

طراحی و شبیه‌سازی سامانه شبه‌اپتیک عبوری جهت تصویربرداری موج میلی‌متری

فائزه جدیدی^۱، عبدالله اسلامی مجد^{۲*}، علیرضا عرفانیان^۳، سید حسین محسنی ارمکی^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲ و ۳- استادیار، ۴- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۸/۰۲/۲۷، پذیرش: ۹۸/۰۸/۰۴)

چکیده

در این مقاله یک آنتن شبه‌اپتیک تصویربرداری موج میلی‌متری در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز در باند W طراحی شده است. سامانه تصویربرداری طراحی شده جهت تشخیص اشیای فلزی در فاصله ۵ متری به تفکیک پذیری کمتر از ۳۰ میلی‌متر نیاز دارد. این سامانه غیرفعال شامل ترکیبی از یک عدسی دی‌الکتریک (اپتیک اولیه) جهت کانونی کردن تابش و یک هورن هرمی (اپتیک ثانویه) با دیواره‌های فلزی بازشونده برای هدایت و تزویج مناسب تابش کانونی شده، به آشکارساز است. پارامترهای کلی این سامانه با استفاده از روش اپتیک هندسی محاسبه شده است. در ادامه ترکیبی از روش باریکه گاوسی و ماتریس انتقال پرتو ABCD برای تجزیه و تحلیل آنتن عدسی جهت یافتن محل و اندازه هورن تغذیه استفاده شده است. از نرم‌افزار قدرتمند طراحی اپتیک ZEMAX برای طراحی عدسی و تصدیق نتایج طراحی بر اساس ردیابی پرتو استفاده شده است. در طراحی و شبیه‌سازی عدسی دی‌الکتریک، ماده پلی‌اتیلن بسیار چگال (HDPE) با قطر دهانه ۶۵۰ میلی‌متر به کار رفته است. سپس یک هورن هرمی بهینه با بهره ۱۸/۹ دسی‌بل در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز طراحی شده است. شبیه‌سازی هورن و بررسی نتایج آن با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری FEKO و CST انجام شد. نتایج شبیه‌سازی آنتن هورن نشان می‌دهد که ترکیب آن با عدسی دی‌الکتریک مناسب است و روش تلفیقی (اپتیک هندسی، باریکه گاوسی و ماتریس ABCD) برای طراحی سامانه شبه‌اپتیک شامل عدسی و هورن برای تصویربرداری با الزامات موردنظر دقیق، ساده و کارآمد است.

کلیدواژه‌ها: تصویربرداری موج میلی‌متری، آنتن شبه‌اپتیک، طراحی اپتیک و روش باریکه گاوسی.

Design and Simulation of a Refractive Quasi-Optical System for Millimeter Wave Imaging

F. Jadidi, A. Eslami Majd*, A.R. Erfaniyan, S. H. Mohseni Armaki

Maleke-Ashtar University of Technology
(Received: 17/05/2019; Accepted: 26/10/2019)

Abstract

In this paper, a quasi-optical millimeter wave imaging antenna at central frequency of 94 GHz in W-band is designed. The designed imaging system requires resolution less than 30 mm at distance of 5 meters to recognize metal objects. This passive system consists of a combination of a dielectric lens (primary optics) to focus the radiation and a pyramidal horn (secondary optics) with open metal walls to properly direct and couple the focal radiation to the detector. The general parameters of this system are calculated using the geometrical optics method. Then the combination of Gaussian beam method and ABCD ray transfer matrix is used to analyze the lens antenna to find the location and size of the feeding horn. The powerful optical design software ZEMAX was used to design the lens and to verify the design results based on ray tracing. The designed dielectric lens is made of High Density Polyethylene (HDPE) with a diameter of 650 mm. Then, an optimized pyramidal horn with gain of 18.9 dB at center frequency of 94 GHz is designed. The simulation of the horn and investigation of its results performed using the FEKO and CST commercial softwares. The simulation results of the pyramid horn antenna indicate that its combination with dielectric lens is appropriate and the hybrid method (geometrical optics, Gaussian beam and ABCD matrix) to design the quasi-optical system, including the lens and the horn antenna for imaging with considered requirements, is accurate, simple and efficient.

Keywords: Millimeter Wave Imaging, Quasi-Optic Antenna, Optical Design, Gaussian Beam Method.

تصویربرداری در فرکانس ۲۰۰ گیگاهرتز با استفاده از یک بازتابنده بیضوی که قطر مؤثر دهانه ورودی آن ۶۸/۲ سانتی‌متر بود و توانایی تصویربرداری با قدرت تفکیک ۱۷ میلی‌متر در فاصله ۳ متری را داشت، ساخته شد. در این سامانه از آینه به‌عنوان جاروگر استفاده شده است [۱۱]. در نمونه‌ای دیگر از یک آنتن کاسگرین با قطر ۳۰ سانتی‌متر که توانایی تصویربرداری از شیء در فاصله ۳ متر با تفکیک‌پذیری ۳۸ میلی‌متر دارد، استفاده شده است [۱۲]. ساخت سامانه تصویربرداری عبوری نیز از شیء در فاصله ۳/۵ متری با تفکیک‌پذیری ۲۸ میلی‌متر با استفاده از عدسی از جنس HDPE^۳ با قطر دهانه ورودی برابر با ۴۳ سانتی‌متر در فرکانس ۸۹ گیگاهرتز [۱] و سامانه‌ای مشابه با تفکیک‌پذیری ۳۵ میلی‌متر در فاصله ۳/۵ متری گزارش شده است [۵]. ساخت سامانه‌ای عبوری از جنس HDPE با قطر ورودی ۵۰ سانتی‌متر در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز نیز که از آرایه یک‌بعدی گیرنده استفاده می‌کند، در سال ۲۰۱۱ گزارش شده است [۱۳]. همچنین یک سامانه تصویربرداری که از عدسی تفلون با قطر ۵۷ سانتی‌متر ساخته شده است، در فرکانس ۳۵ گیگاهرتز از شیء در فاصله ۲/۸ متر با تفکیک‌پذیری ۴۰ میلی‌متر تصویربرداری می‌کند [۱۴]. در سال ۲۰۱۱ نیز یک سامانه تصویربرداری آرایه کانونی با استفاده از عدسی از جنس آکرلیک^۴ با قطر ۲۰ سانتی‌متر با تفکیک‌پذیری ۲ سانتی‌متر در فاصله ۱ متر، در فرکانس ۹۵-۷۵ گیگاهرتز ساخته شده است [۱۵].

سامانه‌های اپتیکی طراحی شده برای دریافت تابش موج میلی‌متری، سامانه‌های شبه‌اپتیک^۵ هستند. بسیاری از اجزای این سامانه‌ها مشابه با سامانه‌های اپتیک هندسی است، اما تجزیه و تحلیل انتشار باید اصلاح شود تا اثرات پراش لحاظ شود، زیرا در این ناحیه، طول موج تابش با ابعاد قطعات اپتیکی قابل مقایسه است. اپتیک هندسی با قوانین انتشار پرتو که نشان‌دهنده یک دسته پرتو مستقیم است، شامل روش‌های کاملی برای تحلیل سامانه‌های اپتیکی است و در آن ابعاد تمام قطعات اپتیکی (مانند عدسی‌ها، آینه‌ها و دهانه‌ها) نسبت به طول موج به اندازه‌ای بزرگ است که می‌توان از اثرات طول موج چشم‌پوشی کرد [۱۶]. در شرایطی که ابعاد سامانه در حد طول موج باشد (میدان نزدیک دهانه یا آنتن)، فرمول‌بندی کاملی برای تحلیل رفتار پرتو و پراش نیاز است و انجام محاسبات دقیق در سامانه، نسبتاً وقت‌گیر است. شبه‌اپتیک فاصله این دو مورد حدی (قراردادی) است و فرمول‌بندی آن شامل اثرات پراش در این ناحیه است. در حقیقت این ناحیه به این دلیل شبه‌اپتیک نامیده شده است که ناحیه بین اپتیک و الکترونیک است و نوع ساده‌شده رفتار پیچیده‌تر اپتیک فیزیکی را نشان می‌دهد [۱۷].

