

طراحی و شبیه‌سازی هورن دندانه‌دار گاوسی در باند W جهت استفاده در سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری

فائزه جدیدی^۱، دانشجوی دکتری؛ عبدالله اسلامی‌مجد^۲، استادیار؛ علیرضا عرفانیان^۳، دانشیار؛ سیدحسین محسنی ارمکی^۴، استادیار

۱- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - jadidi@mut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - a_eslamimajd@mut-es.ac.ir

۳- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - erfaniyan@mut.ac.ir

۴- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mohseni@mut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک هورن با پروفایل گاوسی و دیواره دندانه‌دار در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز طراحی و شبیه‌سازی شده است و با هورن مسطح طراحی شده با پروفایل گاوسی مقایسه شده است. آنتن هورن پیشنهاد شده شامل یک بخش دندانه‌دار عادی (مبدل مد و بخش فازی) و بخشی با پروفایل گاوسی است. آنتن هورن پروفایل گاوسی گذار هموارتری از موجبر تا دهانه را فراهم می‌کند، که تطبیق بین آنتن و فضای آزاد را بهبود می‌بخشد. این تطبیق بهتر، الگوی تابشی بهتر و پهنای باند بیشتری فراهم می‌کند و بازدهی کل سامانه را افزایش می‌دهد. هورن دندانه‌دار نیز پراش لبه کم، تقارن الگوی بهبودیافته و قطبش عرضی کاهش‌یافته دارد، زیرا دندانه‌ها شرایط مرزی یکسانی برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد می‌کنند. تقارن الگوی هورن گاوسی دندانه‌دار طراحی شده در صفحات متعامد E و H، پهنای باند وسیع و همچنین سطوح گلبرگ جانبی پایین آن باعث می‌شود تا نماینده مناسبی جهت استفاده در تغذیه سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری در باند W باشد.

واژه‌های کلیدی: شبه اپتیک، تصویربرداری موج میلی‌متری، هورن پروفایل، هورن گاوسی، هورن دندانه‌دار، الگوی تابشی متقارن.

Design and Simulation of a Gaussian Corrugated Horn in the W Band for Millimeter Wave Imaging System

F. Jadidi¹, PhD Student; A. Eslami Majd², Assistant Professor; A. Erfaniyan³, Associate Professor; S. H. Mohseni Armaki⁴, Assistant Professor

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Iran, Email: jadidi@mut.ac.ir

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Iran, Email: a_eslamimajd@mut-es.ac.ir

3- Department of Electrical and Computer Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Iran, Email: erfaniyan@mut.ac.ir

4- Department of Electrical and Computer Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Iran, Email: mohseni@mut.ac.ir

Abstract: In this paper, a Gaussian corrugated profile horn is designed, simulated and compared with a Gaussian profile horn with flat wall, at central frequency of 94 GHz. The proposed horn antenna consists of a corrugated section (mode converter and phase section) and a Gaussian profile section. The Gaussian profile Horn Antenna provides a smooth transition from waveguide to aperture, which improves matching between antenna and free space. This ensures better matching, better radiation pattern, more bandwidth and increases overall system efficiency. The corrugated horn also has low edge diffraction, improved pattern symmetry, and reduced transverse polarization, because these corrugations create same boundary conditions for electric and magnetic fields. The symmetry pattern on the E and H orthogonal planes, the broad bandwidth as well as low sidelobes of this designed corrugated Gaussian profile horn, make it a good representative for use as a feed in millimeter wave imaging system in W band.

Keywords: Quasi-optics, Millimeter wave imaging, Profile horn, Gaussian horn, Corrugated horn, Symmetrical radiation pattern.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

نام نویسنده مسئول: عبدالله اسلامی‌مجد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

سیاه، اجسام در محدوده موج میلی‌متری تابش حرارتی دارند و شدت تابشی آن‌ها به گسیلندگی و دمای جسم بستگی دارد [۱۳]. این تابش می‌تواند توسط یک سامانه اپتیکی دریافت شود. سامانه‌های اپتیکی طراحی شده برای دریافت تابش موج میلی‌متری، سامانه‌های شبه‌اپتیکی^۷ نامیده می‌شوند. طراحی سامانه شبه‌اپتیکی برای تصویربرداری موج میلی‌متری عمدتاً به سه بخش تقسیم می‌شود: طراحی پارامترهای کل سامانه، طراحی المان کانونی کننده و طراحی آنتن تغذیه [۱۴، ۱۵].

در سامانه‌های شبه‌اپتیکی، پرتوی فضای آزاد که توسط عدسی دی‌الکتریک 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 به/از فضای آزاد به موجبر تزویج^۹ می‌شود و تطبیق امپدانس بهتری به آزاد را فراهم می‌کند، زیرا نسبت به موجبر دهانه بزرگ‌تری دارد [۱۴].

