بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و شبیه‌سازی مجموعه شبه‌اپتیک غیرکروی سامانه تصویربردار در ۲۲۰ گیگاهرتز

فائزه جدیدی[۱]، محمد اسدنژاد[۲]، عبدالله اسلامی‌مجد[۳]، علیرضا عرفانیان[۴]، سید حسین محسنی ارمکی[۵]

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر Jadidi87@yahoo.com **۲- پژوهشگر وزارت نیرو** m.asadnejad@tpph.ir **۳- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر** a_eslamimajd@mut-es.ac.ir **۴- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر** Erfanian@mut.ac.ir **۵- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر** mohseni@mut.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک سامانه شبه‌اپتیک تصویربردار موج میلی‌متری در فرکانس مرکزی ۲۲۰ گیگاهرتز طراحی‌شده است. این سامانه شامل ترکیب مناسبی از یک عدسی دی‌الکتریک غیرکروی جهت کانونی کردن پرتو و یک هورن مخروطی جهت ایجاد تفکیک‌پذیری کمتر از ۲۰ میلی‌متر در فاصله ۲/۵ متری است. پارامترهای کلی این سامانه با استفاده از روش اپتیک هندسی محاسبه شده است و از نرم‌افزار طراحی اپتیکی ZEMAX برای شبیه‌سازی عدسی استفاده شده است. عدسی دی‌الکتریک از پلی‌اتیلن بسیار چگال تشکیل شده است و قطر دهانه ورودی این سامانه نیز ۲۱ سانتی‌متر است. سپس یک هورن مخروطی بهینه با بهره ۲۰ دسی‌بل طراحی‌شده است که تابش کانونی‌شده را به آشکارساز تزویج می‌کند. شبیه‌سازی هورن با استفاده از نرم‌افزارهای FEKO و CST انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که ترکیب آن با عدسی دی‌الکتریک جهت تصویربرداری در فرکانس ۲۲۰ گیگاهرتز با تفکیک‌پذیری بالا مناسب است.

کلید واژه- اپتیک هندسی، شبه‌اپتیک، عدسی غیرکروی، تصویربرداری موج میلیمتری، هورن.

Design and simulation of an aspheric quasi-optical millimeter wave imaging system in 220 GHz

Faeze jadidi, A.Eslami Majd, A. Erfaniyan and S. H. Mohseni Armaki

Department of Electrical and Computer Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Tehran.

Abstract- *In this paper, a quasi-optical millimeter wave imaging system is designed at central frequency of 220 GHz. This system includes a combination of an aspheric dielectric lens in order to focus the beam and a conical horn to form resolution less than 20 mm at distance of 2.5 meters. The general parameters of this system are calculated using the geometrical optics method and the optical design software ZEMAX was utilized to simulate the lens. The designed dielectric lens is made of High Density Polyethylene and the aperture diameter of the system is 21 cm. Then, an optimum conical horn with gain 20 dB is designed that couple the concentrated radiation to detector. The simulation of the horn is performed using the commercial softwares FEKO and CST and the simulation results indicate that its combination with dielectric lens is appropriate for imaging in 220 GHz with high resolution.*

Keywords: *Aspheric lens, Geometrical optics, Horn, Millimeter wave imaging, Quasi-optics.*