۱. مقدمه

امروزه سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری^۱ (MMW) کاربردهای بسیاری دارد. این سامانه توانایی تصویربرداری در آب‌وهوای نامساعد را دارد و امکان شناسایی اشیاء مخفی زیر لباس، پلیمرها و ... را فراهم می‌کند [۱]. تهدیدهای جدید شامل تفنگ‌های پلاستیکی و سرامیکی، چاقوها و ... توسط آشکارسازهای فلزی قابل شناسایی نیستند. آشکارسازهای فلزی تنها می‌توانند اهداف فلزی مانند ابزارهای معمولی و چاقو را شناسایی کنند. از سوی دیگر اثربخشی این آشکارسازها بسته به مقدار، جهت و نوع فلز متفاوت است. علاوه بر این، آشکارسازهای فلزی تفاوتی بین اقلامی مانند عینک، کمر بند، کلید و ... با تهدیدات واقعی را تشخیص نمی‌دهند و این امر منجر به هشدارهای کاذب می‌شود [۲]. مزیت مهم تصویربرداری موج میلی‌متری نسبت به تصویربرداری مرئی و مادون قرمز این است که امواج میلی‌متری از مه، دود، ابر و مواد جامد مانند یخ، بتن یا پارچه عبور می‌کنند و ائتلاف بسیار کمی دارند. علاوه بر این، این سامانه‌ها در مقایسه با رادار نیازی به فرستنده ندارند [۳].

امواج میلی‌متری در محدوده طول موج ۱ تا ۱۰ میلی‌متر طیف الکترومغناطیسی قرار دارند که متناظر با محدوده فرکانسی ۳۰-۳۰۰ گیگاهرتز است [۴]. با توجه به نظریه تابش جسم سیاه، اجسام در محدوده موج میلی‌متری تابش حرارتی دارند و شدت تابشی آن‌ها به گسیلندگی و دمای جسم بستگی دارد [۵].

با توجه به عبوردهی اتمسفر دو باند فرکانسی بهینه، باند Q (فرکانس ۳۵ گیگاهرتز) و باند W (فرکانس ۹۴ گیگاهرتز) برای استفاده در تصویربرداری موج میلی‌متری وجود دارد. باند W در مقایسه با باند Q کیفیت تصویر و تفکیک‌پذیری مکانی^۲ بهتری دارد که توسط حد پراش کنترل می‌شود. فاصله سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری از هدف، معمولاً چندین متر است. البته تحقیقات اندکی در مورد عملکرد تصویربرداری موج میلی‌متری در فواصل نزدیک گزارش شده است [۶].

تاریخچه فناوری موج میلی‌متری به سال ۱۸۹۰ برمی‌گردد، اما اولین فعالیت‌های مهم در این زمینه در دهه ۱۹۳۰ انجام شد [۷]. دیچفیلد و انگلند [۸]، اولین سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری در بریتانیا را در سال ۱۹۵۵ ارائه نمودند. از آن زمان تاکنون، این فناوری با پیشرفت‌های سریع در سال‌های اخیر ادامه یافته است [۹]. می‌توان از عدسی دی‌الکتریک یا بازتابنده در ساخت سامانه‌های تصویربرداری استفاده کرد. به‌عنوان مثال ساخت سامانه بازتابی تصویربرداری با قطر ۱ متر در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز گزارش شده است [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ نیز یک سامانه

^۳ High Density Polyethylene^۴ Acrylic Material^۵ Quasioptical^۱ Millimeter Wave^۲ Spatial Resolution

تغذیه در پشت دهانه عدسی قرار می‌گیرد، انسداد دهانه در این چیدمان حذف می‌شود و ارتباط مستقیم از تغذیه تا فرستنده یا گیرنده برقرار می‌شود. طراحی عدسی‌ها با درجه‌های آزادی موجود انجام می‌شود. یک عدسی دی‌الکتریک یکنواخت دارای دو سطح است و معادل با دو بازتابنده است، زیرا هر سطح یک درجه آزادی دارد. شکل دادن هر دو سطح به طراح اجازه می‌دهد که یک عدسی با ابیراهی اصلاح‌شده طراحی نماید [۱۹].

در این پژوهش پارامترهای اولیه سامانه با استفاده از تلفیق روش اپتیک هندسی، اپتیک گاوسی و ماتریس ABCD با حذف ریاضی پیچیده، با سرعت و دقت کافی محاسبه شده است و طراحی تمام سامانه شبه‌اپتیک موج میلی‌متری شامل اپتیک اولیه (عدسی دی‌الکتریک) و اپتیک ثانویه (هورن) متناسب با یکدیگر انجام شده است که برد بیشتری نسبت به موارد ذکر شده داشته و درعین حال تفکیک‌پذیری مناسبی را ارائه می‌دهد. این سامانه با در نظر گرفتن الزامات سامانه‌ای، مانند حجم که تعیین‌کننده طول سامانه اپتیکی و در حقیقت عدد کانونی (F/# برابر با ۱/۱۵) است، جهت شناسایی اشیای پنهان زیرپوشش در فاصله ۵ متری با تفکیک‌پذیری کمتر از ۳۰ میلی‌متری، با استفاده از روش تلفیقی ذکر شده، طراحی شده است. شبیه‌سازی عدسی دی‌الکتریک این سامانه با در نظر گرفتن پارامترهای اولیه، توسط نرم‌افزار ZEMAX صورت گرفته و بهینه‌سازی شده است.

همچنین در این پژوهش هورن تغذیه مناسب برای عدسی، با در نظر گرفتن ایجاد روشنایی مناسب روی عدسی و تقارن الگوی بهینه با استفاده از نرم‌افزار FEKO و CST طراحی و نتایج آن بررسی شده است، که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

از آنجایی که ساخت آرایه کانونی با استفاده از هورن‌ها بسیار هزینه‌بر است، می‌توان با استفاده از روش جاروب مکانیکی که در آن تمام سامانه شبه‌اپتیک صفحه شیء را جاروب می‌کند یا با استفاده از روش اپتومکانیک که از یک بازتابنده در سامانه استفاده می‌شود، صفحه شیء را جاروب کرد. در اینجا با استفاده از یک بازتابنده که قبل از عدسی دی‌الکتریک قرار می‌گیرد، می‌توان جاروب را انجام داد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. طراحی پارامترهای کلی سامانه

سامانه شبه‌اپتیک عبوری از عدسی و هورن تشکیل شده است. در این سامانه، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، با کانونی شدن پرتوی ورودی توسط عدسی شبه‌اپتیک یک لکه کوچک به دست می‌آید که باید در مرکز فاز هورن قرار بگیرد تا با استفاده از موج‌بر به آشکارساز تزویج شود. مرکز فاز هورن

میدان دید، تفکیک‌پذیری مکانی^۱ و حساسیت حرارتی از پارامترهای اصلی سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری هستند که میدان دید و تفکیک‌پذیری مکانی توسط زیرسامانه شبه‌اپتیک مشخص می‌شوند. طراحی شبه‌اپتیک سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری عمدتاً به سه بخش طراحی پارامترهای کل سامانه شبه‌اپتیک، طراحی المان کانونی‌کننده و طراحی آنتن تغذیه تقسیم می‌شود. بهترین تطابق بخش‌های مختلف سامانه می‌تواند با طراحی پارامترها، المان کانونی‌کننده و آنتن تغذیه با در نظر گرفتن یکدیگر، به دست آید. مواردی که باید در طراحی پارامترهای کل سامانه در نظر گرفته شوند شامل میدان دید، برد تصویربرداری، طرح آنتن^۲ و روش جاروب^۳ هستند. المان کانونی‌کننده می‌تواند عدسی دی‌الکتریک یا بازتابنده باشد. عدسی‌های دی‌الکتریک زاویه جاروب بزرگ‌تر فراهم می‌کنند و به دقت ماشین‌کاری کمتری نسبت به بازتابنده‌ها نیاز دارند، بنابراین، گزینه مناسبی برای المان کانونی‌کننده در ناحیه موج میلی‌متری هستند. البته ماده عدسی در این ناحیه طول‌موجی، باید اتلاف و جرم ویژه کم و ثابت دی‌الکتریک متوسطی داشته باشد (۲-۴). پلی‌استیرن^۴، پلی‌اتیلن^۵، تفلون^۶ و رکسولیت^۷ از موادی هستند که معمولاً در ناحیه موج میلی‌متری استفاده می‌شوند. پس از طراحی پارامترهای شبه‌اپتیک، عدسی مناسب برای تشکیل لکه کانونی کوچک باید طراحی شود. همچنین نوع و طراحی آنتن‌های تغذیه اثر مهمی بر عملکرد کلی سامانه دارند. معمولاً آنتن‌های هورن، روشنایی مناسبی برای عدسی‌ها یا بازتابنده‌ها ایجاد می‌کنند [۱۴ و ۱۸].