بهترین تطابق بخش‌های مختلف سامانه می‌تواند با طراحی پارامترها، المان کانونی کننده و آنتن تغذیه با در نظر گرفتن یکدیگر، به دست آید. نوع و طراحی آنتن‌های تغذیه تاثیر مهمی بر عملکرد کلی سامانه دارد. معمولاً آنتن‌های هورن روشنایی مناسبی برای عدسی‌ها یا بازتابنده‌ها ایجاد می‌کنند. بنابراین درک کامل ویژگی‌های انتقال و تابش آنتن‌های هورن در تجزیه و تحلیل سامانه‌های شبه‌اپتیکی اساسی است [۱۵]. انواع مختلف آنتن هورن با سطح مقطع و طرح‌های متفاوت وجود دارند. هر آنتن هورنی مزایا و معایب خود را دارد که هنگام طراحی سامانه شبه اپتیکی باید در نظر گرفته شود. معمولاً در سامانه‌های تصویربرداری موج میلی‌متری از آنتن هورن مخروطی یا هرمی با دیواره مسطح به‌عنوان تغذیه استفاده می‌شود [۱۳]. عملکرد آنتن‌های هورنی که دیواره بازشونده آن‌ها خطی است، می‌تواند به‌وسیله روش‌هایی مانند پروفایل‌دار کردن دیواره، بهبود یابد [۱۵]. پروفایل هورن می‌تواند به صورت سینوسی، مماسی، نمایی، هایپربولیک، چند جمله‌ای و ... باشد [۱۶].

البته آنتن‌های هورن دیواره مسطح، مشکلاتی دارند که با دندانه‌دار کردن دیواره از بین می‌رود. این مشکلات شامل پهنای پرتوی نامساوی و مراکز فاز نابرابر در دو صفحه متعامد، گلب‌گ‌های جانبی بیشتر در صفحه E نسبت به صفحه H بدون ابزاری برای کاهش آن‌ها و پراش از دیواره‌های صفحه E که موجب ایجاد گلب‌گ‌های پشتی می‌شود، هستند [۱۷]. در کاربری با عملکرد بالا در ناحیه موج میلی‌متری، مانند تصویربرداری امنیتی، رادار و نجوم رادیویی، معمولاً از آنتن‌های هورن دندانه‌دار به علت تقارن پرتوی بالا، گلب‌گ‌های جانبی با سطوح نسبتاً پایین و قطبش متقاطع کم به‌عنوان تغذیه استفاده می‌شود [۴].

طراحی و تحلیل آنتن‌های هورن تغذیه مخروطی دندانه‌دار تاکنون موضوع بسیاری از مقالات و تحقیقات بوده است [۱۸]. به‌عنوان مثال، لوسی^{۱۰} در سال ۲۰۰۴ یک هورن فشرده متشکل از یک بخش پروفایل و یک مخروط نمایی را در فرکانس ۳۲۰ گیگاهرتز طراحی کرد که

امروزه سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری در بسیاری از برنامه‌های امنیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل توانایی تصویربرداری در آب‌وهوای نامساعد و عبور از اشیاء کدر مانند لباس، پلیمرها و ... این امکان را برای شناسایی سلاح‌های مخفی فراهم می‌کند [۱]. این سامانه‌ها تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به سامانه‌های تصویربرداری میکروموج دارند و نسبت به سامانه‌های مادون قرمز کمتر تحت تاثیر شرایط اتمسفری قرار می‌گیرند [۲].

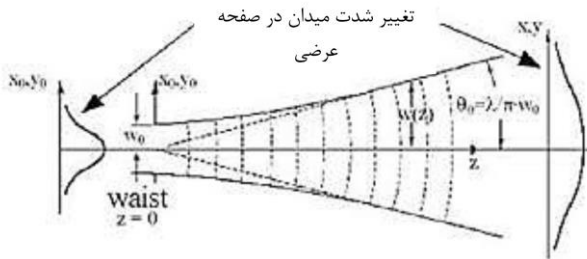
امواج میلی‌متری در محدوده طول موج ۱ تا ۱۰ میلی‌متر طیف الکترومغناطیسی قرار دارند که متناظر با محدوده فرکانسی ۳۰-۳۰۰ گیگاهرتز است [۳]. با در نظر گرفتن عبوردهی اتمسفر، دو باند فرکانسی بهینه، باند Q (فرکانس ۳۵ گیگاهرتز) و باند W (فرکانس ۹۴ گیگاهرتز) برای استفاده در تصویربردارهای موج میلی‌متری وجود دارد. باند W در مقایسه با باند Q کیفیت تصویر و تفکیک‌پذیری مکانی^۱ بهتری دارد [۴].

تصویربرداری موج میلی‌متری به دو نوع فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. سامانه‌های فعال، مبتنی بر روشن کردن هدف موردنظر توسط منبع خاص (رادار) و جمع‌آوری توان بازتابیده هستند [۵]. تصویربرداری راداری دهانه مصنوعی^۲ (SAR) روشی فعال است که از حرکت یک آنتن برای افزایش دهانه موثر آنتن، فراتر از اندازه فیزیکی آن، استفاده می‌کند. این روش با اعمال پردازش سیگنال دهانه مصنوعی و الگوریتم‌های خاص، تفکیک‌پذیری تصویر و نسبت سیگنال به نویز را بهبود می‌بخشد. تصویربرداری موج میلی‌متری به روش SAR برای تشخیص غیرتماسی و غیرمخرب در کاربردهایی مانند کشف اسلحه پنهان زیر پوشش، تصویربرداری پزشکی و سنجش از دور شامل مشاهده ویژگی‌های فیزیکی زمین، رصد مکان‌های خطرناک و آشکارسازی اهداف خاص (نظامی و ...) حتی در شب و در آب‌وهوای نامساعد مانند باران و مه استفاده می‌شود [۶-۸]. محققان زیادی از روش SAR جهت تصویربرداری در ناحیه موج میلی‌متری استفاده کرده‌اند. اخیراً چن^۳ و همکارانش در اقدامی نوین در سال ۲۰۲۰ از سامانه تصویربرداری SAR موج پیوسته با فرکانس پله‌ای^۴ (SFCW) با یک فرستنده ساده در فرکانس ۳۰-۲۴ گیگاهرتز، در تصویربرداری با تفکیک‌پذیری بالا استفاده کرده‌اند [۸]. همچنین خانم محمدیان و همکارانش در سال ۲۰۱۹ نتایج چیدمان‌های مختلف آرایه آنتن، برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بالا، را بررسی و نتایج اندازه‌گیری‌های تصویربرداری SAR از هدف زیر پوشش را ارائه نمودند [۹]. آقای یانیک^۵ و همکارانش نیز از حسگر راداری در ۷۷ گیگاهرتز و ترکیب روش پردازش سیگنال SAR در دو بعد براساس مدل سیگنال راداری فرکانس مدوله موج پیوسته^۶ (FMCW) استفاده کرده و موفق به طراحی و ساخت اولین هولوگرافی سه‌بعدی شدند [۱۰، ۱۱].

