عنوان ورودی به بلوک آنتن فرستنده و گیرنده در مدل سیستم داده می شود.

PatchMicrostrip برای ایجاد آنتن پچ و از تابع طراحی برای بدست آوردن ابعاد پچ استفاده می شود تا نزدیک به ۲ گیگاهرتز طنین انداز شود.

از rectangularArray برای ایجاد آرایه آنتن پچ استفاده می شود. تابع طراحی برای محاسبه فاصله بهینه بین عناصر آرایه در ۲ گیگاهرتز استفاده می شود.



شکل ۳-۳ پترن آنتن ارسال



شکل ۳-۴ پترن آنتن دریافت

آنتن را می توان با استفاده از کد ارائه شده در شکل ۳-۵ طراحی و شبیه سازی کرد.

```

%% Antenna Array for Transmitter Antenna
ant = patchMicrostrip;
ant=design(ant,2e9);
antennaTx = design(rectangularArray,2e9,ant);
figure,pattern(antennaTx,2e9);


---


%% Antenna Array for Receiver Antenna
ant = patchMicrostrip;
ant = design(ant,2e9);
antennaRx = design(rectangularArray,2e9,ant);
antennaRx.Tilt = 180;
figure, pattern(antennaRx,2e9);

```

شکل ۳-۵ کد برای محاسبه پترن

۲-۳- مدل شبیه سازی سیستم

مدل شبیه سازی شامل یک فرستنده و یک گیرنده است. یک ورودی dBm ۱۰ با استفاده از بلوک های تقسیم کننده Wilkinson به چهار قسمت مساوی تقسیم می شود و به بلوک آرایه داده می شود. بلوک آرایه آنتن در RF Blockset برای تعیین آنتن فرستنده و گیرنده استفاده می شود.

یک شی آرایه آنتن و جهت خروج را می توان در بلوک فرستنده و شیء آرایه و جهت رسیدن را می توان در بلوک آرایه دریافتی مشخص کرد. آنتن گیرنده به مدار مقایسه کننده متصل است که با استفاده از کوپلرهای rat-race ساخته شده است و خروجی های به دست آمده عبارتند از مجموع، اختلاف آزمون و اختلاف ارتفاع. بلوک های Wilkinson و rat-race با استفاده از پارامترهای s ایده آل مدل سازی می شوند. توان دریافتی در این کانال ها با زوایای مختلف رسیدن بر روی آنتن گیرنده سیستم ردیابی تک پالس را شبیه سازی می کند. آنتن های موجود در کاتالوگ را می توان در بلوک آنتن ارسال یا دریافت استفاده کرد.

پارامترهای s آنتن ها و مقایسه کننده های مختلف را می توان در مدل وارد کرد تا بررسی شود که آیا این دستگاه ها برای کاربرد تک پالس مناسب هستند یا خیر. RF Blockset یک رابط آسان برای ساخت مدل فراهم می کند.

هر گونه تنظیمات سفارشی آنتن و مقایسه کننده را می توان در مدل استفاده کرد.

برای نمایش مفهوم، یک آرایه مستطیلی به اندازه 2x2 به عنوان فرستنده و آنتن گیرنده استفاده می شود. خواص آرایه را می توان به راحتی تغییر داد تا در عرض چند دقیقه پیکربندی کاملاً متفاوتی به

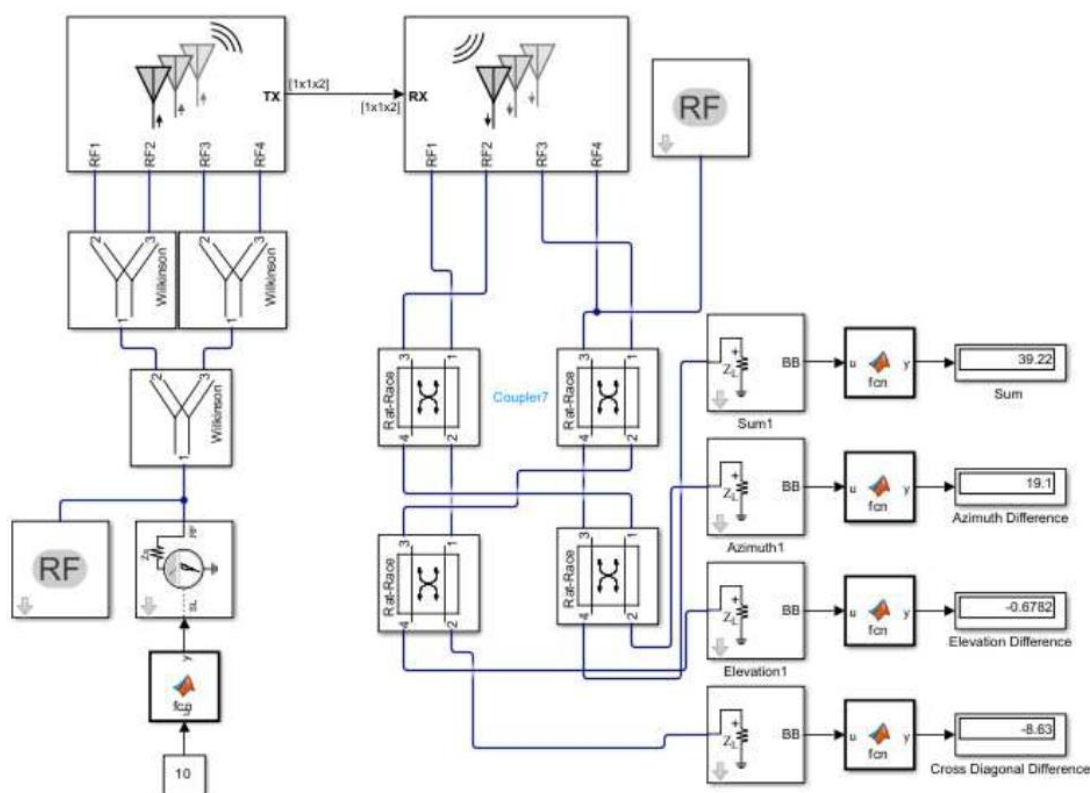
دست آورد. مقایسه‌کننده با استفاده از بلوک‌های جفت‌کننده rat-race موجود در RF Blockset ساخته شده است. سپس مدل برای زوایای مختلف رسیدن و مقادیر شبیه سازی می شود

مقادیر دریافتی در جدول ۳-۱ ثبت شده است. مقادیر به دست آمده نشان می دهد که سیستم طراحی شده با استفاده از RF Blockset سیستم ردیابی مونوپالس را پیاده سازی می کند.

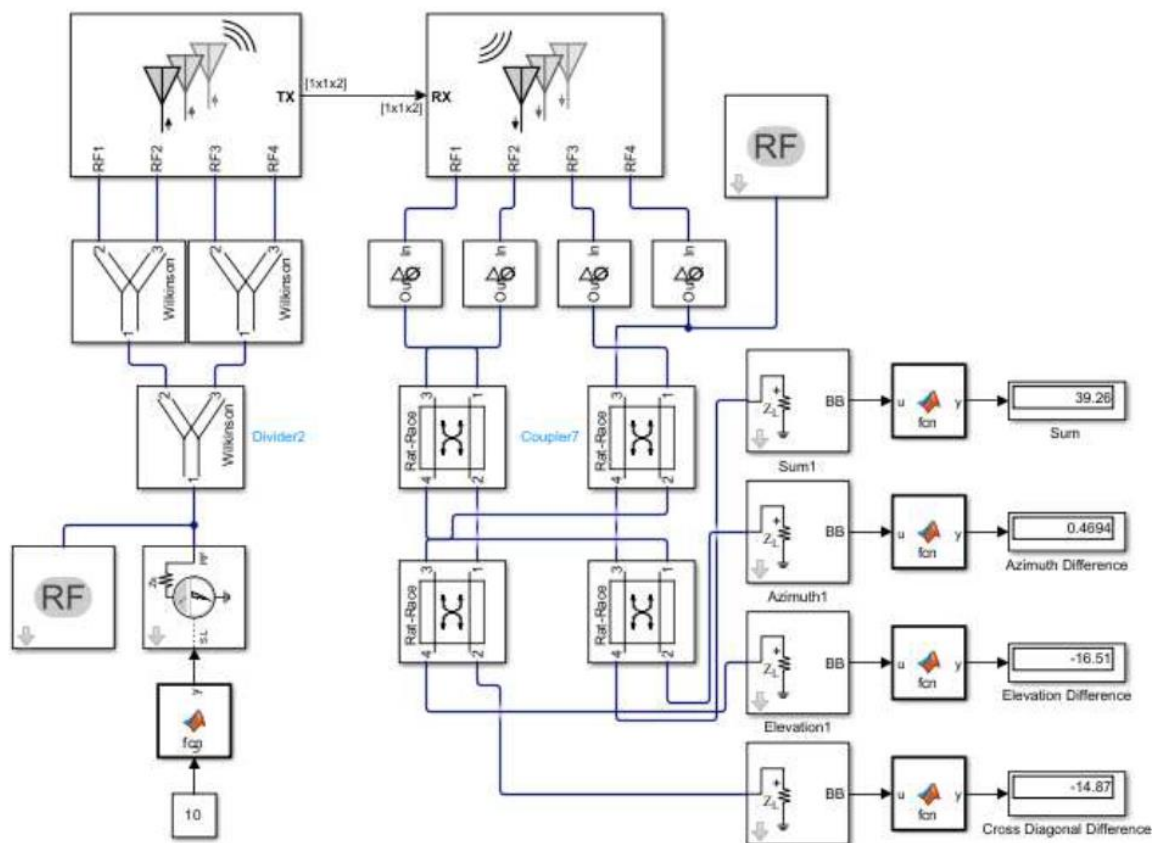
پورت مجموع مقدار ۳۹.۲ dBm را به دست می دهد که با نتیجه مورد انتظار به دست آمده با افزودن توان ورودی، بهره فرستنده و آنتن های گیرنده مطابقت دارد.