در سامانه‌های شبه‌اپتیک، پرتوی فضای آزاد که توسط عدسی متمرکز شده است، از طریق آنتن هورن به سمت موج‌بر، که در آن آشکارسازها نصب می‌شوند، هدایت می‌شود. آنتن هورن (که نوعی موج‌بر بازشونده^۸ است)، برای انتقال یا دریافت بهتر تابش به‌از فضای آزاد به موج‌بر تزویج^۹ می‌شود. آنتن هورن، تطبیق امپدانس بهتری به فضای آزاد را فراهم می‌کند، زیرا نسبت به موج‌بر دهانه بزرگ‌تری دارد. بنابراین، درک کامل ویژگی‌های انتقال و تابش آنتن‌های هورن در تجزیه و تحلیل سامانه‌های شبه‌اپتیک اساسی است [۱۶].

در عدسی‌ها، مانند بازتابنده‌ها، از فضای آزاد به‌عنوان شبکه انتقال انرژی به هورن تغذیه استفاده می‌شود. از آنجاکه هورن

¹ Spatial Resolution

² Antenna Arrangement

³ Scan

⁴ Polystyrene

⁵ Polyethylene

⁶ Teflon

⁷ Rexolite

⁸ Flared Sections

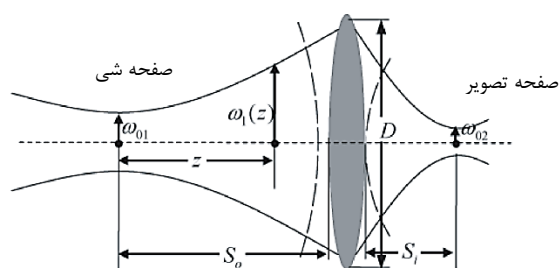
⁹ Couple

بنابراین، در اولین قدم می‌توان با تعیین اندازه قطر دهانه عدسی با در نظر گرفتن تفکیک‌پذیری مکانی در فاصله موردنظر و الزامات سامانه به طراحی سایر مؤلفه‌ها پرداخت و از اطلاعات به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی بهره برد.

۲-۲. طراحی عدسی شبه‌اپتیک

روش‌های طراحی شبه‌اپتیک سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری شامل اپتیک هندسی، روش باریکه گاوسی، ماتریس انتقال ABCD و روش ترکیبی است. روش باریکه گاوسی، روشی برای توصیف ویژگی‌های انتشار موج الکترومغناطیسی است و با در نظر گرفتن سرعت محاسبات، پیچیدگی و دقت، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد [۱۸].

محاسبه عملکرد ابزارهای کانونی‌کننده، مانند عدسی، در فرمول‌های باریکه گاوسی امکان‌پذیر است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، موج الکترومغناطیسی تابش شده از صفحه شی، طبق قانون گاوسی منتشر می‌شود و توسط عدسی دریافت می‌شود. عدسی جبهه فاز موج الکترومغناطیسی را در جهت انتشار عوض می‌کند تا توزیع میدان جدید توسط آنتن گیرنده دریافت شود [۲۱].



شکل ۳. طراحی زیرسامانه شبه‌اپتیک با استفاده از روش باریکه گاوسی [۲۱].

اگر فاصله نقطه میدان تا محور z برابر r، شعاع باریکه گاوسی تا جایی که دامنه میدان 1/e محور است برابر w، انحنای جبهه فاز کروی برابر R و طول موج برابر λ باشد، آنگاه توزیع میدان بهنجار به‌عنوان تابعی از r در صفحه‌ای با z ثابت، برابر است با:

$$E(r)/E(0) = \exp[-r^2/w(z)^2] \quad (2)$$

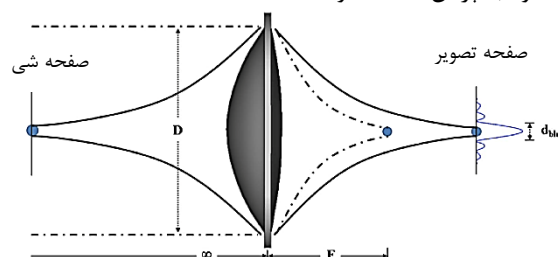
مکان شعاع کمینه باریکه در z = 0 است و این شعاع w₀ کمر باریکه نامیده می‌شود. رابطه بین w و w₀ برابر است با:

$$w = w_0 [1 + (\lambda z / \pi w_0^2)^2]^{1/2} \quad (3)$$

انحنای جبهه فاز کروی R در معادله زیر صدق می‌کند [۱۴]:

$$R = z [1 + (\pi w_0^2 / \lambda z)^2] \quad (4)$$

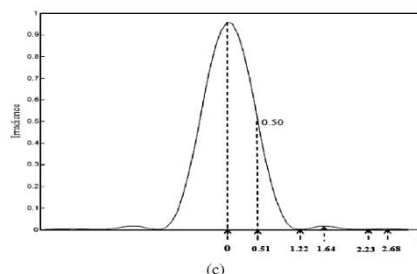
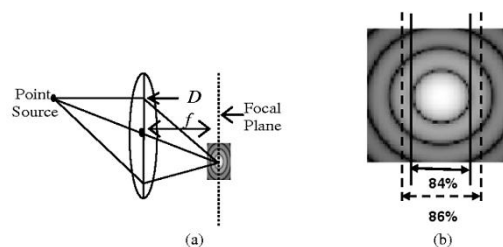
نقطه‌ای است که به نظر می‌رسد یک آنتن از آن موج‌های کروی را منتشر می‌کند. پرتوی کانونی‌شده به‌دلیل وجود ابیراهی^۱ و پراش عدسی، در صفحه تصویر گسترده و موجب تار شدگی تصویر می‌شود. ابیراهی ناشی از هندسه کروی سطوح عدسی است که منجر به انحراف شکل تصویر از حالت ایده‌آل می‌شود و پراش یک ویژگی طبیعی است که به پخش شدن تابش هنگام عبور از دهانه اشاره دارد و همواره در هر عدسی شبه‌اپتیک وجود دارد. اگر عدسی ابیراهی زیادی داشته باشد، اثر پراش نادیده گرفته می‌شود و اگر پراش بر ابیراهی غلبه داشته باشد، سامانه محدود به پراش است [۶ و ۲۰].



شکل ۱. نمای از عدسی شبه‌اپتیک که پرتوی ورودی از صفحه شی را بر صفحه تصویر کانونی می‌کند [۶].

تفکیک‌پذیری مکانی در کاربردهای تصویربرداری، در نهایت محدود به پراش است. زاویه محدود به پراش متناظر با حلقه‌های دایره‌ای الگوی پراش است که شامل ۸۴٪ توزیع برتابندگی^۲ می‌شود و در شکل (۲) نشان داده شده است. تفکیک‌پذیری سامانه اپتیکی طبق معیار رایلی^۳ برابر است با [۲۰]:

$$\theta_R = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1)$$



شکل ۲. الف) تصویر یک منبع نقطه‌ای، ب) تصویر دوبعدی توزیع برتابندگی ناشی از پراش (الگوی ایری)، ج) سطح مقطع الگوی ایری، p فاصله شعاعی بهنجار شده از منبع است [۶].

^۱ Aberration

^۲ Irradiance Distribution

^۳ Raleigh's Criterion

بنابراین، به‌منظور طراحی سامانه، ابتدا پارامترهای کل سامانه با استفاده از قوانین اپتیک هندسی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از فرمول به‌دست‌آمده از ترکیب روش باریکه گاوسی و ماتریس ABCD برای عدسی کانونی‌کننده، مکان تصویر تشکیل‌شده که نشان‌دهنده محل قرارگیری مرکز فاز هورن است و اندازه لکه تشکیل‌شده که نشان‌دهنده ابعاد دهانه هورن است، به‌دست می‌آید.

۳-۲. طراحی آنتن هورن تغذیه

آنتن به‌عنوان دستگاه انتقال یا مبدل بین موج هدایت‌شده و موج فضای آزاد یا برعکس تعریف می‌شود. آنتن‌هایی که در سامانه‌های شبه‌اپتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، آنتن‌های دهانه‌ای هستند که مشخصه‌های تابش صرفاً از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طول دهانه مشخص می‌شود، که دهانه بیشتر یا حداقل برابر با طول موج است. موج بر گشوده (آنتن هورن) تابش را از فضای آزاد به آشکارساز انتهای موج‌بر تزویج می‌کند و با دهانه بزرگ (در مقایسه با طول موج)، تطبیق امپدانس بهتری به فضای آزاد نسبت به یک موج‌بر ساده ایجاد می‌کند [۱۶].