در سامانه‌های تصویربرداری غیرفعال نیز، تابش موج میلی‌متری از خود جسم دریافت می‌شود [۱۲]. زیرا با توجه به نظریه تابش جسم

که $r^2 = x^2 + y^2$ و $w(z)$ پهنای پرتو است (شکل ۱). در $z=0$ ، تابع $w(z)$ ، حداقلی وجود دارد که کمر پرتو w_0 نامیده می‌شود و برابر است با:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{kw_0^2}\right)^2} \quad (2)$$



شکل ۱: انتشار گاوسی در فضای آزاد [۲۵].

در رابطه ۲، $w_0 = \alpha r_0 = \alpha D_0 / 2$ کمر پرتو در $z=0$ است و از طریق پارامتر α به D_0 مرتبط است. پارامتر α زاویه دهانه هورن را برای یک فرکانس داده‌شده و شعاع موجبر کنترل می‌کند، و مربوطه که از منحنی سطح گاوسی تبعیت می‌کند، به صورت رابطه ۳ زیر است:

$$R(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{k\alpha^2 r_0^2}\right)^2} \quad (3)$$

پارامتر α می‌تواند بین ۰.۵ تا ۰.۸ متغیر باشد، اما مقدار مطلوب آن حدود ۰.۶۵ است [۲۵].

همچنین در آنتن‌های هورن دندانه‌دار به منظور کاهش طول آن‌ها و کاهش سطح گلب‌گ‌های جانبی، شکل ناحیه بازشونده اصلاح می‌شود. برای مواردی که بهره بیشتری دارند، این امر موجب ساختار فشرده‌تری می‌شود. در این ساختارها مرکز فاز با فرکانس تغییر نمی‌کند و پهنای باند نیز بهبود می‌یابد [۲۶].

در آنتن هورن گاوسی دندانه‌دار، مقدار پارامتر α به این دلیل برابر با ۰.۶۵، انتخاب می‌شود که موجب ترکیب مناسب مد HE_{11} می‌شود. آخرین پارامتر که ما باید به‌طور کامل برای طراحی آنتن هورن با پروفایل گاوسی تعیین کنیم، طول پروفایل است. اگر آنتن بسیار طولانی باشد می‌توانیم بگوییم ما بیش از حد پرتو گاوسی را هدایت کرده‌ایم و اضافه شدن طول بیشتر آنتن واقعاً پرتو را بهبود نمی‌بخشد، بنابراین بازدهی می‌تواند همانند آنتن کوتاه باشد [۲۷].

مد TE_{11} مد پایه موجبر دایروی است که الگوی تابشی آن ضعیف است و تزویج ضعیفی به مؤلفه‌های شبه‌اپتیک دارد. بنابراین به‌منظور تزویج بهینه باید یک ناحیه گذار از موجبر دایروی تا موجبر دندانه‌دار قرار گیرد. این ناحیه گذار مد TE_{11} را به مد HE_{11} تبدیل می‌کند. در حقیقت در دندانه‌ها ترکیبی از مد TE و TM وجود دارد و مد ترکیبی به نام HE را تولید می‌کند. در مد ترکیبی قطبش عرضی بسیار کم است و پهنای باند وسیعی دارد. نسبت مدهای TE_{11} و TM_{11} به

می‌تواند به سطوح گلب‌گ‌های جانبی و قطبش عرضی حدود ۳۰- دسی‌بل دست یابد [۱۹]. همچنین یاو^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ یک هورن دندانه‌دار در ناحیه تراهرتز که از بخشی با پروفایل مربع سینوسی و بخشی با پروفایل خط موازی تشکیل شده بود، طراحی کردند که گلب‌گ‌های جانبی آن در محدوده ۳۷- تا ۴۰- بود [۲۰]. در سال ۲۰۱۶ وانگ هورن دندانه‌داری در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز طراحی کرده است که از یک بخش پروفایل و یک بخش فازی تشکیل شده است که هر دو بخش برای رسیدن به الگوی دلخواه بهینه‌شده‌اند [۲۱]. همچنین طراحی و ساخت هورن دندانه‌دار با پروفایل گاوسی در فرکانس ۵۹ گیگاهرتز توسط گنزالو^{۱۲} گزارش شده است [۲۲]. در سال ۲۰۱۷ نیز طراحی یک هورن مخروطی دندانه‌دار در ۹۱/۵ گیگاهرتز به‌منظور کاربرد در تلسکوپ رادیویی ALMA گزارش شده است [۲۳].