تفاوت بین پورت مجموع و اختلاف آزمون عمق تهی را ۲۰ دسی بل کمتر از سیگنال مجموع می دهد که برای عملکرد بهتر یک سیستم تک پالس باید بهبود یابد. شکل ۳-۶ مدل را با نتیجه نشان می دهد.

مقدار کمتر عمق تهی مشاهده شده ناشی از اختلاف فاز کوچک بین پورت های آنتن است. برای جبران این تغییر فاز، بلوک های فاز شیفتر به خروجی پورت های آنتن متصل می شوند. عمق صفر بهبود می یابد و ۴۰ دسی بل کمتر از سیگنال مجموع است که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ مدل سیستم پیشنهادی



شکل ۳-۷ مدل با بلوک های شیفیت فاز

مدل را می توان با استفاده از پارامترهای s که با استفاده از یک مدل رفتاری یا راه حل روش لحظه ها محاسبه می شود، پالایش بیشتری کرد. از پارامترهای s موجود از سازندگان نیز می توان در شبیه سازی استفاده کرد و بر اساس نتایج، اجزای مناسب را انتخاب کرد.

این مدل مزیت دیگری را از استفاده از پارامترهای s اندازه گیری شده اجزای ساخته شده و تأیید امکان سنجی آن اجزا در کاربرد تک پالس ارائه می کند.

این پارامترهای s را می توان در مدل RF Blockset برای انجام شبیه سازی سیستم سیستم تک پالس وارد کرد. Blockset RF از تکنیک های هارمونیک تعادل و envelope مدار استفاده می کند و جلوه های غیر خطی را در شبیه سازی می گیرد.

۳-۳- نتایج شبیه سازی

عملکرد سیستم ردیابی تک پالس را می توان با تغییر جهت هدف و سپس اندازه گیری نتایج در پورت مجموع، آزیموت و پورت های اختلاف ارتفاع نشان داد.

Arrival Angle [Az El]	Output	Magnitude	Phase (Deg)	Value (dB)
[0° -90°]	Sum	2.9	125.9	39.26
	ΔA	0.033	-51.34	0.46
	ΔE	0.004	121.3	-16.5
[180° -90°]	Sum	2.904	-54.9	39.26
	ΔA	0.033	128.7	0.46
	ΔE	0.004	121.3	-16.5
[0° -80°]	Sum	2.5	126.1	38.17
	ΔA	1.3	32.84	32.49
	ΔE	0.003	112.5	-19.05
[180° -100°]	Sum	2.5	-53.92	38.17
	ΔA	1.33	-147.2	32.49
	ΔE	0.003	-67.5	-19.05
[0° -70°]	Sum	1.75	125.6	34.9
	ΔA	2.12	35.04	36.54
	ΔE	0.001	99.71	-24.91
[180° -110°]	Sum	1.75	-54.44	34.9
	ΔA	2.123	-145	36.54
	ΔE	0.001	-80.29	-24.91
[45° -70°]	Sum	1.29	125.9	32.21
	ΔA	0.998	34.48	29.99
	ΔE	0.8503	34.81	28.59

جدول ۳-۱ مجموع، آزمون و مقادیر اختلاف ارتفاع

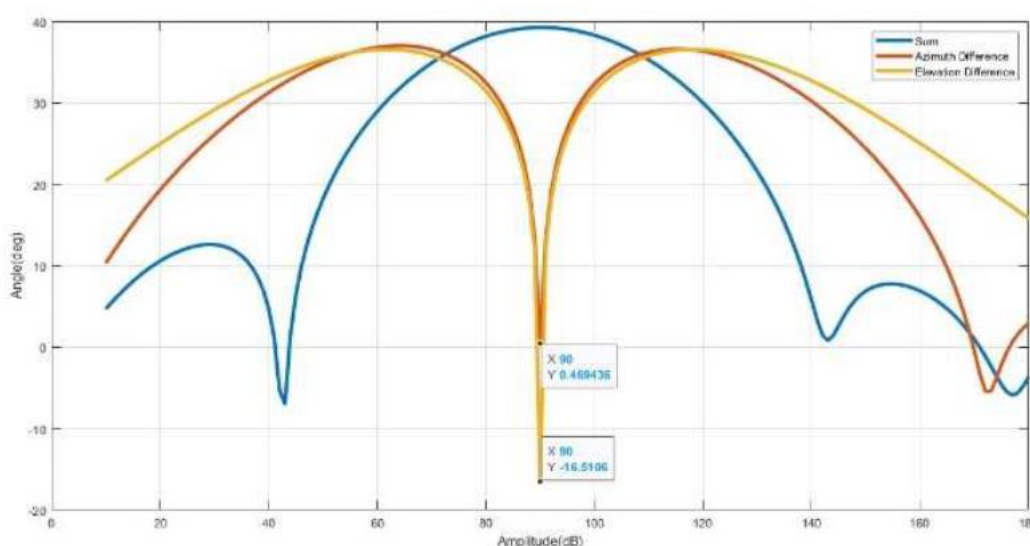
برای تجسم رفتار سیستم بر اساس مکان هدف، شبیه سازی ها بر روی این مدل با تغییر زاویه ورود به بلوک آرایه گیرنده اجرا شد. زاویه ورود جهت دریافت سیگنال را مشخص می کند و رفتار مکان هدف را تقلید می کند.

زاویه ورود در ابتدا در امتداد جهت دید آنتن گیرنده که $[0^\circ - 90^\circ]$ است مشخص می شود و سپس در مراحل ۱۰ درجه کاهش می یابد تا توان دریافتی در پورت های مجموع و اختلاف آزمون اندازه گیری شود. مقادیر در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

با کاهش زاویه رسیدن، توان دریافتی در پورت اختلاف آزمون افزایش می‌یابد و برای 70° - درجه، این مقدار بیشتر از پورت مجموع است که نشان می‌دهد هدف در جهت بارسیت نیست. با مشاهده نسبت های نسبی بین سه توان دریافتی، موقعیت زاویه ای گیرنده را می توان در زمان واقعی اندازه گیری کرد.

یک رویکرد مشابه می تواند برای اندازه گیری خطای مشاهده شده در پورت اختلاف ارتفاع استفاده شود. هنگامی که سیگنال از یک هدف در $[45^\circ - 70^\circ]$ می آید، هر دو اختلاف ارتفاع و آزمون تغییر در مقادیر را نشان می دهند و هر دو مقدار نزدیک به ۲۹ دسی بل هستند، در حالی که مجموع آن حدود ۳۲ دسی بل است.

مدل برای تمام زاویه های رسیدن شبیه سازی شده و توان دریافتی در پورت های مجموع و اختلاف در شکل ۸ رسم شده است.