آنتن تغذیه نسبت به یک منبع نقطه‌ای بسیار بزرگ‌تر است. طبق اصل هویگنس هر نقطه در روی جبهه موج در حال انتشار (که می‌تواند در دهانه هورن تغذیه قرارگرفته باشد) می‌تواند به‌عنوان یک منبع ثانویه که موج کروی تابش می‌کند، در نظر گرفته شود. طبق نظریه کلر در پراش، انتشار موج الکترومغناطیسی با اپتیک هندسی متفاوت است و هنگامی که موج با مانع یا ناپیوستگی روبرو می‌شود، پراش اتفاق می‌افتد [۲۷].

در این سامانه، آنتن تغذیه یک مانع است و باید اثرات پراش در نظر گرفته شود، بنابراین، تحلیل الکترومغناطیس کاملی باید صورت پذیرد. آنتن هورن اساساً یک بخش فشرده از موج‌بر است. موج‌برها موج منتشرشده را در یک مسیر انتخاب‌شده هدایت می‌کنند، موج از طریق فضای آزاد درون موج‌بر هدایت می‌شود و توسط دیوارهای فلزی هدایت‌کننده محدود می‌شود. موج‌برهایی که معمولاً در سامانه‌های میلی‌متری و زیر میلی‌متری استفاده می‌شوند، می‌توانند سطح مقطع مستطیلی یا دایره‌ای داشته باشند [۱۶]. انواع مختلف آنتن هورن با سطح مقطع و طراحی‌های متفاوت وجود دارند. در مطالعه آنتن هورن برای ساده‌سازی تحلیل از قضیه معکوس‌پذیر ریلی^۲ استفاده می‌شود. این نظریه بیان می‌کند که اگر یک آنتن در حال انتقال یا دریافت تابش باشد، ویژگی‌های الگوی تابش در هر دو مورد یکسان است

همچنین پهنای باریکه نصف توان^۱ (HPBW) پهنای کل باریکه در نصف شدت بیشینه است. برای یک باریکه گاوسی داریم [۲۲]:

$$HPBW = \sqrt{2 \ln(2)} w \quad (۵)$$

برای یافتن مکان و اندازه کمر باریکه در ناحیه دوم می‌توان از ماتریس عمومی ABCD استفاده کرد. ماتریس پرتو یا ABCD، در عناصر اپتیکی روی جابجایی و شیب پرتو ورودی (r_{in} و θ_{in}) در صفحه ورودی عمل می‌کند و آن را طبق معادله ماتریس به $(r_{out}$ و $\theta_{out})$ در صفحه خروجی تبدیل می‌کند [۲۳]:

$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

ماتریس انتقال برای یک عدسی نازک به‌صورت رابطه (۷) است:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & S_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & S_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که S_o فاصله عدسی تا صفحه شیء، S_i فاصله تصویر تا عدسی و f فاصله کانونی عدسی است. در نهایت می‌توان مکان (S_i) و اندازه کمر باریکه گاوسی خروجی از عدسی (w_{out}) را با ترکیب این ماتریس و استفاده از پارامترهای باریکه گاوسی، به‌دست آورد:

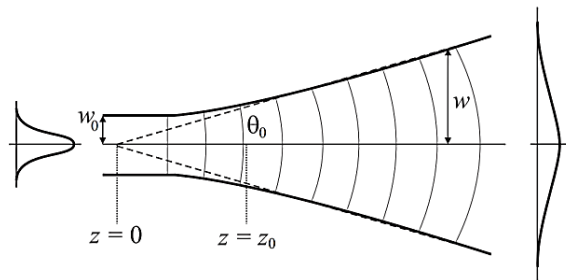
$$\frac{S_i}{f} = 1 + \frac{S_o/f - 1}{(S_o/f - 1)^2 + z_c^2/f^2} \quad (۸)$$

$$w_{out} = \frac{w_{in}}{[(S_o/f - 1)^2 + z_c^2/f^2]^{0.5}} \quad (۹)$$

که w_{in} اندازه شعاع باریکه گاوسی در صفحه جسم و z_c فاصله هم‌کانونی باریکه گاوسی ($z_c = \pi w_{in}^2 / \lambda$) است [۲۴].

حال با به‌دست‌آوردن w_{out} در صفحه کانونی و انتخاب نوع هورن مورد استفاده می‌توان اندازه دهانه هورن را تعیین کرد [۲۵].

تابش هورن‌های میلی‌متری که پرتوهای تقریباً با شکل گاوسی تابش می‌کنند، را نیز می‌توان با استفاده از روش باریکه گاوسی تحلیل کرد [۱۷]. بنابراین، تابش از چنین وسیله‌ای را می‌توان این‌گونه نشان داد که از کمر یک باریکه گاوسی می‌آید (شکل ۴) [۲۶].

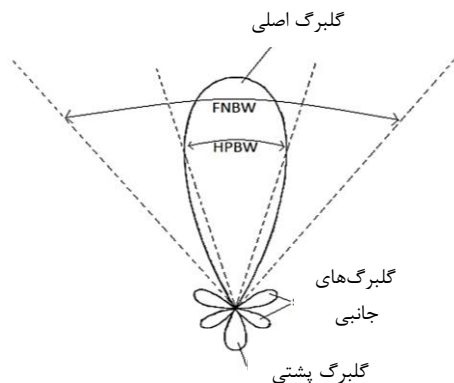


شکل ۴. مدل انتشار باریکه گاوسی [۲۶].

^۲ Rayleigh's Reciprocity Theorem

^۱ Half Power Beam Width

برحسب دسی‌بل بیان می‌شود. گلبرگ اصلی جهت حداکثر تابش است و گلبرگ‌های جانبی تابش را در جهت‌های ناخواسته نشان می‌دهند. بنابراین، اگر آنتن یک سیگنال از هدف موردنظر دریافت کند، مقداری تابش ناخواسته از مناطق دیگر خارج از هدف دریافت می‌کند. طراحان آنتن می‌خواهند تا حد امکان این گلبرگ‌های جانبی را به حداقل برسانند. معمولاً این‌گونه سبدهای در صفحات متعام E و H تصویر می‌شود که نزدیک بودن شکل آن‌ها به هم، نشان از تقارن الگوی بیشتر هورن دارد. نمایی دوبعدی از الگوی تابشی در شکل (۶) آمده است [۱۶].



شکل ۶. الگوی تابشی آنتن هورن [۱۶].

قدرت تفکیک‌پذیری آنتن توسط پهناى باریکه تعریف می‌شود که برای تشخیص بین دو منبع، برابر با عرض پهناى پرتوی نصف توان، یعنی نقطه ۳ dB، در الگوی آنتن است [۱۶]. نقطه ۳ dB متناظر با ۰/۷۰۷ دامنه میدان (نصف توان) و نقطه ۱۰ dB متناظر با ۰/۳۱۶ دامنه میدان است. بریدگی لبه^۲ به‌عنوان نسبت توان در لبه دهانه به توان روی محور تعریف می‌شود و برابر است با:

$$T_e = \frac{P(a)}{P(0)} \quad (11)$$

که a شعاع دهانه است. اگر بریدگی لبه برحسب دسی‌بل بیان شود، برابر است با:

$$T_e(\text{dB}) = -10 \log_{10}(T_e) \quad (12)$$

اگر دهانه توسط باریکه گاوسی با شعاع w روشن شود، بریدگی لبه برابر است با:

$$T_e(\text{dB}) \frac{20}{\ln(10)} \left(\frac{a}{w}\right)^2 \approx 8.686 \left(\frac{a}{w}\right)^2 \quad (13)$$

از آنجایی که روشنایی^۳ در سمت لبه‌های دهانه کاهش می‌یابد، ناحیه مؤثر آن می‌تواند کمتر از ناحیه فیزیکی آن در نظر گرفته شود. بازده روشنایی^۴ معیاری از نایک‌نواختی باریکه بر سطح دهانه است. بازده سرفرتگی نیز معیاری از درصد توان باریکه است که توسط دهانه قطع می‌شود [۲۵].