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مقدمه

امواج میلی‌متری در محدوده طول‌موجی ۱ تا ۱۰ میلی‌متر طیف الکترومغناطیسی قرار دارند که متناظر با فرکانس ۳۰-۳۰۰ گیگاهرتز است[۱]. در پنجره‌های اصلی که در فرکانس‌های ۳۵، ۹۴، ۱۴۰ و ۲۲۰ گیگاهرتز قرار دارند، جذب گازها و مواد تشکیل دهنده اتمسفر کمینه است[۲]. این امواج از مواد دی‌الکتریک مانند پلاستیک یا لباس عبور می‌کنند و توسط مواد فلزی بازتاب می‌شوند. این ویژگی در کاربرد امنیتی و آشکارسازی سلاح‌های مخفی زیر لباس و چمدان مسافران در فرودگاه و نقاط مرزی مطلوب است[۳]. پارامترهای کلیدی شامل انتخاب فرکانس موردنظر، روش روشنایی(فعال یا غیرفعال)، فاصله هدف شامل فاصله دور(بیش از ۱۰ طول‌موج) و فاصله نزدیک(کمتر از ۱۰ طول‌موج)، چیدمان آشکارساز(تک آشکارساز، آشکارساز آرایه‌ای یک یا دوبعدی) و پردازش تصویر می‌باشد. انتخاب فرکانس با توجه به یک قانون ساده صورت می‌گیرد: انتخاب فرکانس پایین‌تر برای داشتن عمق نفوذ بیشتر و اپتیک با دهانه بزرگتر، یا انتخاب فرکانس بالاتر برای تفکیک‌پذیری بهتر[۴]. تاریخچه فناوری موج میلی‌متری به سال ۱۸۹۰ برمی‌گردد و اولین فعالیت مهم در این زمینه در ۱۹۳۰ انجام شد[۵]. دیچفیلد و انگلند، اولین سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری در بریتانیا را در سال ۱۹۵۵ ارائه نمودند[۶]. از آن زمان، این فناوری با پیشرفت سریع ادامه یافته است[۷]. رابرتسون و همکارانش طراحی و ساخت یک سامانه تصویربردار موج میلی‌متری را در سال ۲۰۱۶ در فرکانس ۲۲۰ گیگاهرتز گزارش کرده‌اند[۸ و۹].

طراحی سامانه

روش‌های طراحی شبه‌اپتیک سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری شامل اپتیک هندسی، روش پرتوی گاوسی، ماتریس انتقال ABCD و روش ترکیبی است[۱۰]. در این پژوهش از روش اپتیک هندسی برای طراحی عدسی، یافتن اندازه دهانه و مکان قرارگیری هورن (نوعی موجبر فلزی بازشونده) استفاده شده است. با کانونی شدن پرتوی ورودی توسط عدسی، یک لکه کوچک به‌دست می‌آید که باید در مرکز فاز هورن قرار گیرد تا با استفاده از موجبر به آشکارساز تزویج شود. به‌دلیل وجود ابیراهی و پراش، پرتوی کانونی‌شده در صفحه تصویر پخش و موجب تارشدگی تصویر می‌شود. تفکیک‌پذیری سامانه طبق معیار رایلی برابر است با:

$$s = R\frac{1.22\lambda}{D} \qquad (۱)$$

همچنین در سامانه محدود به پراش، قطر لکه برابر است با:

$$B_{diff} = 2.44\lambda(F/\#) \qquad (۲)$$

که λ فرکانس مرکزی عملکرد، R فاصله تصویربرداری و s تفکیک‌پذیری است[۱۱]. بنابراین برای تفکیک‌پذیری ۲۰ میلی‌متر در فاصله‌ی ۲/۵ متر، اندازه دهانه ورودی باید ۲۱ سانتی‌متر باشد. به‌دلیل کاهش حجم سامانه، F/# برابر ۱/۳ در نظر گرفته‌شده است. بنابراین اندازه قطر لکه کانونی با استفاده از رابطه (۲)، برابر با ۴/۳ mm است که نشان دهنده کوچکترین اندازه مجاز دهانه هورن است.

۱- شبیه‌سازی عدسی غیرکروی

در اپتیک غیرکروی، افزایش درجه‌های آزادی در شکل سطح، می‌تواند توانایی طراح را در کاهش ابیراهی‌ها، افزایش دهد. فرمول طراحی عدسی غیرکروی به‌صورت رابطه (۳) است:

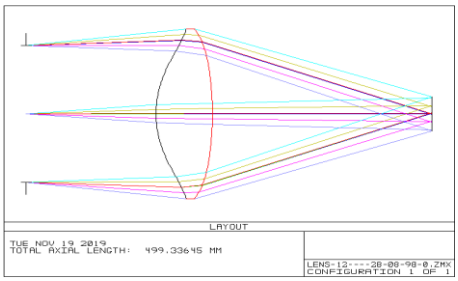
$$Z = \frac{c^{-1}r^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^{-2}r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} \qquad (۳)$$

که در آن c انحنا، r مختصه شعاعی و k ثابت مخروطی است[۱۲]. با داشتن پارامترهای اولیه و انجام محاسبات