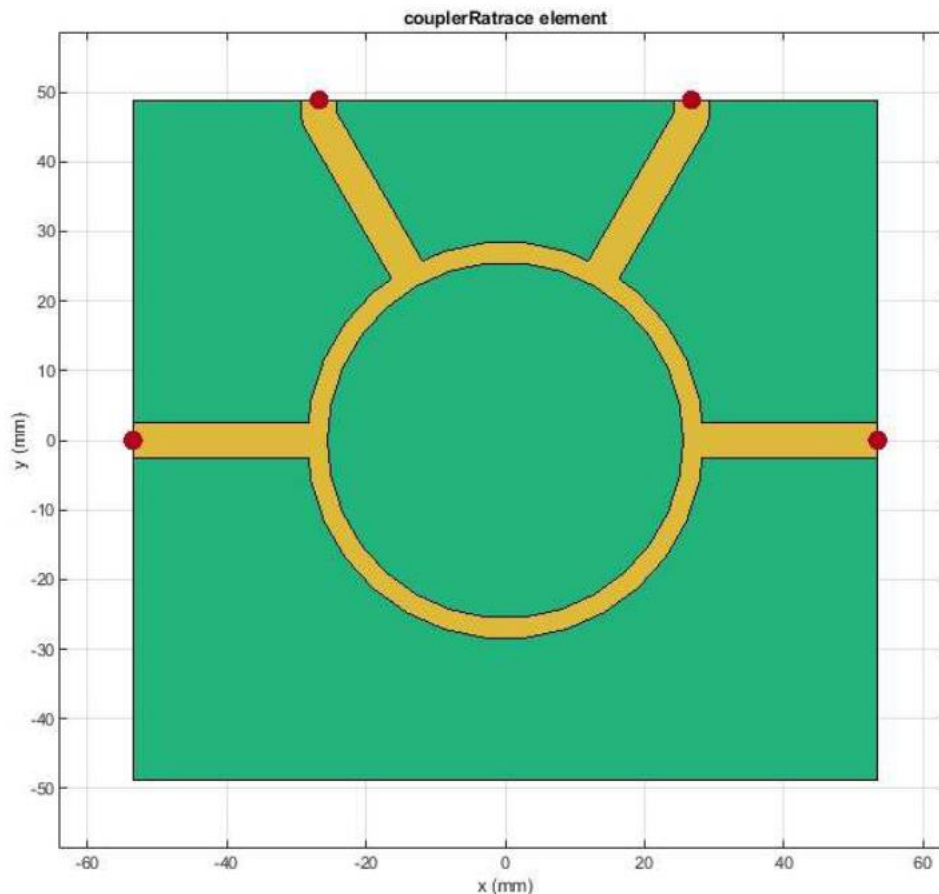


شکل ۳-۸ پترن جمع و تفاوت برای مدل

شکل نشان می دهد که اختلاف ارتفاع در مقایسه با اختلاف آزمون دارای عمق تهی بیشتری است. تفاوت ارتفاع با کم کردن دو سیگنال تفاوت از دو کوپلر rat-race تشکیل می شود در حالی که تفاوت آزمون با کم کردن دو سیگنال مجموع از دو کوپلر rat-race تشکیل می شود. بنابراین عمق صفر برای اختلاف ارتفاع بیشتر از اختلاف ارتفاع خواهد بود.

به جای استفاده از مدل های ایده آل از مجموعه RF، می توان طرح های PCB واقعی تر را با استفاده از تحلیل EM ساخت و شبیه سازی کرد تا نتیجه عملی تری را منعکس کند. نتایج شبیه سازی موج کامل را می توان به راحتی به بلوک پارامترهای s در RF Blockset وارد کرد و سپس شبیه سازی سیستم RF را انجام داد.

کوپلر rat-race و تقسیم کننده های قدرت Wilkinson را می توان با استفاده از جعبه ابزار RF PCB همانطور که در شکل ۳-۹ نشان داده شده طراحی و شبیه سازی کرد.



شکل ۳-۹ هندسه کوپلر rat-race

پارامترهای s برای کوپلر Wilkinson و rat-race را می توان به ترتیب در فایل های s3p و s4p ذخیره کرد. قطعه کد در شکل ۳-۱۰ این فایل ها را تولید می کند.

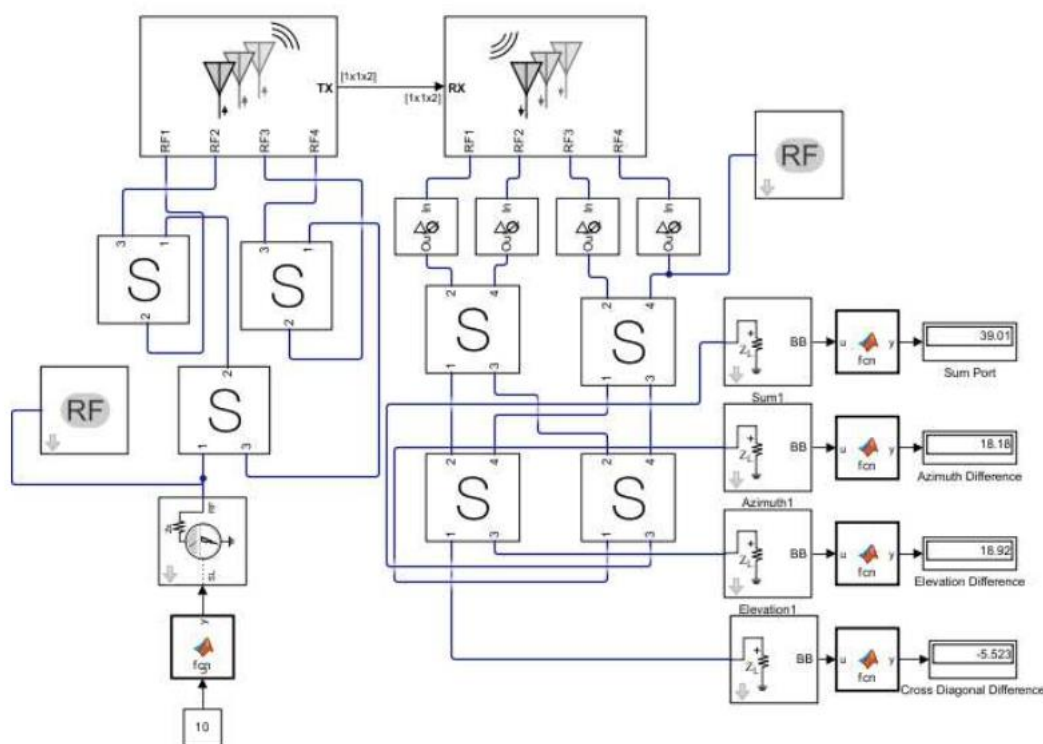
```
%% Ratrace Coupler and Wilkinson Splitter for Comparator
c = couplerRatrace;
c = design(c,2e9);
spar_ratrace = sparameters(c,linspace(1.5e9,2.5e9,51));

d = wilkinsonSplitter;
d = design(d,2e9);
spar_wilkinson = sparameters(d,linspace(1.5e9,2.5e9,51));

rfwrite(spar_wilkinson,'spar_wilkinson.s3p');
rfwrite(spar_ratrace,'spar_ratrace.s4p');
```

شکل ۳-۱۰ کد برای تولید فایل های s3p و s4p

بلوک‌های ویلکینسون و کوپلرهای rat-race با بلوک‌های پارامترهای s جایگزین می‌شوند و فایل‌های S3P و S4P محاسبه شده در بالا استفاده می‌شوند. نتیجه نشان می‌دهد که عمق تهی به‌ویژه زمانی که از پارامترهای s رفتاری استفاده می‌شود خوب است، اما زمانی که راه‌حل روش لحظه‌ها بر روی شی کوپلر استفاده می‌شود، عمق تهی کاهش می‌یابد و ۲۰ دسی‌بل کمتر از سیگنال مجموع است. در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است، این همان چیزی است که ممکن است در هنگام ساخت طرح مشاهده کنیم. طراحی کارآمد کوپلرهای rat-race که ایزولاسیون خوب بین پورت‌ها و اختلاف فاز دقیق بین پورت‌های خروجی دارند می‌توانند عمق صفر را بهبود بخشند. نتیجه نشان می‌دهد که طراحی‌های عملی نیاز به بهبود دارند و دامنه و فاز روی هر پورت باید کاملاً متعادل شود تا نتیجه مطلوب در سیستم تک پالس به دست آید. این را می‌توان با افزودن بلوک تغییر فاز به کوپلرهای rat-race و تنظیم فاز سیگنال‌های خروجی به گونه‌ای که اختلاف ارتفاع و آزمون را بهبود بخشید، در مدل نمونه سازی کرد.