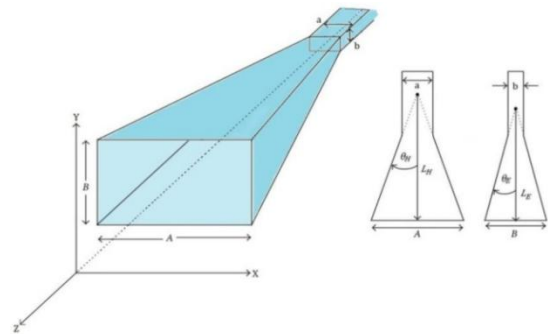
برای بهینه‌سازی عملکرد سامانه، مطابقت پهناى باریکه هورن

و در هر دو صورت جریان توان^۱ یکسان است [۱۶]. این قضیه در سراسر طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنتن هورن که در بسیاری از سامانه‌های شبه‌اپتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند فرستنده یا دریافت‌کننده تابش باشد.

دو مورد که بیشتر در سامانه‌های شبه‌اپتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند، هورن‌های مخروطی و هرمی هستند. هر هورنی مزایا و معایب خود را دارد که هنگام طراحی سامانه شبه‌اپتیک باید در نظر گرفته شود.

در این قسمت برای دستیابی به تقارن الگوی تابشی بهتر (ابراهی کمتر)، یک هورن هرمی طراحی شده است. ابعاد مختلف پهنا و گشودگی دهانه در صفحه‌های متعام برای جبران عدم تقارن شکل میدان دور در بین صفحات E و H استفاده می‌شود.

اساساً هورن‌های هرمی (شکل ۵)، بخش‌هایی از موج‌برهای مستطیلی هستند که در هر دو صفحه E و H با درجه‌های متفاوت باز شده‌اند. a و b عرض و ارتفاع موج‌بر تغذیه هورن (معمولاً موج‌بر WR-10 با ابعاد $2/54 \text{ mm} \times 1/27 \text{ mm}$ در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز) و A و B ، به ترتیب عرض (صفحه H) و ارتفاع (صفحه E) دهانه هستند [۱۶].



شکل ۵. هندسه هورن هرمی [۱۶].

برای عملکرد بهینه آنتن هورن هرمی به‌عنوان تغذیه گاوسی لازم است که $B/A = 0/7$ و برای دستیابی به بهترین تقارن گاوسی، اندازه کمر باریکه در دهانه هورن به‌صورت رابطه (۱۰) باشد [۲۵]:

$$w = 0.35A = 0.5B \quad (10)$$

آنتن هورن را می‌توان با جریان‌های معادل الکتریکی و مغناطیسی جایگزین کرد (اصل هم‌ارزی میدان). میدان‌های الکترومغناطیسی درون هورن باید معادله موج و شرایط مرزی را برآورده کنند. سپس با استفاده از تبدیل فوریه میدان دهانه، می‌توان الگوی میدان دور آنتن را محاسبه کرد.

الگوی تابشی آنتن هورن نمایشی از توزیع فضایی انرژی‌های تابشی آنتن به‌عنوان تابعی از موقعیت ناظران است. الگوی تابش اغلب با توجه به حداکثر مقدار آن به‌نجار می‌شود و شدت میدان

² Edge Taper

³ Illumination

⁴ Illumination (Or Taper) Efficiency

¹ Power Flow

همچنین در سامانه محدود به پراش، قطر لکه تصویر شامل

۸۴٪ انرژی و برابر است با:

$$B_{diff} = 2.44\lambda(F/\#) \quad (۱۶)$$

بنابراین، برای اینکه عدسی به تفکیک‌پذیری ۳۰ میلی‌متر در فاصله ۵ متر دست یابد، HPBW باید در این فاصله ۳۰ میلی‌متر باشد. طبق روش باریکه گاوسی، اندازه HPBW پرتو، ۱/۱۷ برابر شعاع باریکه است ($HPBW = \sqrt{2\ln(2)w}$). بنابراین، شعاع کمر باریکه در صفحه شیء، w_{0in} در فاصله ۵ متری برابر ۲۵/۶۴ میلی‌متر است. با در نظر گرفتن w_{0in} برابر با ۲۵/۶۴، فاصله برابر ۵ متر و قرار دادن فاصله کانونی برابر با ۷۵۰ میلی‌متر، می‌توان w_{0out} را به دست آورد.

با توجه به محاسبات w_{0out} برابر ۴/۴۷ می‌شود. با استفاده از این اندازه می‌توان ابعاد دهانه هورن هومی را از رابطه (۱۰) تعیین کرد که به ترتیب برابر با ۸/۹۴ و ۱۲/۷۷ میلی‌متر به دست می‌آیند. فاصله تصویر S_i (محل قرار گرفتن آشکارساز)، نیز طبق رابطه انتقال باریکه گاوسی برابر با ۸۷۹ میلی‌متر به دست می‌آید. در ادامه پس از طراحی اپتیک، باید آنتن تغذیه متناسب با عدسی دی‌الکتریک شبیه‌سازی شود.

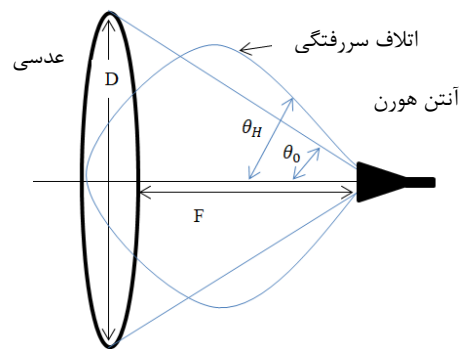
۳-۲. شبیه‌سازی سامانه اپتیکی

سامانه اپتیکی طراحی شده از نوع عبوری و یک تک عدسی از جنس دی‌الکتریک است، که در نرم‌افزار ZEMAX شبیه‌سازی شده است. ماده دی‌الکتریک عدسی از جنس پلی‌اتیلن بسیار چگال (HDPE) با ضریب شکست ۱/۵۳ در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز است که اتلاف آن در این فرکانس ناچیز است و برای تصویربرداری مناسب است (در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز، $\tan \delta = 0.0003$ و $\epsilon = 2.29$). از آنجایی که این ماده در کاتالوگ‌های موجود در نرم‌افزار ZEMAX تعریف نشده است، بنابراین، ابتدا این ماده به‌عنوان یک شیشه جدید در کاتالوگ تعریف شده در نرم‌افزار اضافه شد. سپس جهت شکست صحیح پرتوها، با توجه به اطلاعات موجود در منابع و مقالات موجود، ضرایب شکست در فرکانس‌های مختلف، مطابق جدول (۱)، در نرم‌افزار وارد شد [۳۰، ۳۱].

جدول ۱. ضرایب شکست HDPE در فرکانس‌های مختلف [۳۰ و ۳۱].

فرکانس	۳۵	۹۴	۱۶۰	۳۰۰	۴۵۰	۸۹۱
ضریب شکست	۱/۵۳۶	۱/۵۱۸۷	۱/۵۲۴۶	۱/۵۲۴۷	۱/۵۲۴۶	۱/۴۷۱۱

تغذیه با عدد کانونی $F/\# = F/D$ سامانه اهمیت دارد. مقادیر معمول بریدگی بهینه تغذیه^۱ (معیاری از نسبت کاهش توان در لبه دهانه نسبت به توان روی محور) در محدوده ۱۰- تا ۱۳- دسی‌بل است. پهنای باریکه ۱۰- دسی‌بل، θ_{-10dB} ، از هورن تغذیه باید با زاویه بازشدگی عدسی، θ_0 ، مطابقت داشته باشد. اگر $\theta_{-10dB} \gg \theta_0$ اتلاف سررفتگی^۲ (SPL) رخ خواهد داد. اگر $\theta_{-10dB} \ll \theta_0$ اتلاف بریدگی دامنه^۳ (ATL) و اتلاف خطای فاز^۴ (PEL) و در نتیجه انحراف از دامنه و فاز ثابت در میدان دهانه رخ می‌دهد [۲۸].