در این مقاله، یک هورن دیواره مسطح با پروفایل گاوسی و یک هورن گاوسی دندانه‌دار طراحی و با استفاده از نرم‌افزار الکترومغناطیسی FEKO شبیه‌سازی شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. باند فرکانسی مورد نظر در طراحی از ۷۵/۲ گیگاهرتز تا ۱۱۲/۸ گیگاهرتز، با فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز است. این هورن به عنوان تغذیه یک عدسی دی‌الکتریک با عدد کانونی ۱/۲ قرار می‌گیرد که در تصویربرداری موج میلی‌متری استفاده می‌شود و الزامات سامانه را برآورده می‌سازد.

۲- فرایند طراحی

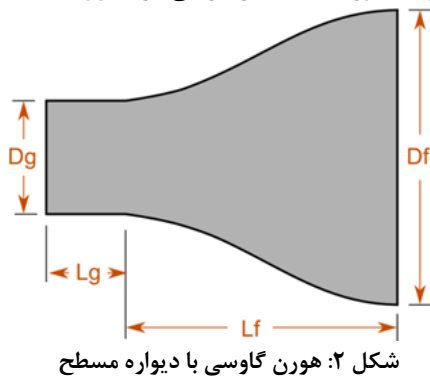
فرایند طراحی آنتن، شامل انتخاب پروفایل هورن و ویژگی‌های مربوط به سطح دیواره می‌شود.

آنتن هورن پروفایل گاوسی گذار هموارتری از موجبر تا دهانه را فراهم می‌کند، که تطبیق بین آنتن و فضای آزاد را بهبود می‌بخشد. این تطبیق بهتر، الگوی تابشی بهتر و پهنای باند بیشتری فراهم می‌کند و بازدهی کل سامانه را افزایش می‌دهد [۲۴]. با استفاده از آنتن‌های هورن با پروفایل گاوسی، پارامترهای مختلف مانند پراش پرتو، پهنای باند، سطوح گلب‌گ‌های جانبی و قطبش عرضی، جهت‌مندی، بهره، بازدهی و ... می‌تواند با استفاده از درجات آزادی بیشتر سامانه، بهینه شوند. در آنتن‌های هورن گاوسی، ویژگی‌های اصلی الگوی تابش میدان دور آنتن هورن مخروطی حفظ می‌شود، و گلب‌گ‌های جانبی و همچنین سطح قطبش متقابل (عرضی) به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۴].

یکی از بهترین روش‌ها برای تعریف تابش فضایی آزاد آنتن، استفاده از مد فضای آزاد پیرامحوری یعنی مدهای گاوسی است که جواب پیرامحوری معادله فضای آزاد است. این مد دارای قطبش عرضی صفر و گلب‌گ‌های جانبی صفر است. فرمول انتشار میدان الکتریکی آن به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{W_0}{w(z)} \exp^{-\frac{r^2}{w(z)^2}} \cdot \exp^{-j \frac{k r^2}{2R(z)}} \cdot \exp^{-j(kz - \xi(z))} \quad (1)$$

کانونی ۱/۲ در ناحیه موج میلی‌متری جهت تصویربرداری طراحی شده است. پارامترهای مورد استفاده در طراحی در جدول ۱ آمده است.

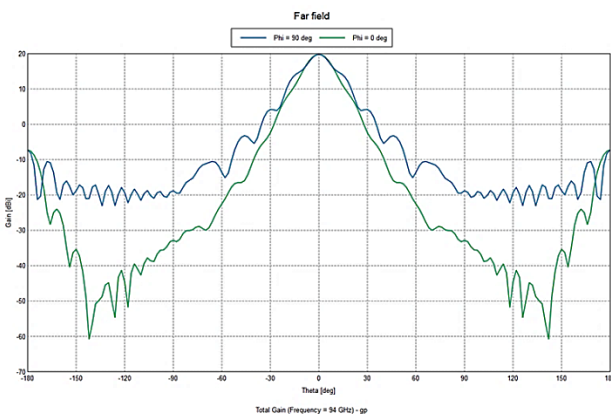


در جدول ۱، Dg قطر موجبر ورودی، Lg طول موجبر، Lf طول بخش پروفایل گاوسی و Df قطر دهانه هورن است.

جدول ۱: پارامترهای هورن گاوسی با دیواره مسطح

Dg	Lg	Lf	Df
۲/۵۵	۳/۱۸	۱۹/۱۴	۱۶/۴۳

شبیه‌سازی این هورن با استفاده از نرم‌افزار FEKO صورت گرفته است. الگوی میدان دور این هورن در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: الگوی تابشی میدان E و H هورن گاوسی با دیواره مسطح

استفاده از این هورن به‌عنوان تغذیه عدسی دی‌الکتریک با عدد کانونی ۱/۲ مناسب است، ولی عدم تقارن نسبی در دو صفحه متعامد موجب ایجاد خطای فاز (ابیراهی) در صفحه عدسی می‌شود. هرچه این الگو متقارن‌تر باشد، استفاده از آن به‌عنوان تغذیه تصویربرداری موج میلی‌متری بهتر است و باعث انتقال بهتر انرژی به موجبر و آشکارساز می‌شود.