شکل ۳-۱۱ مدل با بلوک‌های پارامترهای s برای ویلکینسون و کوپلر rat-race

۳-۴- نتیجه گیری

مدل یکپارچه آنتن و مقایسه کننده در گزارش ارائه شده است. مدل عمومی است و پارامترهای s هر ساختاری را می‌توان برای نشان دادن قابلیت ردیابی تک پالس استفاده کرد. این امر زمان مورد نیاز در مرحله طراحی و نمونه سازی را سرعت می‌بخشد و نتایج دقیقی را ایجاد می‌کند. با استفاده از این مدل با تغییر آنتن و با استفاده از تعداد بیشتر عناصر در آرایه می‌توان تحلیل‌های مختلفی را انجام داد. پارامترهای s برای کوپلرها را می‌توان با استفاده از جعبه ابزار RF PCB شبیه سازی کرد و در مدل برای



محاسبه قابلیت ردیابی استفاده کرد. این مدل برای هر پیکربندی آنتن و مقایسه کننده قابل استفاده است و شبیه سازی سیستم را می توان به راحتی انجام داد.

۳-۵- کد برنامه

```
%% Design and Simulate Monopulse Tracking System
% This example shows how to model and simulate a monopulse tracking system
% with a transmitter antenna, receiver antenna, and comparator[1]. The
% monopulse principle is used in many RADAR applications to estimate the
% position of the target in space by calculating the error in the azimuth
% and elevation direction. Monopulse tracking can be achieved using various
% antenna and comparator configurations. The antenna can be a 3-D antenna
% such as a horn or a planar antenna such as a simple patch antenna.
%
% The comparator can be designed using four rat-race couplers that provide
% sum, azimuth difference, and elevation difference. Different
% configurations can be used based on the requirements, but the integration
% of the antenna and coupler needs to be perfect to achieve the desired
% results. Integrating the antenna and comparator directly on the hardware
% results in amplitude and phase mismatches, which can cause the
% outputs to vary. Hence, it is important to simulate the integrated model
% to get accurate results, anticipate the mismatches in phase, and to
% devise a corrective action before the
% hardware is fabricated.
% Copyright 2022 The MathWorks, Inc.
%% Monopulse System Theory
% The monopulse tracking radar can be used to track single or multiple
% targets by estimating the position of the target in space. This is a
% diagrammatic representation of the monopulse system.
%
% <<../comparator.png>>
%
%
% Different types of antennas are used to implement the monopulse technique
% and the diagram shows that the power received from the four quadrants of
% antenna is given to the passive comparator network to obtain sum (S),
% azimuth difference (AD), elevation difference (ED), and a cross-quadrant
% difference (CQD) , all calculated using the following equations.
%
% * (A + B + C + D) = S
% * (A + B) &ndash; (C + D) = AD
% * (A + D) &ndash; (B + C) = ED
% * (A + C) &ndash; (B + D) = CQD
%
% A, B, C, and D are the four quadrants of the 2-by-2 rectangular array
% antenna. Three receiver channels are required to process these
% outputs and the target range and position can be estimated using a single
% pulse. Hence, this technique is named monopulse. The difference signals
% AD and ED are used for calculating the angular error of the target with
% respect to the boresight. At the boresight, the sum and difference
% pattern have a maximum and minimum value, respectively, and this null
% depth
```



```
% defines the angular resolution and target tracking accuracy. The null
% depth can be increased by improving the design of the comparator [2]. The
% combined simulation of the antenna and the comparator is important as it
% gives the sum and difference patterns that are essential in calculating
% the monopulse error signal.
%% Subsystem Simulation Model
% The monopulse system model is built for a transmitter and receiver
% antenna with four elements arranged in a 2-by-2 rectangular array
% configuration. The antenna pattern for the transmitter and
% receiver is designed at the frequency of 2 GHz. The maximum value is
% obtained for
% [azimuth elevation] of [0 90] degrees and the gain is 14.8 dBi.
%%
ant = patchMicrostrip;
ant=design(ant,2e9);
array = pcbStack(design(rectangularArray,2e9,ant));
figure,mesh(array,'MaxEdgeLength',8e-3);
figure,pattern(array,2e9);
%%
% Use the 2-by-2 rectangular array antenna at the receiver, but tilt it by
% 180 degrees so that the two antennas face each other. The calculated
% pattern has a maximum value of [0 -90] degrees.
%%
ant = patchMicrostrip;
ant = design(ant,2e9);
array1 = pcbStack(design(rectangularArray,2e9,ant));
array1.Tilt = 180;
figure,mesh(array1,'MaxEdgeLength',8e-3);
figure,pattern(array1,2e9);
%%
% The antennas are solved using the method of moments full-wave
% simulator. The antenna object is given as an input to the transmitter and
% receiver antenna block in the system model.
%% System Simulation Model
% The simulation model contains a transmitter and a receiver. A 10 dBm
% input is divided into four equal parts using the Wilkinson splitter
% blocks and provided to the array block. The antenna array block in RF
% Blockset is used to specify the transmitter and receiver antenna. An
% antenna array object and the direction of departure can be specified
% in the transmitter block, and the array object and direction of arrival
% can be specified in the receive array block. The receiver antenna is
% connected to the comparator circuit, built using rat-race couplers, and
% the outputs obtained are sum, azimuth difference, and elevation
% difference. The Wilkinson and the rat-race blocks are modelled using the
% ideal S-parameters.
%
% The power received in these channels with different angles of arrival on
% the receive antenna simulates the monopulse tracking system. The antennas
% in the catalog can be used in the transmit or receive antenna block. The
% S-parameters of different antennas and comparators can be imported into
% the
% model to verify whether these devices are suitable for a monopulse
% application.
%
```



```
% The model can be further refined using S-parameters, calculated using a
% behavioral model or a method-of-moments solution. These S-parameters can
% be imported into the model in RF Blockset(TM) to simulate the monopulse
% system. The RF Blockset uses the harmonic balance and circuit envelope
% techniques and takes nonlinear effects into the simulation.
%
% The sum port provides the value of 39.02 dBm, which matches the expected
% result obtained by adding input power, gain of the transmitter, and
% receiver antennas. The difference between the sum port and azimuth
% difference provides a null depth value that is 20 dB lower than the sum
% signal. The null depth value needs to be improved for better performance
% of the monopulse system. The observed lower null depth value is caused
% by a small phase difference between the antenna ports. To compensate for
% this phase shift, the phaseShift blocks are connected to the output of
% the antenna ports. The null depth improves and is 44 dB lower than the
% sum signal.
%% Simulation Results
% Open and simulate the monopulse tracking system model.
open_system("monopulse.slx")
sim("monopulse.slx");
%%
% The working of the monopulse tracking system can be shown by varying the
% direction of the target and then measuring the results on the sum port,
% azimuth, and elevation difference ports. To visualize the system's
% behavior based on the target location, the simulations were run on this
% model by varying the angle of arrival on the receiver array block. The
% angle of arrival specifies the direction from which the signal is
% received and mimics the behavior of the target's location. The angle of
% arrival is initially specified along the boresight direction of the
% receiver antenna at [0 &ndash;90], and then decreased in the steps of 10
% degrees to measure the power received in the sum and azimuth difference
% ports.
%
% As the angle of arrival is decreased, the power received on the azimuth
% difference port increases, and for &ndash;70 degrees, this value is
% greater than the sum port, which signifies that the target is not in the
% boresight direction. By looking at the relative ratios between the three
% received powers, the angular position of the receiver can be measured in
% real time. A similar approach can be used to measure the error observed
% in the elevation difference port. When the signal arrives from a target
% at [45 &ndash;70], both the azimuth and elevation differences show the
% change in the values, and both values are close to 29 dB, whereas the sum
% is around 32 dB.
%
% The model is simulated for all the angles of arrival and the power
% received in the sum and difference ports is plotted. The figure
% shows that the elevation difference has a greater null depth compared
% to the azimuth difference. The elevation difference is formed by
% subtracting two difference signals from two rat-race couplers, whereas the
% azimuth difference is formed by subtracting two sum signals from two
% rat-race couplers. Hence, the null depth for the elevation difference is
% more than the azimuth difference.
%%
openfig("result.fig");
```