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مربوطه، با نرم‌افزار ZEMAX به طراحی سامانه اپتیکی پرداخته شد. سپس با تعریف توابع شایستگی مناسب، عملیات بهینه‌سازی انجام گرفت. با توجه به قطر زیاد عدسی و حجم آن، تابع شایستگی طوری تعریف شد که عدسی دارای لبه ۱۰ mm (جهت امکان نگهداری با نگه‌دارنده‌های اپتومکانیکی) باشد. میدان‌دید این سامانه برابر با ۱۰ درجه (معادل فضای ۵۰×۵۰ سانتی‌متری از هدف در فاصله ۲/۵ متری) است. سامانه اپتیکی عبوری شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار ZEMAX، با استفاده از پلی‌اتیلن بسیار چگال (HDPE) با ضریب شکست ۱/۵۲۴۷ در فرکانس ۲۲۰ گیگاهرتز، در شکل (۱) آمده است.



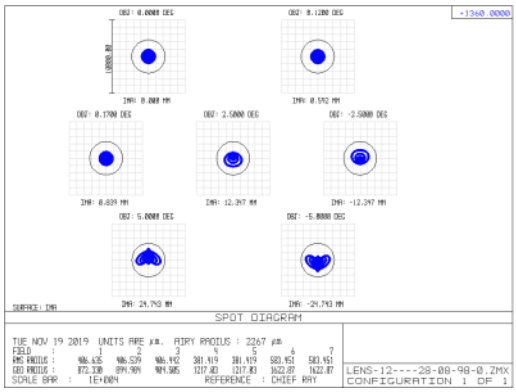
شکل ۱. عدسی غیرکروی طراحی شده در ZEMAX

مقادیر ثابت‌های سطح غیرکروی در جدول (۱) آمده است. D و d به‌ترتیب برابر با قطر و ضخامت عدسی هستند.

جدول ۱. پارامترهای عدسی غیرکروی

ثابت	سطح ۱	سطح ۲
c	۲۰۸	-۵۲۷
k	۰/۴۹۳	-۱۵۹/۲۰۳
α_1	۱/۸۶e-۰۰۸	-۱/۶۸e-۰۰۴
α_2	۱/۸e-۰۰۸	-۱/۶۸e۰۰۸
α_3	-۴/۱۶e-۰۱۲	-۱/۶۵e-۰۱۲
α_4	-۶/۹e-۰۱۸	۴/۰۴e-۰۱۸
D	۲۶۰(mm)	
d	۶/۹(mm)	

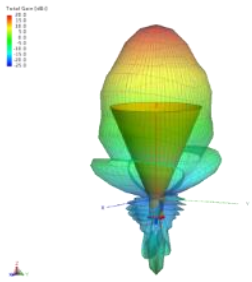
وزن این سامانه حدود ۱/۹ کیلوگرم و فاصله کانونی آن نیز برابر با ۲۷/۱ سانتی‌متر است. شکل (۲) منحنی لکه‌ای سامانه طراحی‌شده را برای ۷ حالت مختلف (از نظر میدان‌دید) نشان می‌دهد. در این سامانه ابیراهی‌ها اصلاح شده‌اند و میانگین مربع شعاع لکه در بدترین حالت در انتهای میدان‌دید ۱/۶ میلی‌متر است.



شکل ۲. منحنی لکه‌ای عدسی دی‌الکتریک غیرکروی

۲- طراحی هورن

معمولا در سامانه‌های شبه‌اپتیک از هورن‌های مخروطی و هرمی استفاده می‌شود. در این پژوهش هورن مخروطی، شکل (۳)، انتخاب شده است که ساخت آن آسان است و با استفاده از موجبر دایروی به آشکارساز تزویج می‌شود. با در نظر گرفتن بهره و θ_{-10dB} مناسب، هورن مخروطی با قطر دهانه ۶ mm و طول ۶/۷ mm برای این سامانه تصویربردار مناسب است که به موجبر دایروی مناسب متصل شده است. این هورن از جنس رسانای کامل و ضخامت آن برابر ۱ mm و بهره آن ۲۰ دسی‌بل است.

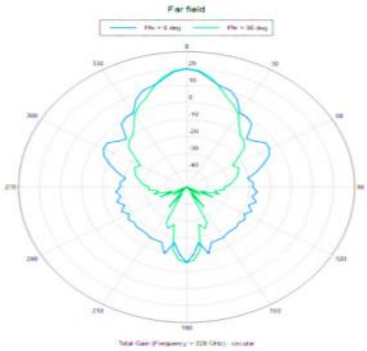


شکل ۳. هورن مخروطی طراحی‌شده و الگوی تابشی سه‌بعدی آن

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

شبیه‌سازی این هورن با استفاده از نرم‌افزار FEKO صورت گرفته است و الگوی میدان دور آن در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این هورن تقارن الگوی مناسبی در دو صفحه E و H دارد. تقارن الگوی بهتر معادل با خطای فاز و ابیراهی اپتیکی کمتر است.