یکی از نقاط ضعف هورن‌های پروفایل دیواره مسطح، عدم توانایی در دستیابی به قطبش متقاطع پایین نسبت به هورن دندانه‌دار در یک باند فرکانسی مشخص است. خطای فاز در دهانه به دلیل اختلاف مسیر بین جبهه موج کروی و جبهه موج مسطح ایده‌آل اتفاق می‌افتد. این

ترتیب ۰.۸۵٪ و ۰.۱۵٪ است. این نسبت ترکیبی منجر به حدود ۰.۹۹٪ مد خالص HE_{11} می‌شود، که تقریباً الگوی توان پرتوی گاوسی است [۱۴]. هورن‌های دندانه‌داری که به‌خوبی طراحی شده‌اند، پراش لبه کم، تقارن الگوی بهبودیافته و قطبش عرضی کاهش‌یافته دارند. دندانه‌ها شرایط مرزی یکسانی برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ایجاد می‌کنند. این تکنیک شامل تطبیق تدریجی موجبر دایره‌ای تک مد مسطح به حالت دندانه‌دار است که در آن عمق شیار به آرامی از ۱/۲ تا ۱/۴ طول موج تغییر می‌کند. مدهای موجبر TE_{11} و TM_{11} هنگامی که بین ناحیه گذار موجبر دیواره مسطح و مخروط دیواره دندانه‌دار برانگیخته می‌شوند، سرعت‌های فاز برابر دارند. هنگامی که فاز مدها برابر باشد، ترکیب مدها، مد هیبریدی HE_{11} را تشکیل می‌دهد [۳]. به دلیل اینکه مد غالب در آنتن‌های هورن دندانه‌دار HE_{11} است و مشکلات ذکر شده را ندارند، گزینه خوبی برای تغذیه سامانه اپتیکی تصویربرداری موج میلی‌متری هستند. این شیارها همچنین از پراش اطراف لبه‌های هورن (یا جریان سطحی جاری بر لبه و روی خروجی‌ها) جلوگیری می‌کند [۱۴].

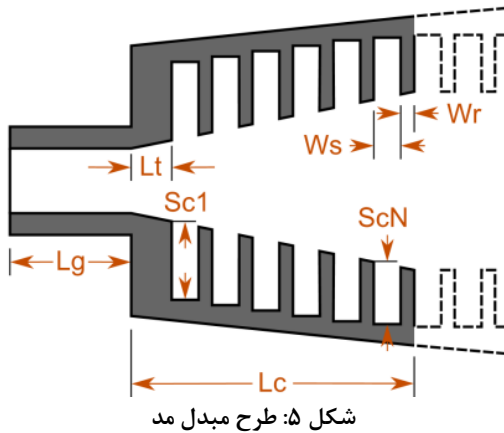
کمیت‌هایی مانند شعاع ورودی، شعاع خروجی، عمق شکاف‌ها، گام و نسبت گام به پهنا^۳، انتخاب مبدل مد، طول هورن، پروفایل سطح دندانه‌دار باید در طراحی هورن‌های دندانه‌دار تعریف شوند. در تعیین این کمیت‌ها، پارامترهایی مانند کمترین و بیشترین فرکانس عملکرد و فرکانس مرکزی که به پهنای باند هورن موردنظر بستگی دارد و با توجه به کاربرد هورن در باند باریک یا گسترده تعیین می‌شود، در طراحی نقش اساسی دارد. طول هورن نیز معمولاً توسط کاربرد آن مشخص می‌شود ولی اغلب بین ۵ تا ۱۰ برابر طول موج است، البته بعضی از کاربردها به هورنی با طول ۲۰ تا ۳۰ برابر طول موج احتیاج دارند. این طول بر گلب‌های جانبی و پایداری مرکز فاز هورن اثر می‌گذارد. در بعضی از کاربردها طرح طوری بهینه می‌شود که تا جای ممکن فشرده بوده تا قیمت و وزن کاهش یابد [۲۲].

۲-۱- طراحی هورن گاوسی با دیواره مسطح

عملکرد هورن‌های خطی را می‌توان با استفاده از پروفایل‌دار کردن دیواره بهبود داد. سهولت ساخت هورن پروفایل دیواره مسطح در محدوده موج میلی‌متری یک مزیت بزرگ است، زیرا ساخت هورن‌های دندانه‌دار می‌تواند پرهزینه و دشوار باشد. از دیگر مزایای آن می‌توان به کنترل تبدیل مد، بهبود تقارن و سطح گلب‌های جانبی الگوی تابشی اشاره کرد. هورن مخروطی توسط یک موجبر دایره‌ای در حالت TE_{11} برانگیخته می‌شود. آنتن هورن به‌عنوان انتقال بین مد دایره‌ای و مد فضای آزاد عمل می‌کند، در این قسمت میدان از جبهه موج مسطح به جبهه موج کروی شکل تغییر می‌کند. این فرآیند برای تشعشع مطلوب است [۲۸].

در این قسمت یک هورن گاوسی با دیواره مسطح (شکل ۲) به‌منظور قرار گرفتن به‌عنوان تغذیه یک عدسی دی‌الکتریک با عدد

TE_{11} شروع می‌شود و در قطر دهانه مورد نیاز برای بخش فازی که به‌عنوان تغذیه آنتن هورن با پروفایل گاوسی به کار می‌رود، به اتمام می‌رسد. پارامترهای پیشنهاد شده برای هورن مخروطی دندانه‌دار شکل ۵، در این قسمت در جدول ۲ برحسب میلی‌متر آمده است.



شکل ۵: طرح مبدل مد

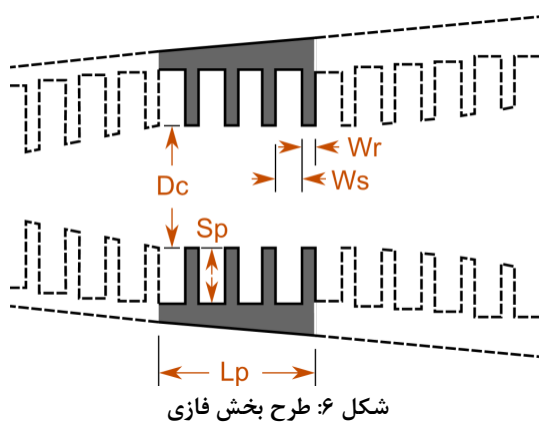
در جدول ۲، $2a$ قطر موجبر، Lg طول موجبر، Lt طول ناحیه گذار، $Sc1$ عمق اولین شیار در مبدل، ScN عمق آخرین شیار در مبدل، Ws پهناي شیار، Wr پهناي لبه، Lc طول محوری بخش مبدل و Nc تعداد شیارها در بخش مبدل است.