شکل ۷. اتلاف سررفتگی در ترکیب عدسی و هورن.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. محاسبه پارامترهای سامانه جهت شبیه‌سازی

پارامترهای اولیه مانند اندازه دهانه ورودی با توجه به روابط اپتیک هندسی و در نظر گرفتن حد پراش و الزامات اولیه به دست آمده است. برای یافتن قطر عدسی از معیار رایلی در اپتیک که در رابطه (۱۴) آمده است، استفاده می‌شود. در این فرمول، λ فرکانس مرکزی عملکرد، R فاصله تصویربرداری و s تفکیک‌پذیری موردنیاز در این فاصله برای تصویربرداری است که s برابر با قطر باریکه یعنی HPBW، در این ناحیه است. طبق معیار رایلی برای دست‌یابی به تفکیک‌پذیری ۳۰ میلی‌متری در فاصله ۵ متری، اندازه دهانه ورودی باید ۶۵ سانتی‌متر باشد.

$$s = 1.22 R\lambda/D \rightarrow D = 1.22 R\lambda/s \quad (۱۴)$$

معمولاً در سامانه‌های موج میلی‌متری با توجه به الزامات حجمی، عدد کانونی سامانه $(F/\#)$ کمتر از ۱/۵ انتخاب می‌شود. با انتخاب عدد کانونی، فاصله کانونی f نیز مطابق رابطه (۱۵) به دست می‌آید. به دلیل کمتر شدن حجم سامانه در طراحی، این اندازه برابر ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است.

$$F/\# = F/D \rightarrow F = F/\#D \quad (۱۵)$$

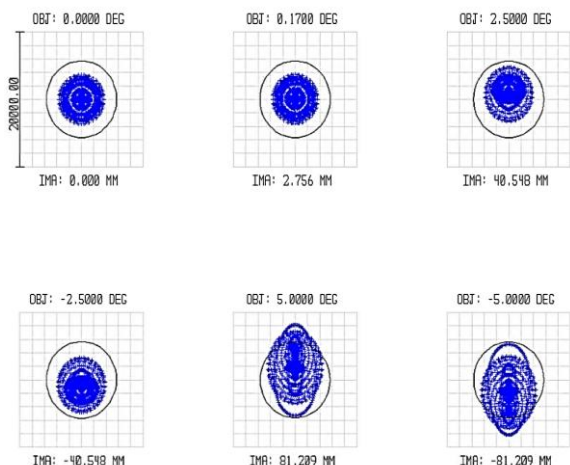
^۱ Optimum Feed Taper

^۲ Spillover Loss

^۳ Amplitude Taper Loss

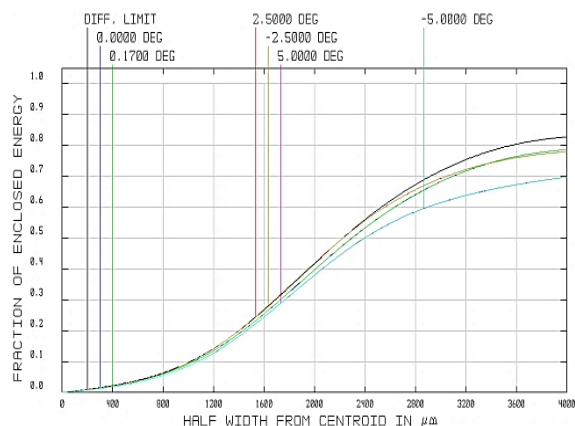
^۴ Phase Error Loss

آخر (پایین - وسط و پایین - راست) مربوط به انتهای میدان دید، (معادل هدف قرار گرفته در ۹۰ سانتی‌متری نسبت به محور اپتیکی) هستند. در این دو حالت RMS قطر لکه کمتر از ۷/۵ میلی‌متر است.



شکل ۹. منحنی لکه‌ای سامانه.

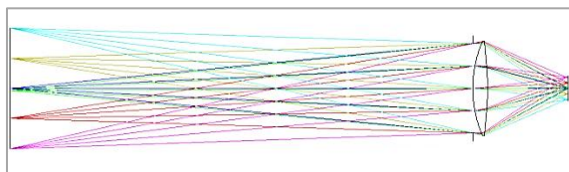
از شکل (۱۰) نیز مشاهده می‌شود که برای حالت روی محور و همچنین نصف میدان دید (معادل فضای ۴۵×۴۵ سانتی‌متری) حدود ۸۰٪ انرژی ورودی روی سطح هورن جمع‌آوری (متمرکز) می‌شود، که تقریباً برابر با حالت محدود به پراش است. و برای انتهای میدان دید بیشتر از ۷۰٪ انرژی ورودی روی سطح هورن جمع‌آوری می‌شود.



شکل ۱۰. منحنی انرژی جمع‌آوری شده روی هورن.

با توجه به شکل (۱۱)، MTF سامانه اپتیکی در فرکانس نایکویست، در دو حالت روی محور و نصف میدان دید، حدود ۵۸٪ است، که مقدار مناسبی است و حدود ۹۳٪ حالت محدود به پراش است. بنابراین، به MTF حالت محدود به پراش تقریباً نزدیک است.

با داشتن پارامترهای اولیه، قیود اعمالی و انجام محاسبات مربوطه، با نرم‌افزار ZEMAX به طراحی سامانه اپتیکی پرداخته شد. سپس با تعریف توابع شایستگی^۱ مناسب، عملیات بهینه‌سازی انجام گرفت. در بهینه‌سازی جهت اصلاح ابیراهی‌ها و حداقل کردن قطر لکه، RMS شعاع لکه به‌عنوان معیار بهینه‌سازی انتخاب شد. از طرفی فاصله کانونی و حداکثر طول سامانه اپتیکی به‌عنوان عملگرهای تابع شایستگی تعریف شدند. همچنین با توجه به قطر زیاد عدسی و حجم آن، تابع شایستگی به نحوی تعریف شد که عدسی دارای حداقل لبه ۲۰ میلی‌متری (جهت امکان نگهداری آن با نگه‌دارنده‌های اپتومکانیکی) باشد. در نهایت سامانه اپتیکی مطابق با شکل (۸) طراحی شد. اندازه قطر عدسی و فاصله کانونی آن به ترتیب برابر با ۶۵ و ۷۵ سانتی‌متر و ضخامت آن حدود ۱۴ سانتی‌متر است. شعاع سطح اول برابر با ۵۹۵/۳۵ میلی‌متر و شعاع سطح دوم نیز برابر با ۱۰۲۹/۲۴ میلی‌متر است.



شکل ۸. ساختار سیستم اپتیکی.

میدان دید این سامانه برابر با ۱۰ درجه ($\pm 5^\circ$) است که معادل یک فضای ۹۰×۹۰ سانتی‌متری از هدف در فاصله ۵ متری است. در ادامه نتایج عملکردی، شامل منحنی‌های لکه‌ای، نمودار MTF و دیگر معیارهای کیفیتی آن نمایش و تحلیل شده است.

در این سامانه ابیراهی‌ها اصلاح شده و میانگین مربع شعاع لکه در انتهای میدان دید تقریباً ۳/۷ میلی‌متر است. شکل (۹) منحنی لکه‌ای سامانه طراحی شده را برای ۶ حالت مختلف (از نظر میدان دید) نشان می‌دهد.

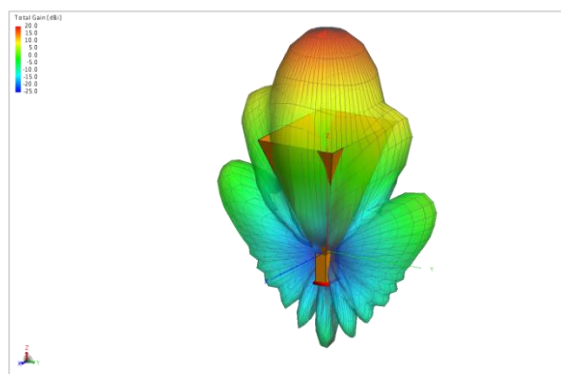
منحنی بالا - چپ مربوط به میدان دید صفر درجه (روی محور) و منحنی بالا - وسط مربوط به میدان دید ۰/۳۴ درجه (متناظر با هدف ۳۰ میلی‌متری در فاصله ۵ متری) است. همان‌طور که از این دو حالت مشخص است RMS قطر لکه در هر دو حالت کمتر از ۴/۵ میلی‌متر است. دو حالت بالا-راست و پایین - چپ (حالت‌های ۳ و ۴ در شکل) مربوط به هدف واقع در ۴۵ سانتی‌متری نسبت به محور اپتیکی در فاصله ۵ متری است. از اطلاعات و داده‌های شکل مشخص است که RMS قطر لکه در این دو حالت نیز کمتر از ۴/۷ میلی‌متر است. همچنین دو حالت

^۱Merit Function

۳-۳. شبیه‌سازی هورن

از آنجایی که می‌خواهیم از یک هورن هرمی به‌عنوان تغذیه این عدسی استفاده کنیم، با استفاده از رابطه (۱۱) اندازه بهینه ابعاد دهانه هورن به ترتیب برابر با ۸/۹۴ و ۱۲/۷۷ میلی‌متر به‌دست آمده است.