شکل ۴. الگوی میدان دور هورن مخروطی طراحی‌شده در فرکانس ۲۲۰ گیگاهرتز

درنهایت مرکز فاز هورن، در کانون سامانه قرار می‌گیرد که با استفاده از نرم‌افزار CST محاسبه‌شده و برابر با ۳/۵ میلی‌متر به‌دست‌آمده است. با توجه به اندازه قطر عدسی و فاصله کانونی آن، زاویه بازشدگی عدسی، θ_0، برابر با ۴۲/۰۶ درجه است. الگوی هورن نیز نشان می‌دهد که θ_{-10dB} آن برابر با ۴۲ درجه است که هم‌خوانی مناسبی دارد و ترکیب آن‌ها با یکدیگر مناسب است.

نتیجه‌گیری

سامانه شبه‌اپتیک تصویربردار موج میلی‌متری با استفاده از روش اپتیک هندسی طراحی و با استفاده از نرم‌افزارهای ZEMAX، FEKO و CST شبیه‌سازی و بررسی‌شده است. عدسی غیرکروی طراحی‌شده برای دوربین موج میلی‌متری یک سامانه با کیفیت بالا است که ابیراهی‌های آن به‌خوبی اصلاح شده‌اند. منحنی‌های کیفیت تصویر نیز نشان‌دهنده کیفیت بالای سامانه طراحی‌شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت ترکیب عدسی و هورن طراحی‌شده با یکدیگر مناسب است و می‌توان از این سامانه شبه‌اپتیک به‌منظور تصویربرداری در فرکانس ۲۲۰ گیگاهرتز استفاده نمود.

مرجع‌ها

[1] C. T. Taylor, “Enhancement of Imagery From Passive Millimetre-wave Systems for Security Scanning”; Ph.D. Thesis, The University of Manchester, Manchester, 2015.

[2] M. Sayed , F. Anderson, “*50-to-110-GHz High-Performance Millimeter Wave Source Modules*”, Hewlett-Packard Journal, Vol. 42, No. 2, pp.50-64,1991.

[3] D. M. Sheen, D. L. McMakin, T. E. Hall, “Near field imaging at microwave and millimeter wave frequencies,” Proc. of IEEE IMS, pp. 1693–696, 2007.

[4] S. Oka, H. Togo, N. Kukutsu, and T. Nagatsuma , “Latest trends in millimeter-wave imaging technology”, Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 1, pp. 197–204, 2008.

[5] J. C. Wiltse, “History of Millimeter and Submillimeter Waves”; IEEE T. Microw. Theory., 32, pp. 1118-1127,1984.

[6] C. Ditchfield, T. England, “Passive Detection at Q band”; RRE. Memo., pp. 1124, 1955.

[7] R. Appleby, R. N. Anderton, “Millimeter-wave and Submillimeter-wave Imaging for Security and Surveillance”; P. IEEE, 95, pp. 1683-1690, 2007.

[8] A. Robertson, G. Macfarlane1 , T. Bryllert , “220 GHz wideband 3D imaging radar for concealed object detection”, technology development and phenomenology studies, Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XIX, Proc. of SPIE Vol. 9830, 983009 ,2016.

[9] D.A. Robertson, D.G. Macfarlane , “A 220 GHz 3D imaging radar with sub-cm3 voxel resolution for security applications”, EuMA, 978-2-87487-043-9, 2016.

[10] Q. Jing-Hui, W. Nan-Nan, Z.Yi-Chi, Y.Cai-Tian, D.Wei-Bo, “Research on Quasi-optics and Feed Antenna for Millimeter Wave Imaging System”; in Proc. of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, pp. 45-48, 2010.

[11] R. E. Fischer, B. Tadic-Galeb,; P. R. Yoder, R. Galeb, B. C. Kress, S. C. McClain, “Optical System Design”, Citeseer, 2000.

Zemax group, Zemax Optical Design Program User’s Manual, 2013, 1-765.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]