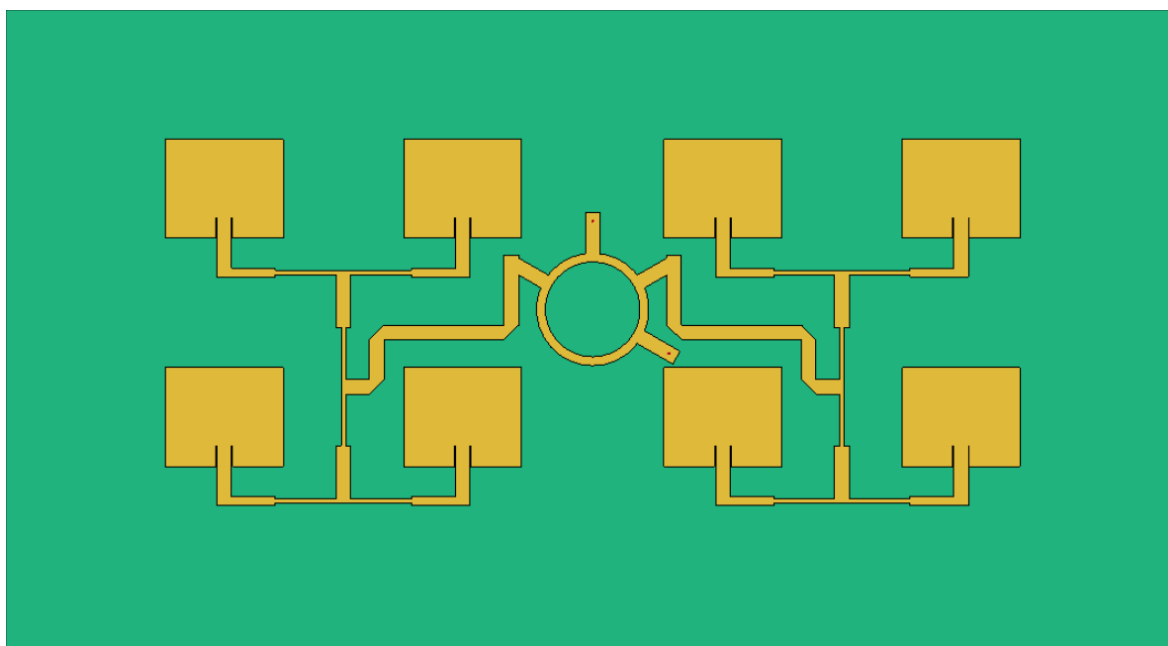
```
%% Design Rat-Race Coupler and Wilkinson Power Dividers Using RF PCB Toolbox
% Instead of using the ideal models from RF Blockset, more realistic PCB
% designs can be built and simulated using the EM analysis to reflect a
% more practical result. The rat-race coupler and the Wilkinson power
% dividers can be designed and simulated using RF PCB Toolbox(TM)
% objects. The S-parameters can be saved in s3p and s4p files, respectively.
%
% Run these commands at the command line to retrace the coupler for the
% comparator.
%%
%
% c = couplerRatrace;
% c = design(c,2e9);
% spar_ratrace = sparameters(c,linspace(1.5e9,2.5e9,51));
%
%%
% Run these commands at the command line to retrace the Wilkinson splitter
% for the comparator
%%
%
% d = wilkinsonSplitter;
% d = design(d,2e9);
% spar_wilkinson = sparameters(d,linspace(1.5e9,2.5e9,51));
%
%%
% Run these commands at the command line to create the S3P and S4P files.
%%
%
% rfwrite(spar_wilkinson,'spar_wilkinson.s3p');
% rfwrite(spar_ratrace,'spar_ratrace.s4p');
%
%
%%
% The Wilkinson and the rat-race coupler blocks are replaced with the
% S-parameters blocks and the S3P and S4P files calculated above are used.
%%
% Open and simulate monopulse system designed with the rat-race coupler and
% Wilkinson splitter.
open_system("monopulse_sparameters.slx")
sim("monopulse_sparameters.slx");
%%
% The result shows that the null depth is particularly good when the
% behavioral S-parameters are used, but when the method-of-moments solution
% is used on the coupler object, the null depth degrades and is 20 dB lower
% than the sum signal, which is what we might observe when the design is
% fabricated. Efficient designs of rat-race couplers that provide good
% isolation between the ports and exact phase difference between the output
% ports can improve the null depth.
%
% The result shows that the practical designs need to be improved and the
% amplitude and phase on each port need to be balanced perfectly to achieve
% the desired result in the monopulse system. This can be prototyped in the
% model by adding the phase shift block to the rat-race couplers and
% adjusting the phase of the output signals such that the elevation and
```



% azimuth difference can be improved.

فصل ۴ - طراحی آنتن رادار ردیاب مونوپالس S-Band

حال پروژه دیگری را بررسی می کنیم. این مثال نحوه اجرای عملیات تک پالس را با ادغام یک آرایه بچ میکروواتسریپ ۲ در ۴ و یک جفت کننده rat-race نشان می دهد. سیستم برای فرکانس کاری ۳ گیگاهرتز طراحی شده و نتایج شبیه سازی شده و اندازه گیری شده با هم مقایسه شده است. حداکثر بهره آنتن در پورت مجموع ۱۵.۳ دسی بل است. این نمودار نمای بالایی آنتن را نشان می دهد.



شکل ۴-۱ نمای بالایی آنتن

۴-۱ ایجاد هندسه آرایه آنتن

یک جفت کننده rat-race ایجاد می کنیم که با استفاده از شی couplerRatrace در ۳ گیگاهرتز رزونانت می کند.

```
cup = couplerRatrace;
d = cup.Substrate;
cup.PortLineLength = 18.6e-3;
cup.PortLineWidth = 0.0050;
cup.CouplerLineWidth = 0.0030;
cup.Circumference = 0.111;
```

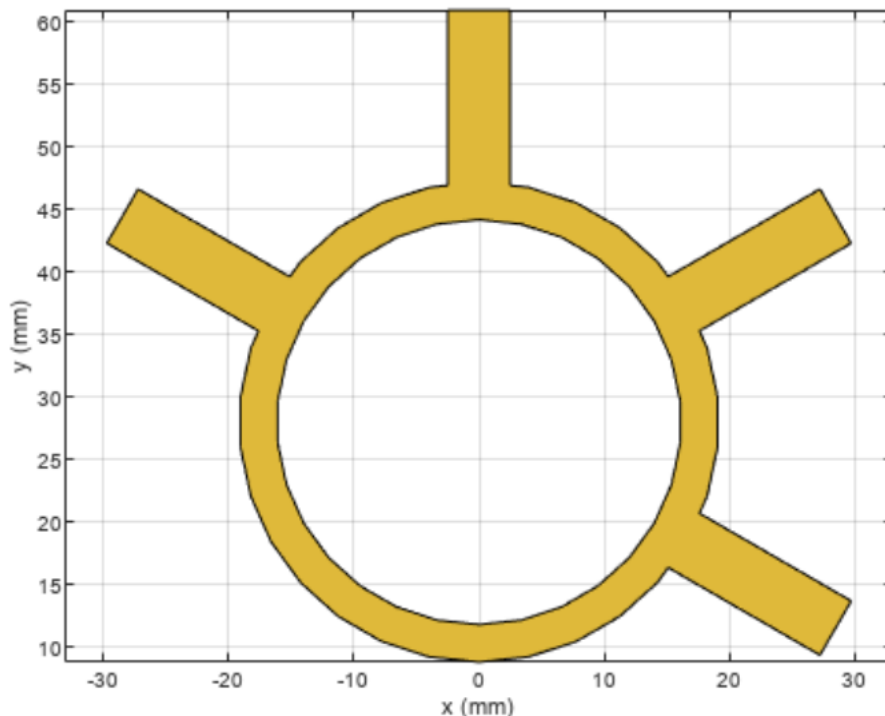
از شیء pcbComponent برای تشکیل یک پشته PCB از کوپلرهای rat-race استفاده می کنیم، به گونه ای که سطح زمین را بتوان برای قرار دادن آرایه آنتن پیچ گسترش داد.

```
RR = pcbComponent(cup);
RR.BoardShape = antenna.Rectangle(Center=[0 0.02],Length=0.4,Width=0.22);
RR.Layers{3} = RR.BoardShape;
ground = RR.BoardShape;
```

کوپلر rat را در مرکز آنتن های پچ طوری قرار می دهیم که فواصل بین آنتن های پچ در دو طرف یکسان باشد.