با توجه به محاسبات و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز، با در نظر گرفتن بهره مناسب و θ_{-10dB} ، هورن طراحی شده زیر با طول ۱۳ میلی‌متر برای این سامانه تصویربرداری مناسب است و می‌تواند در فاصله کانونی عدسی دی‌الکتریک قرار بگیرد که الگوی تابشی سه‌بعدی آن در شکل (۱۳) آورده شده است.

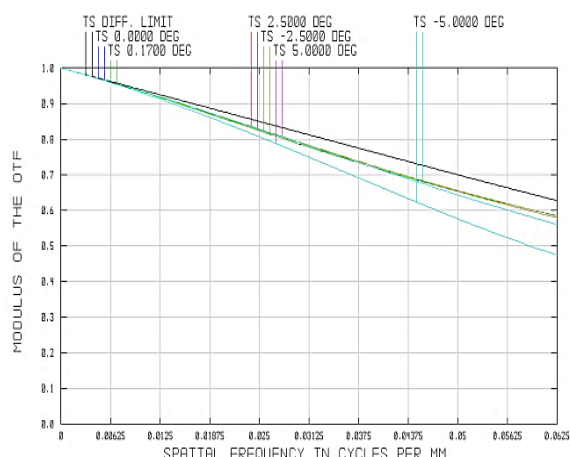


شکل ۱۳. هورن طراحی شده و الگوی تابشی سه‌بعدی آن.

ساخت این هورن هرمی طراحی شده آسان است و با استفاده از موجر WR-10 به آشکارساز تزویج می‌شود. طراحی و شبیه‌سازی این هورن با استفاده از نرم‌افزار FEKO صورت گرفته است و الگوی میدان دور آن در شکل (۱۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این هورن تقارن الگوی مناسبی در دو صفحه E و H دارد و می‌تواند در کانون عدسی موردنظر، پیش از آشکارساز مورد استفاده قرار گیرد. تقارن الگوی بهتر معادل با خطای فاز و ابیراهی اپتیکی کمتر است. این هورن از جنس رسانای کامل و ضخامت آن برابر یک میلی‌متر و بهره آن ۱۸/۹ دسی‌بل است.

در نهایت مرکز فاز هورن، در کانون سامانه قرار می‌گیرد. مرکز فاز این هورن با استفاده از نرم‌افزار CST محاسبه شده و برابر با ۳/۲۹ میلی‌متر به‌دست آمده است.

با توجه به اندازه قطر عدسی و فاصله کانونی آن، زاویه بازشدگی عدسی، θ_0 ، برابر با ۲۰/۴ درجه است. الگوی هورن نیز نشان می‌دهد که θ_{-10dB} آن برابر با ۲۰/۳ درجه است که همخوانی مناسبی دارد و ترکیب آن‌ها با یکدیگر مناسب است. این هورن از پهنای باند مناسبی نیز برخوردار است و نمودار بهره آن برحسب فرکانس در شکل (۱۵) رسم شده است.



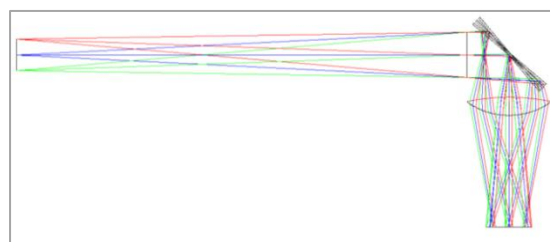
شکل ۱۱. منحنی MTF سیستم نهایی.

از طرفی میانگین MTF سامانه اپتیکی (در فرکانس نایکوئیست) برای انتهای میدان دید حدود ۵۱٪ است که تقریباً ۸۱٪ حالت محدود به پراش است. این مقادیر نشان می‌دهد که سامانه طراحی شده از کیفیت مناسبی برخوردار است.

منحنی‌های کیفیت تصویر نمودار لکه‌ای، انرژی متمرکز شده و MTF و همچنین تحلیل‌های آن‌ها نشان می‌دهند که سامانه طراحی شده از کیفیت تصویر بالایی برخوردار است.

نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار ZEMAX نشان می‌دهد که فاصله تصویر تا عدسی ۸۷۳ میلی‌متر است و با توجه به اندازه لکه، میزان انرژی جمع شده روی هورن و نمودار MTF، می‌توان گفت که سامانه طراحی شده محدود به پراش است و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از محاسبات انجام شده توسط روش باریکه گاوسی که مکان تصویر برابر با ۸۷۹ میلی‌متر به‌دست آمده بود، تطابق بسیار خوبی دارند که نشان از صحت شبیه‌سازی دارد. همچنین ابعاد به‌دست آمده برای دهانه هورن طبق روش باریکه گاوسی که برای هورن هرمی برابر با ۸/۹۴ و ۱۲/۷۷ میلی‌متر به‌دست آمد، نیز با نتایج سامانه محدود به پراش که در آن اندازه لکه طبق رابطه (۱۶) برابر با ۸/۹۴ میلی‌متر است، مطابقت دارد.

در نهایت می‌توان از یک بازتابنده مسطح که پیش از عدسی قرار می‌گیرد، مطابق شکل (۱۲)، برای جاروب صفحه شیء استفاده کرد.



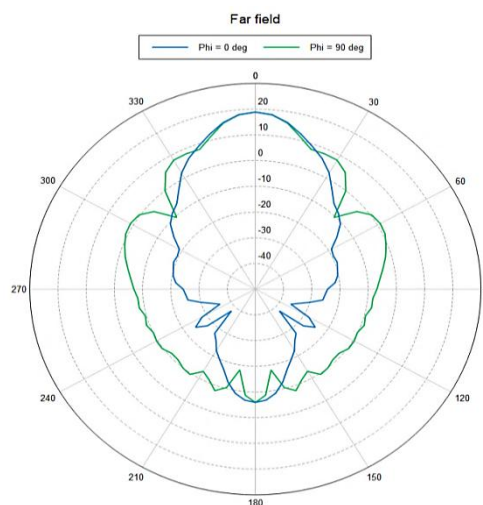
شکل ۱۲. قرار دادن بازتابنده مسطح قبل از عدسی دی‌الکتریک جهت جاروب صفحه شیء.

۴. نتیجه‌گیری

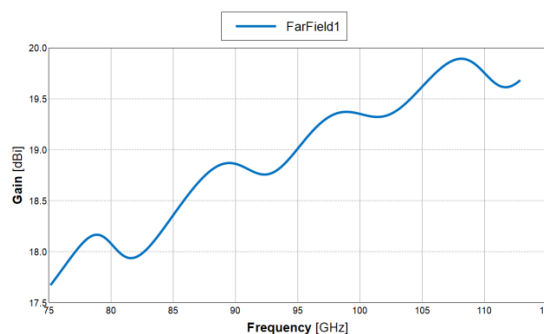
سامانه شبه‌اپتیک تصویربردار موج میلی‌متری با استفاده از روش ترکیبی اپتیک هندسی، باریکه گاوسی و ماتریس ABCD طراحی و با استفاده از نرم‌افزارهای ZEMAX، FEKO و CST شبیه‌سازی و بررسی شده است. اندازه دهانه ورودی عدسی برابر با ۶۵ سانتی‌متر است که توانایی تصویربرداری از شیء با تفکیک‌پذیری ۳۰ میلی‌متر در برد تصویربرداری ۵ متر را دارد. عدسی طراحی شده برای دوربین موج میلی‌متری یک سامانه نسبتاً با کیفیت بالا است که اپیراهی‌های آن به‌خوبی اصلاح شده‌اند. منحنی‌های کیفیت تصویر سیستم نیز نشان‌دهنده کیفیت بالای سامانه طراحی شده است. همچنین ابعاد هورن طراحی شده که برابر با ۸/۹۴ و ۱۲/۷۷ میلی‌متر با طول ۱۳ میلی‌متر است و یک هورن فشرده به شمار می‌رود، نیز با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عدسی دی‌الکتریک سازگار است و تقارن الگوی مناسبی دارد. با توجه به نتایج محاسبات می‌توان نتیجه گرفت ترکیب عدسی و هورن طراحی شده با یکدیگر مناسب است و می‌توان از این سامانه شبه‌اپتیک به‌منظور تصویربرداری موج میلی‌متری استفاده نمود.