جدول ۲: پارامترهای مبدل مد

$2a$	Lg	Lt	$Sc1$	ScN	Ws	Wr	Lc	Nc
۲/۵۵	۳/۱۸	۰/۷۹۷	۱/۲۷	۰/۷۹	۰/۵۳	۰/۱۳	۸/۲۳	۱۰

۲-۲-۲-۲- بخش فازی

به دلیل فشردگی آنتن هورن دندانه‌دار در بخش اول، جهت‌مندی کم است و مراکز فاز در صفحات E و H منطبق نیستند. بنابراین از یک بخش فازی برای روی هم قرار دادن مراکز فاز در باند فرکانسی موردنظر استفاده شده است. همچنین این بخش ترکیب مدهای TE_{11} و TM_{11} را بهبود می‌بخشد. بخش فازی در شکل ۶ نشان داده شده است و پارامترهای طراحی این بخش در جدول ۳ برحسب میلی‌متر آمده‌اند.

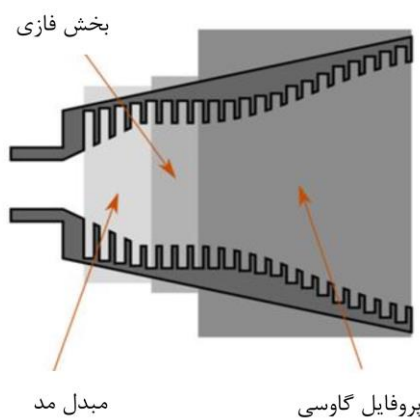


شکل ۶: طرح بخش فازی

خطای فاز منجر به کاهش بهره، گسترده‌تر شدن الگوی تابش، افزایش سطوح گلبرگ جانبی و ... می‌شود [۲۸]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مرحله بعد به طراحی و شبیه‌سازی یک هورن گاوسی دندانه‌دار در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز پرداخته شده است.

۲-۲- طراحی هورن گاوسی دندانه‌دار

ساختار این هورن بر اساس دست‌ورعمل ارائه شده در [۲۹] طوری طراحی شده است که الگوی تابشی مطلوبی برای استفاده در یک سامانه تصویربرداری موج میلی‌متری داشته باشد. این طرح همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شامل یک بخش دندانه‌دار خطی، بخش فازی و بخشی دندانه‌دار با پروفایل گاوسی است.



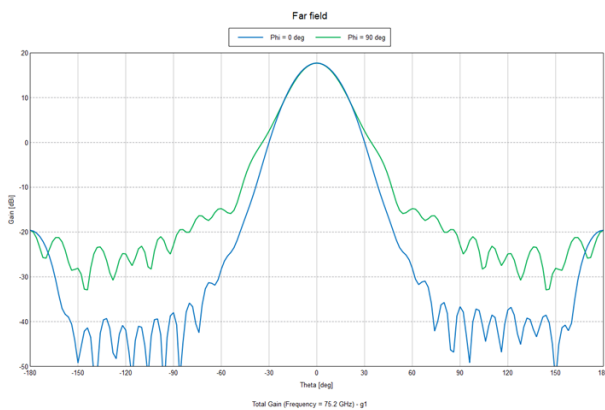
شکل ۴: طرح کلی هورن طراحی شده

این هورن شامل بخش موجبر دایروی است که گذار را از بخش خطی مسطح به بخش خطی دندانه‌دار انجام می‌دهد و به‌عنوان مبدل مد به کار می‌رود. عمق شکاف‌ها در بخش مبدل مخروطی با مقدار اولیه تقریباً نصف طول موج در بیشینه فرکانس شروع می‌شود و تا یک‌چهارم طول موج در فرکانس مرکزی پایان می‌یابد. پس از مبدل مد یک بخش مستقیم فازی قرار گرفته است که به‌عنوان تغذیه بخش پروفایل گاوسی عمل می‌کند. عمق تمام شکاف‌ها بعد از مبدل مد برابر هست. درنهایت از پروفایل گاوسی برای تطبیق بهتر با فضای آزاد استفاده شده است. در ادامه هر یک از این بخش‌ها بررسی می‌شود.

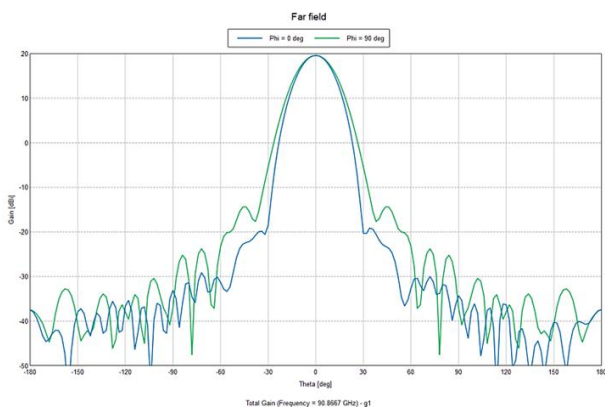
۲-۲-۱- مبدل مد TE_{11} به HE_{11}

به‌منظور برانگیختن مناسب پرتوی گاوسی، مد موجبر دندانه‌دار دایروی HE_{11} به‌عنوان ورودی هورن، بهترین انتخاب است. در ناحیه گردن هورن، از مبدل امپدانس برای تطبیق موجبر تک مد مسطح TE_{11} به موجبر دندانه‌دار استفاده می‌شود [۴]. بنابراین آنتن هورن با پروفایل گاوسی^۴ باید توسط مد کاملاً خالص HE_{11} تغذیه شود. آنتن هورن دندانه‌دار نرمال به‌عنوان مبدل TE_{11} تا HE_{11} انتخاب شده است. این مبدل مد معمولاً از موجبر تک مد دایره‌ای مسطح انتشاردهنده مد