برای اصلاح کوپلر rat-race برای این طرح، از شی antenna.Rectangle (Antenna Toolbox) و عملیات جمع و تفریق Boolean استفاده می کنیم. ساختار را با استفاده از عملکرد نمایش (جعبه ابزار آنتن) تجسم می کنیم.

```
top = RR.Layers{1};
cut1 = antenna.Rectangle(Center=[34.4e-3 0e-3],Length=3e-3,Width=5e-3);
cut2 = antenna.Rectangle(Center=[-34.4e-3 0e-3],Length=3e-3,Width=5e-3);
top = top - cut1 - cut2;
top = rotateZ(top,-30);
cutfine1 = antenna.Rectangle(Center=[0 35.9e-3],Length=7e-3,Width=6e-3);
top = top - cutfine1;
top = rotateZ(top,-30);
cutfine2 = antenna.Rectangle(Center=[35.9e-3 0],Length=6e-3,Width=7e-3);
top = top - cutfine2;
top = rotateZ(top,30);
top = translate(top,[0,28e-3,0]);
figure(Name="Rat-race Coupler")
show(top)
```



شکل ۴-۲ کوپلر rat-race

۴-۲- ایجاد پچ آنتن

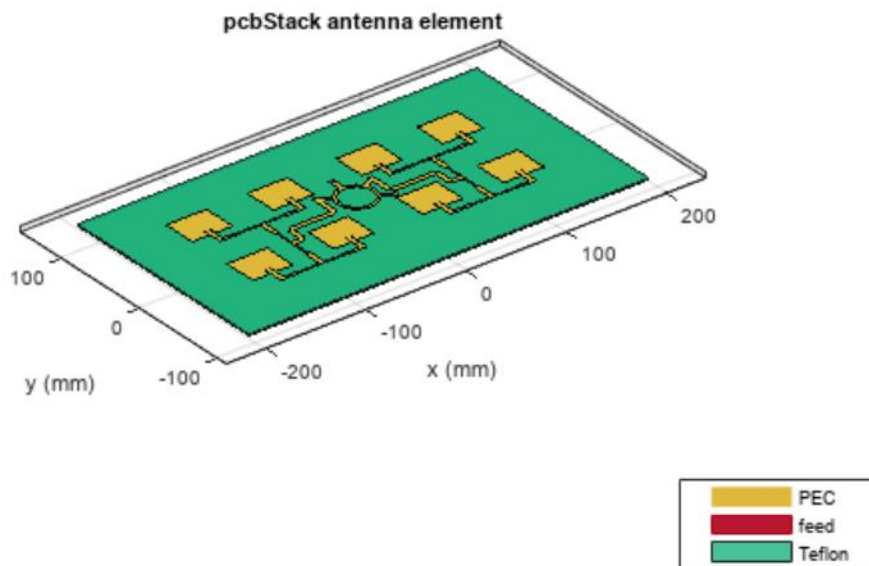
آرایه آنتن پچ را با استفاده از شی patchMicrostripInsetfed (جعبه ابزار آنتن) ایجاد می کنیم. مقادیر ویژگی را به گونه ای اختصاص می دهیم که آنتن در ۳ گیگاهرتز رزونانت کند.

```
ant = patchMicrostripInsetfed;
ant.Length = 33.6309e-3;
ant.Width = 40.1597e-3;
ant.Height = 1.6e-3;
ant.Substrate = d;
ant.NotchLength = 7e-3;
ant.GroundPlaneLength = 0.0600;
ant.StripLineWidth = 5e-3;
ant.NotchWidth = 5.577e-3;
```

۴-۳- ساخت آرایه آنتنی

آنتن را با استفاده از شی pcbStack (جعبه ابزار آنتن) به پشته PCB تبدیل کنید و عنصر آنتن طراحی شده را برای ایجاد هشت عنصر یکسان کپی می کنیم. آنتن های پچ را در دو طرف کوپلر rat-race قرار می دهیم تا با استفاده از تابع translate (Antenna Toolbox) آرایه ای ۲ در ۴ ایجاد کنیم. آنتن ها را با استفاده از عملکرد نمایش تجسم می کنیم.

```
array = pcbStack(ant);
a1 = array.Layers{1};
a1 = rotateZ(a1,90);
a2 = copy(a1);
a3 = copy(a1);
a4 = copy(a1);
ant1 = translate(a1,[-125.5202e-3 69e-3,0]);
ant2 = translate(a2,[-125.5202e-3 -0.008650,0]);
ant3 = translate(a3,[-44.3591e-3 69e-3,0]);
ant4 = translate(a4,[-44.3591e-3 -0.008650,0]);
antArrayleft = ant1 + ant3 + ant2 + ant4;
antArrayright = copy(antArrayleft);
antArrayright = mirrorY(antArrayright);
antArray = antArrayleft + antArrayright;
figure(Name="Microstrip Patch Array")
show(antArray)
```

شکل ۴-۳ آرایه پچ مایکرواستریپ

بخشی از شبکه تقسیم کننده قدرت را با استفاده از شی `antenna.Rectangle` (Antenna Toolbox) ایجاد می کنیم. تقسیم کننده قدرت را با استفاده از شی `traceTee` ایجاد می کنیم. با استفاده از عملکردهای کپی و `mirrorX` (جعبه ابزار آنتن) چهار تقسیم کننده قدرت با ابعاد یکسان ایجاد می کنیم.

```
inline1 = antenna.Rectangle(Center=[-54.29e-3 0.0405],Length=15e-3,Width=2.9e-3);
inline2= antenna.Rectangle(Center=[-115.6e-3 0.0405],Length=15e-3,Width=2.9e-3);
inline3 = antenna.Rectangle(Center=[-54.29e-3 -37.1475e-3],Length=15e-3,Width=2.9e-3);
inline4 = antenna.Rectangle(Center=[-115.6e-3 -37.1475e-3],Length=15e-3,Width=2.9e-3);
tee = traceTee;
tee.Length = [46.3746e-3 18e-3];
tee.Width = [1.492e-3 5e-3];
tee1 = copy(tee);
tee2 = copy(tee);
tee3 = copy(tee);
tee.ReferencePoint = [84.92e-3 0.0405];
tee2 = mirrorX(tee2);
tee3 = mirrorX(tee3);
tee1.ReferencePoint = [-84.92e-3 0.0405];
tee2.ReferencePoint = [84.92e-3 37.1475e-3];
tee3.ReferencePoint = [-84.92e-3 37.1475e-3];
teecut = antenna.Circle(Center=[12e-3 12e-3],Radius=3e-3,NumPoints=3);
ytee = traceTee;
ytee.Length = [45.3746e-3 9.12456e-3];
ytee.Width = [1.492e-3 5e-3];
y1tee = copy(ytee);
ytee.ReferencePoint = [-1.675e-3 84.92e-3];
ytee = rotateZ(ytee,-90);
```



```

y1tee.ReferencePoint = [1.675e-3 84.92e-3];
y1tee = rotateZ(y1tee,90);
fifine = antenna.Rectangle(Center=[-73.585e-3 9.175e-3],Length=5e-3,Width=20e-3);
fifine1 = antenna.Rectangle(Center=[-52.57e-3 20.105e-3],Length=47e-3,Width=5e-3);
fifine2 = antenna.Rectangle(Center=[-27.7e-3 32.6e-3],Length=5e-3,Width=30e-3);
curve = antenna.Polygon(Vertices=[-84.085e-3 -0.825e-3 0; -79.085e-3 -0.825e-3 0; ...
-79.085e-3 4.175e-3 0]);
curve = translate(curve,[8e-3,0,0]);
curve1 = antenna.Polygon(Vertices=[-84.085e-3 22.705e-3 0; -84.085e-3 17.605e-3 0; ...
-79.085e-3 22.705e-3 0]);
curve1 = translate(curve1,[8e-3 0 0]);
curve2 = antenna.Polygon(Vertices=[-33.2e-3 17.6e-3 0; -33.2e-3 22.605e-3 0; ...
-38.4e-3 17.6e-3 0]);
curve2=translate(curve2,[8e-3 0 0]);
sqcut = antenna.Rectangle(Center=[-26.7e-3 47.518e-3],Length=7e-3,Width=2.1640e-3);
sqcut2 = copy(sqcut);
sqcut2 = mirrorY(sqcut2);
RRline = fifine + fifine1 + fifine2 - curve - curve1 - curve2;
feedLeft = tee1 + tee3 + inline1 + inline2 + inline3 + inline4 + y1tee +
RRline;
feedRight = copy(feedLeft);
feedRight = mirrorY(feedRight);
totaltop = top + feedLeft + feedRight + antArray - sqcut - sqcut2;