۵. مرجع‌ها

- [1] Zhou, J.; Chen, Q.; Zhang, Y.; Fan, Y.; Da Xu, K. "Aspheric Dielectric Lens Antenna for Millimeter-wave Imaging System"; Asia PACIF. Microwave 2015, 1-3.
- [2] Sheen, D. M.; McMakin, D. L.; Hall, T. E. "Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection"; IEEE Trans. Microwave Theory 2001, 49, 1581-1592.
- [3] Duric, A.; Magun, A. "Antenna Design for an Imaging Radiometer at 94GHz"; Proc. Int. ITG Conf. Antennas 2003, 257-260.
- [4] Taylor, C. T. "Enhancement of Imagery From Passive Millimeter-wave Systems for Security Scanning"; Ph.D. Thesis, The University of Manchester, Manchester, 2015.
- [5] Chen, Q.; Fan, Y.; Zhou, J.; Song, K. "Design of Quasi-Optical Lens Antenna for W-Band Short Range Passive Millimeter-Wave Imaging"; J. Comput. Com. 2015, 3, 93-99.
- [6] Kim, W. G.; Moon, N. W.; Singh, M. K.; Kim, H. K.; Kim, Y. H. "Characteristic Analysis of Aspheric Quasi-optical Lens Antenna in Millimeter-wave Radiometer Imaging System"; Appl. Optics 2013, 52, 1122-1131.
- [7] Wiltse, J. C. "History of Millimeter and Submillimeter Waves"; IEEE Trans. Microw. Theory 1984, 32, 1118-1127.
- [8] Ditchfield, C.; England, T. "Passive Detection at Q Band"; RRE. Memo. 1955, 1124.
- [9] Appleby, R.; Anderton, R. N. "Millimeter-Wave and Submillimeter-wave Imaging for Security and Surveillance"; Proc. IEEE, 2007, 95, 1683-1690.
- [10] Lettington, A.; Alexander, N.; Dunn, D. "A New Opto-mechanical Scanner for Millimeter and Sub-millimeter Wave Imaging"; Proc. Soc. Photo-Opt. INS. 2005, 5789, 16-24.

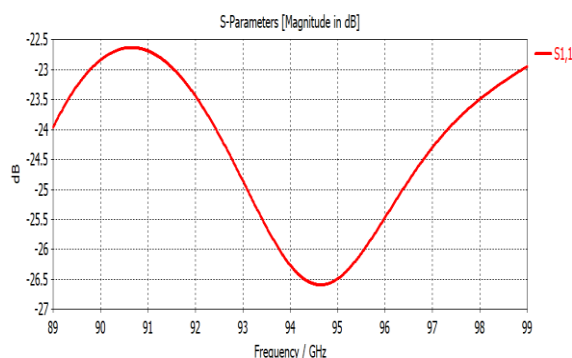


شکل ۱۴. الگوی میدان دور هورن هرمی طراحی شده در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز.



شکل ۱۵. بهره هورن طراحی شده برحسب فرکانس از ۷۲ تا ۱۱۲ گیگاهرتز.

با توجه به عدم انطباق امپدانس، مقداری از انرژی در سامانه بازتاب داده می‌شود که اتلاف برگشتی (برحسب dB) نامیده می‌شود. پارامتر S_{11} اندازه عددی اختلاف بین امپدانس بارها و خطوط انتقال فلزی است. مقادیر بزرگ‌تر آن نشان‌دهنده بازتاب کمتر است. در حالت کلی مقدار ۱۵ dB تا ۲۰ dB- و بالاتر قابل قبول در نظر گرفته می‌شود [۳۲]. با توجه به شکل (۱۶) مقدار این پارامتر در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز برابر با ۲۶/۲ dB- و قابل قبول است.



شکل ۱۶. پارامتر S هورن طراحی شده برحسب فرکانس.

- [22] Moffa, P.; Yujiri, L.; Agravante, H. H.; De Amici, G.; Dixon, D.; Fornaca, S. W. "Large-aperture Passive Millimeter-wave Pushbroom Camera"; *PROC. Soc. Photo-Opt. Ins.* 2001, 4373, 1-7.
- [23] Malakzadeh, A.; Kamjoo, M. J.; Zare Kalate, S. R. "Simulation of Kerr Lens Behavior in a Ti:Sapphire Oscillator with Symmetric and Asymmetric Resonator"; *Adv. Defence Sci. Technol.* 2016, 6, 59-70.
- [24] Goldsmith, P. F. "Quasi-optical Techniques"; *Proc. IEEE* 1992, 80, 1729-1747.
- [25] O'Sullivan C. M.; Murphy, J. A. "Field Guide to Terahertz Sources, Detectors, and Optics"; SPIE Press Book, 2012.
- [26] Alireza, K.; Martin, H. C.; Robert, D.; Mohammed, S.; Thomas, K. O.; Thorsten, S. "The Horn Antenna as Gaussian Source in the MM-Wave Domain"; *J. Infrared Millim. TE.* 2014, 35, 720-731.
- [27] Wade, P. "Multiple Reflector Dish Antennas"; ed, 2004.
- [28] Svedin, J.; Huss, L. G. "A 94 GHz Imaging Radar System"; Swedish Defence Research Agency, Sensor Technology, Technical Report, FOI-R-1191-SE, 2004.
- [29] Tran, H. P.; Gumbmann, F.; Weinzierl, J.; Schmidt, L. P. "A Fast Scanning W-Band System for Advanced Millimetre-wave Short Range Imaging Applications"; *EUROP. Radar Conf.* 2006, 146-149.
- [30] Raymond, C.; Ronca, S. "Relation of Structure to Electrical and Optical Properties"; *Brydson's Plastics Materials*, ed: Elsevier, 2017, 103-125.
- [31] Lamb, J. W. "Miscellaneous Data on Materials for Millimetre and Submillimetre Optics"; *J. Infrared Millim. TE.* 1996, 17, 1997-2034.
- [32] Barik, B. R.; Kalirasu, A. "Design of a UHF Pyramidal Horn Antenna Using CST"; *J. Pure Appl.* 2017, 114, 447-457.
- [11] Gao, X.; Li, C.; Gu, S.; Fang, G. "Design, Analysis and Measurement of a Millimeter Wave Antenna Suitable for Stand Off Imaging at Checkpoints"; *J. Infrared. Millim. TE.* 2011, 32, 1314-1327.
- [12] Meng, Y.; Qing, A.; Lin, C.; Zang, J.; Zhao, Y.; Zhang, C. "Passive Millimeter Wave Imaging System Based on Helical Scanning"; *SCI. REP-UK.* 2018, 8.
- [13] Yeom, S.; Lee, D. S.; Son, J. Y.; Jung, M. K.; Jang, Y.; Jung, S.-W. "Real-time Outdoor Concealed-Object Detection with Passive Millimeter Wave Imaging"; *Opt. Express* 2011, 19, 2530-2536.
- [14] Jinghui, Q.; Zhong, Z.; Kai, L.; Gaofei, L.; Fei, X. "Design and Measurement of Quasi-optics for Millimeter Wave Imaging System"; *IEEE Int. Workshop Imaging Systems and Techniques* 2009, 132-135.
- [15] Li, C.-M.; Huang, C.-Y.; Chang, L.-Y.; Yu, Y.-C.; Nien, C.-C.; Tarn, J.-H. "Development of a Compact Total Power Passive Millimeter-Wave Imaging System"; *IEEE Int. Symp. Rf.* 2011, 153-156.
- [16] Bevan, M. "Electromagnetic Analysis of Horn Antennas in the Terahertz Region"; Thesis, National University of Ireland Maynooth, 2013.
- [17] Goldsmith, P. F. "Quasioptical Systems"; Chapman & Hall, 1998.
- [18] Jing-Hui, Q.; Nan-Nan, W.; Yi-Chi, Z.; Cai-Tian, Y.; Wei-Bo, D. "Research on Quasi-optics and Feed Antenna for Millimeter Wave Imaging System"; *Proc. 9th Int. Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory* 2010, 45-48.
- [19] Milligan, T. A. "Modern Antenna Design"; Wiley Online Library, 2005.
- [20] Fischer, R. E.; Tadic-Galeb, B.; Yoder, P. R.; Galeb, R.; Kress, B. C.; McClain, S. C. "Optical System Design"; Citeseer, 2000.
- [21] Chen, Q.; Fan, Y.; Song, K. "Optimized Design of W-Band Quasi-Optical Lens by Using Optical Simulator and Numerical Analysis"; *Prog. Elect. Res.* 2016, 46, 173-181.