شکل ۹ الگوهای تابشی هورن دندانه‌دار طراحی شده را در فرکانس‌های مطلوب طراحی و خارج از آن نشان می‌دهد و در شکل ۱۰ اتلاف برگشتی این هورن آورده شده است. در باند مطلوب فرکانسی، سطوح گلب‌گ‌های جانبی زیر $-38/5$ dB است که نتیجه خوبی است. فرکانس بالا محدودیت سطوح گلب‌گ‌های جانبی پهنای باند است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گلب‌گ‌های جانبی در فرکانس‌های بالاتر بیشتر می‌شود و پهنای باند گلب‌گ جانبی تا حدود ۶ GHz محدود می‌شود. همچنین سطح قطبش متعامد در باند فرکانسی $72/5$ تا $112/5$ گیگاهرتز حدود -28 dB است. تقارن الگو بسیار خوب است و پهنای باند 10 dB در این هورن حدود 40 درجه است که آن را نماینده مناسبی برای استفاده در سامانه‌های شبه‌اپتیک عبوری می‌سازد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، با افزایش فرکانس، بهره نیز بیشتر و الگو متقارن‌تر می‌شود.



شکل ۹(الف): الگوی تابشی میدان دور در فرکانس $75/2$ گیگاهرتز



شکل ۹(ب): الگوی تابشی میدان دور در فرکانس $90/8$ گیگاهرتز

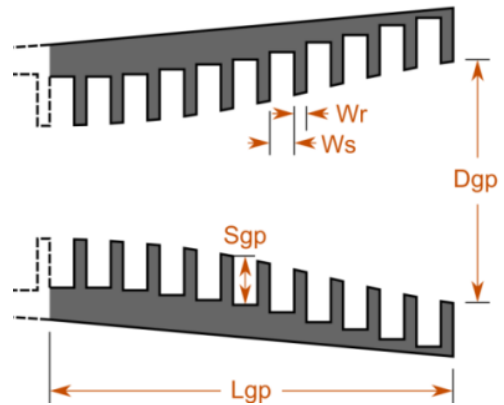
در جدول ۳، Dc قطر بخش فازی، Sp عمق شیار در بخش فازی، Lp طول بخش فازی، Np تعداد شیارها در بخش فازی و Ws و Wr مانند بخش قبل به ترتیب پهنای شیار و پهنای لبه هستند.

جدول ۳: پارامترهای بخش فازی

Dc	Sp	Lp	Np
۹/۱۷	۰/۷۹	۲/۶۵	۴

۳-۲-۲- آنتن هورن دندانه‌دار با پروفایل گاوسی

در نهایت پارامترهای طراحی این بخش نیز مطابق با شکل ۷، در جدول ۴ برحسب میلی‌متر آورده شده است.



شکل ۷: طرح بخش دندانه‌دار گاوسی

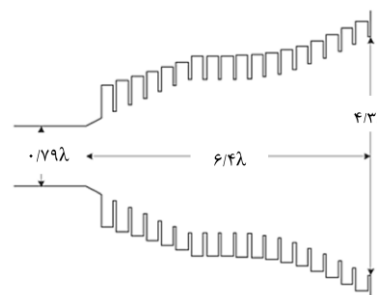
در جدول ۴، Dgp قطر نهایی پروفایل گاوسی، Sgp عمق شیار در پروفایل گاوسی، Lgp طول بخش پروفایل گاوسی، Ngp تعداد شیارها در بخش پروفایل گاوسی و Ws و Wr مانند بخش قبل به ترتیب پهنای شیار و پهنای لبه هستند.