```

۴-۴- ایجاد آنتن PCB از هندسه

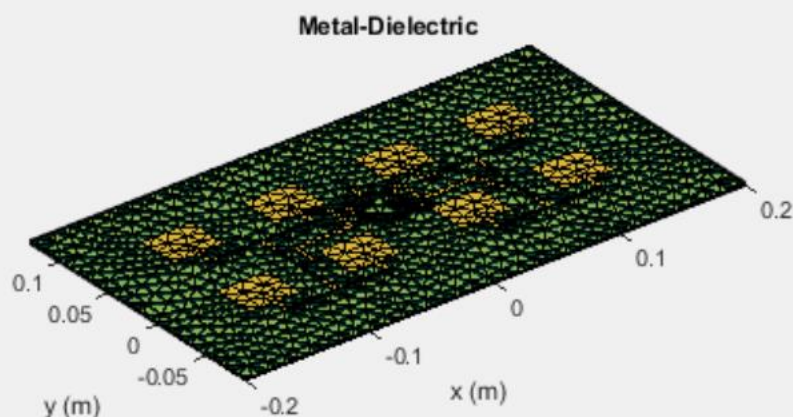
یک پشته از لایه های آنتن را با استفاده از شی pcbStack ایجاد می کنیم و شکل ایجاد شده در قسمت قبل را به لایه بالایی پشته اختصاص می دهیم. این مرحله طراحی آنتن پچ را تکمیل می کند.

```

rrMicrostrip = pcbStack;
rrMicrostrip.Layers{1} = totaltop;
rrMicrostrip.BoardThickness = 0.0016;
rrMicrostrip.BoardShape = antenna.Rectangle(Center=[0
0.02],Length=0.4,Width=0.22);
rrMicrostrip.Layers = {totaltop d ground};
feedloc = [[0 58e-3 3 1]; [26e-3 13e-3 3 1]];
rrMicrostrip.FeedLocations = feedloc;
rrMicrostrip.FeedDiameter = 0.005/8;
rrMicrostrip.FeedViaModel = "strip";
rrMicrostrip.FeedPhase = 0;
show(rrMicrostrip)

```

NumTriangles: 2778
NumTetrahedra: 6570
NumBasis:
MaxEdgeLength: 0.011364
MeshMode: manual



شکل ۴-۴ ایجاد آنتن PCB از هندسه

۴-۵- آنالیز آنتن

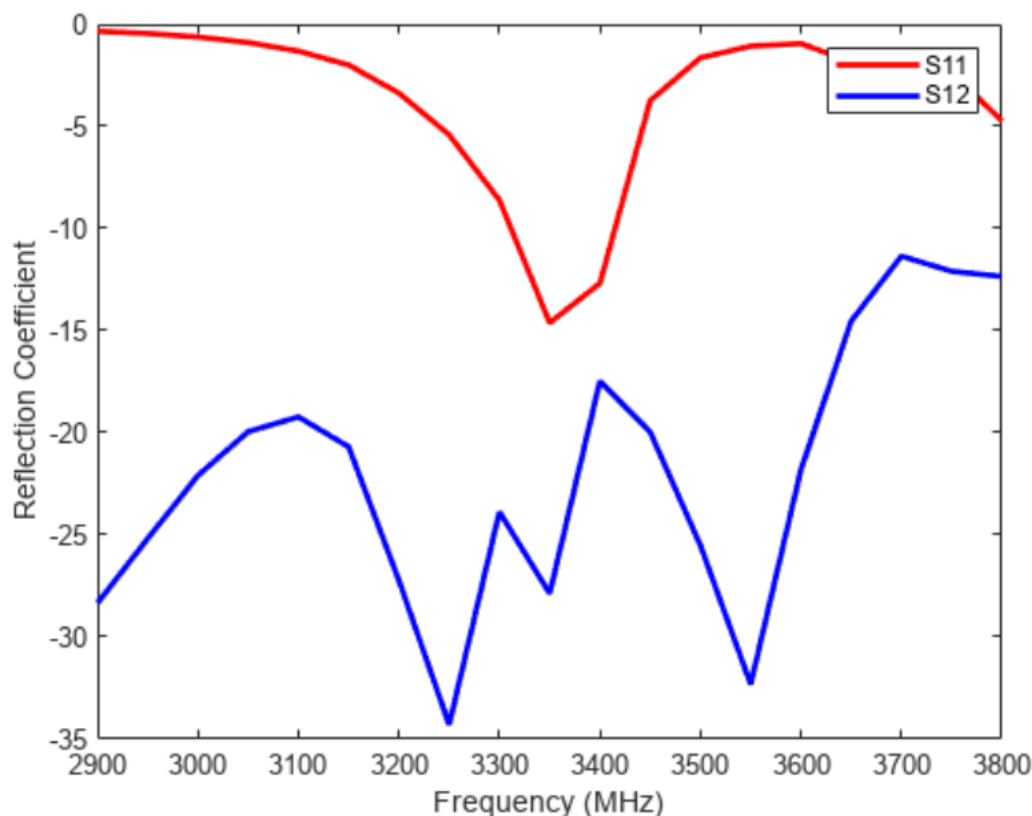
ویژگی FeedVoltage شی pcbStack را روی [۰ ۱] تنظیم می کنیم تا یک پورت از بین دو پورت تغذیه شود. از این مقدار برای بدست آوردن مشخصات پورت مجموع استفاده می کنیم. برای دریافت مشخصات پورت تفاوت، ویژگی FeedVoltage را روی [۱ ۰] قرار می دهیم.

```
rrMicrostrip.FeedVoltage = [1 0];
```

با استفاده از عملکرد مش (جعبه ابزار آنتن) آرایه را به صورت دستی می کنیم. برای داشتن مش

ریزتر، ویژگی MaxEdgeLength را روی یک هشتم طول موج قرار می دهیم.

```
plotfrequency = 3.3*1e9;  
lambda = 3e8/plotfrequency;  
mesh(rrMicrostrip,MaxEdgeLength=lambda/8);
```



شکل ۴-۵ ضریب انعکاس

۴-۶ محاسبه s-parameter

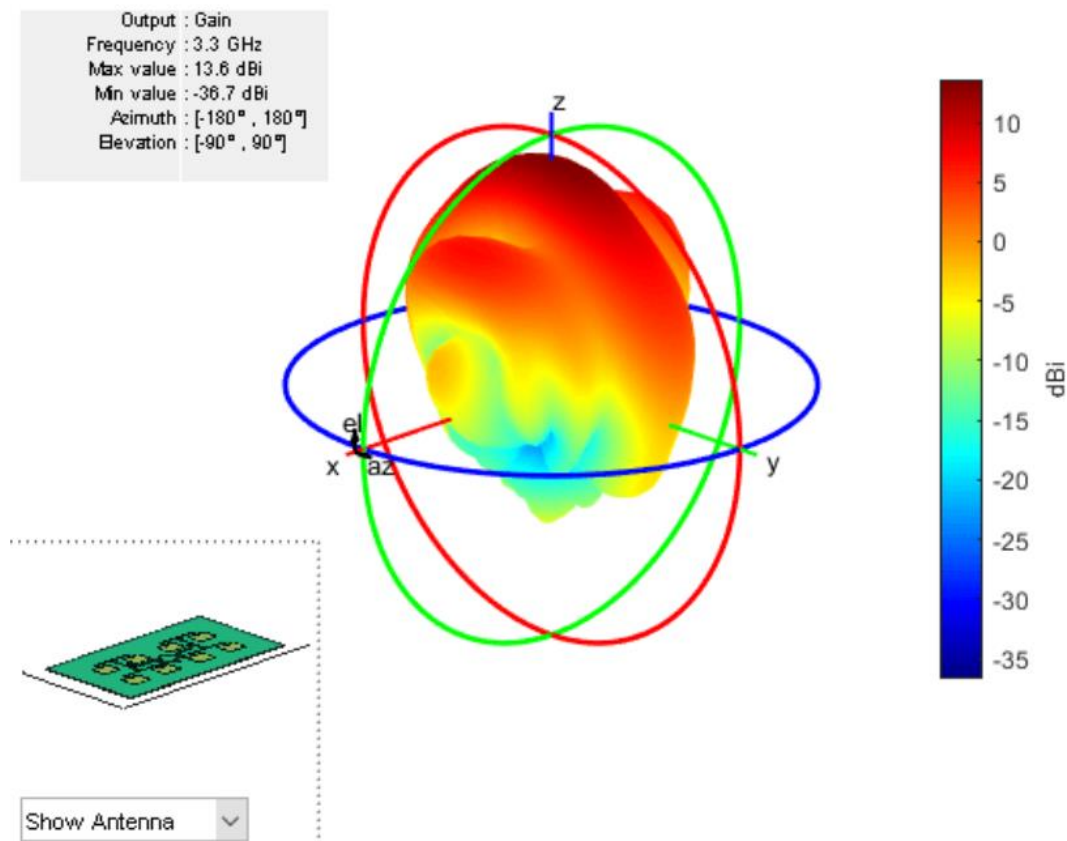
حافظه مورد نیاز برای حل ساختار را با استفاده از تابع memoryEstimate محاسبه می کنیم.
`memEst = memoryEstimate(rrMicrostrip, 3e9)`

با استفاده از تابع sparameters (Antenna Toolbox) پارامترهای S را محاسبه می کنیم. برای صرفه جویی در زمان شبیه سازی، از نتایج موجود در فایل RRmicrostripdata MAT استفاده می کنیم. برای محاسبه پارامترهای S بدون استفاده از فایل MAT، متغیر plotSparameters را روی true قرار می دهیم.

```
frequencyRange = (2.5:0.1:3.5)*1e9;
calculateSparameters = false;
if calculateSparameters
    s = sparameters(rrMicrostrip, frequencyRange);
    rfplot(s)
end
```

فایل sBandmonopulse MAT را بارگیری می کنیم، که حاوی داده های شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ذخیره شده در متغیرها است. برای رسم پارامترهای S از متغیر S11_simulated استفاده می کنیم.

```
load sBandmonopulse.mat
figure(Name="S-parameters")
plot(simufreq,S11_simulated,"r",Linewidth=2)
hold on
plot(simufreq,S12_simulated,"b",Linewidth=2)
hold off
legend("S11","S12")
xlabel("Frequency (MHz)")
ylabel("Reflection Coefficient")
```

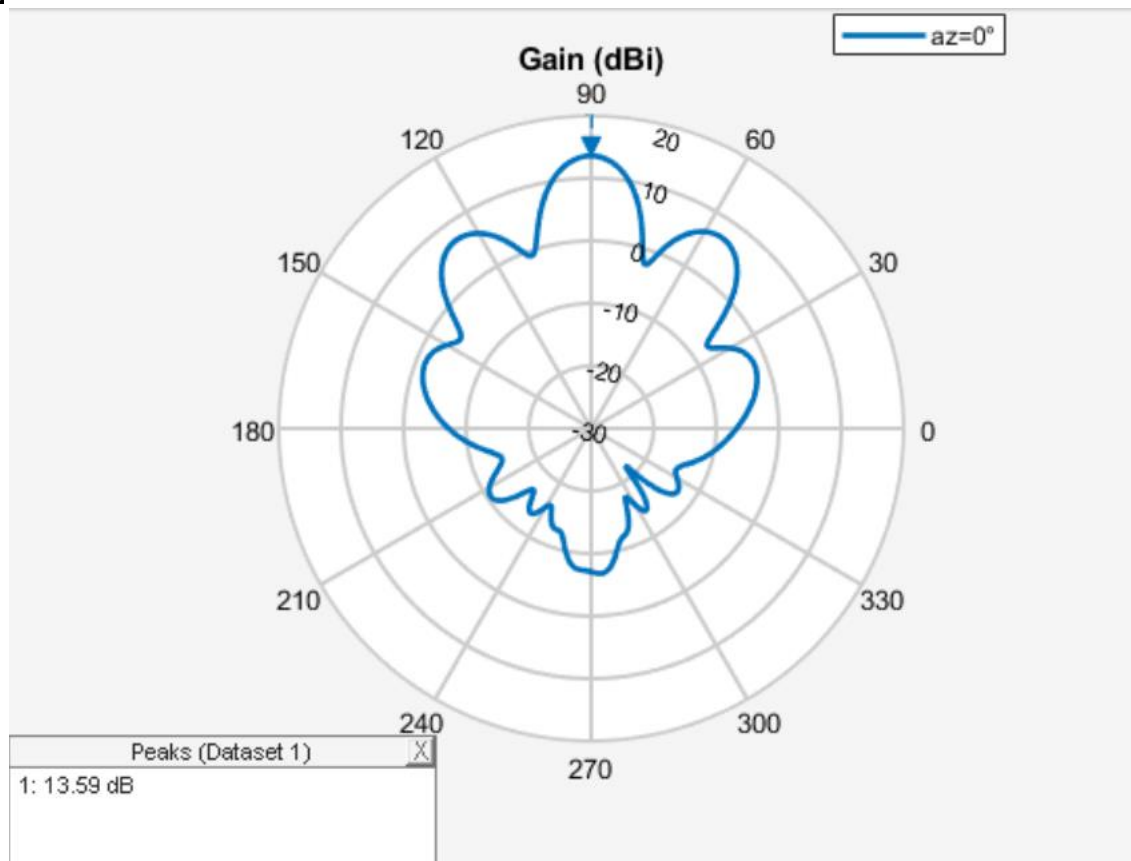


شکل ۴-۶ پترن گین

۴-۷- رسم پترن تشعشی

با استفاده از تابع الگو (جعبه ابزار آنتن) الگوی تابش سه بعدی را در فرکانس ۳.۳ گیگاهرتز ترسیم می‌کنیم.

```
figure
pattern(rrMicrostrip,3.3e9)
```



شکل ۴-۷ پترن تشعشعی

با استفاده از تابع الگو، الگوی تابش دو بعدی را در زاویه ارتفاع ۰ درجه رسم می کنیم.

```
figure
pattern(rrMicrostrip,plotfrequency,0,0:1:360)
```

۴-۸- نتیجه گیری

آنتن طراحی شده دارای حداکثر بهره مجموع پورت ۱۵.۳ دسی بل و عمق نول ۲۰ دسی بل در پورت اختلاف است. کارایی آرایه آنتن را با ترسیم ویژگی های شبیه سازی شده تایید کردیم. آنتن آرایه ای طراحی شده یک کاندید امیدوارکننده و خوب برای رادار ردیابی تک پالس در باند S است.

- [1] D. M. Vavriv et al., "Development of Surveillance and Tracking Radar," 2006 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2006, pp. 26-31.
- [2] M. Kavitha and C. K. S. Vijjila, "Design Analysis of Monopulse Antenna," 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2021, pp. 19-23.
- [3] S. S. Sekretarov, D. M. Vavriv and L. V. Shevtsova, "Slotted Waveguide Antenna Arrays for Airborne Radars," 18-th international conference on microwaves, RADAR and wireless communications, 2010, pp. 1-4.
- [4] S. Dey, N. Sai Kiran and S. Dey, "Microstrip and SIW based Monopulse Comparators for Microwave and Millimeter Wave Applications," 2020 International Symposium on Antennas & Propagation (APSYM), 2020, pp. 114-117.
- [5] S. Uysal and J. Watkins, "Microwave and millimetre wave monopulse comparators," IEE Colloquium on Multi-Octave Microwave Circuits, 1991, pp. 1/1-1/6.
- [6] Kian Sen Ang, Y. C. Leong and Chee How Lee, "A wide-band monopulse comparator with complete nulling in all delta channels throughout sum channel bandwidth," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, no. 2, pp. 371-373, Feb. 2003.
- [7] Kumar, Hemant, and Girish Kumar. "Microstrip Antenna Array with Ratrace Comparator at X-Band for Monopulse Tracking Radar." In 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 513–14. Fajardo, PR, USA: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/APS.2016.7695965>