جدول ۴: پارامترهای بخش گاوسی

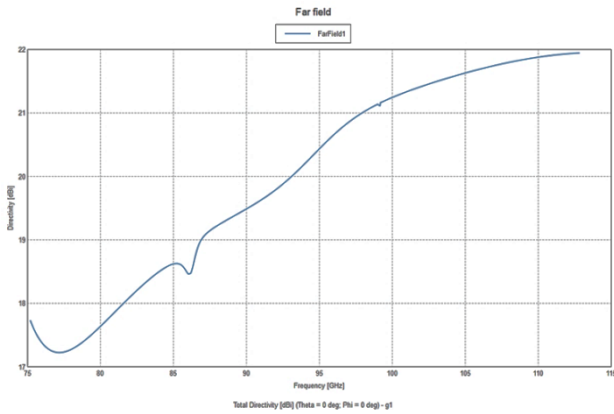
Dgp	Sgp	Lgp	Ngp
۱۳/۹	۰/۷۹	۹/۹۶	۱۵

۴-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی هورن دندانه‌دار

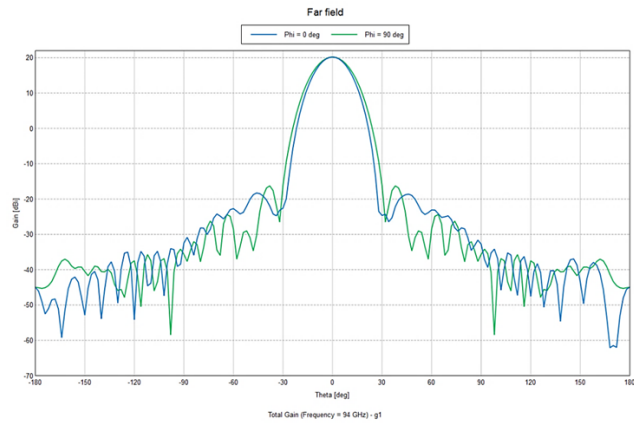
هورن دندانه‌دار با پروفایل گاوسی طراحی شده به صورت کامل در شکل ۸ نشان داده شده است. طول کل آن برابر $6/84$ و شعاع خروجی آن $4/3$ است.



شکل ۸: هورن دندانه‌دار گاوسی طراحی شده



شکل ۱۰: جهتمندی هورن بر حسب فرکانس



شکل ۹(پ): الگوی تابشی میدان دور در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز

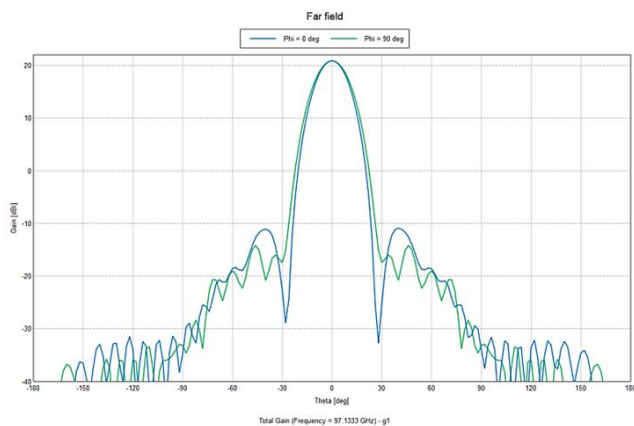
۳- نتیجه

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، هورن گاوسی دندانه‌دار بهینه شده در مقایسه با هورن گاوسی با دیواره مسطح در فرکانس ۹۴ گیگاهرتز، پراش لبه کمتر، تقارن الگوی بهبود یافته و قطبش متعامد کاهش یافته دارد. این آنتن برای بهره حدود ۲۰ دسی‌بل با پهنای پرتوی ۱۰ dB برابر با ۴۰ درجه در صفحات E و H باهدف ایجاد تقارن الگوی محوری خوب طراحی شده است، بنابراین نماینده مناسبی جهت استفاده در سامانه عدسی دی‌الکتریک عبوری است.

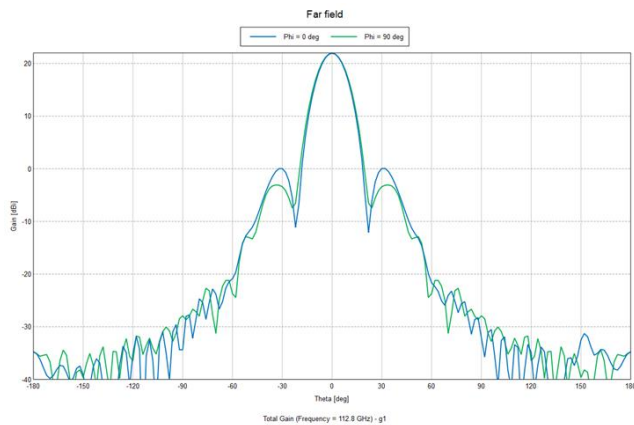
سطح گلبه‌های جانبی در فرکانس مرکزی ۹۴ گیگاهرتز برابر با ۳۷- dB است و عملکرد آن در ناحیه بالای باند فرکانسی کاهش یافته است. بنابراین با توجه به ویژگی‌های این هورن، می‌توان از آن به عنوان تغذیه در تصویربرداری موج میلی‌متری عبوری یا بازتابی با عدد کانونی مناسب استفاده نمود.

مراجع

- [1] J. Zhou, Q. Chen, Y. Zhang, Y. Fan, and K. Da Xu, "Aspheric dielectric lens antenna for millimeter-wave imaging system," in *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, pp. 1-3, 2015.
- [2] G. M. Rebeiz, D. P. Kasilingam, Y. Guo, P. A. Stimson, and D. B. Rutledge, "Monolithic millimeter-wave two-dimensional horn imaging arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, pp. 1473-1482, 1990.
- [3] C. T. Taylor, *Enhancement of imagery from passive millimetre-wave systems for security scanning*, Ph.D. Thesis, The University of Manchester, Manchester, UK, 2015.
- [4] W.-G. Kim, N.-W. Moon, M. K. Singh, H.-K. Kim, and Y.-H. Kim, "Characteristic analysis of aspheric quasi-optical lens antenna in millimeter-wave radiometer imaging system," *Applied optics*, vol. 52, pp. 1122-1131, 2013.
- [5] J. Laviada, A. Arboleya-Arboleya, Y. Álvarez, B. González-Valdés, and F. Las-Heras, "Multiview three-dimensional reconstruction by millimetre-wave portable camera," *Scientific reports*, vol. 7, pp. 1-11, 2017.
- [6] C. M. Watts, P. Lancaster, A. Pedross-Engel, J. R. Smith, and M. S. Reynolds, "2D and 3D millimeter-wave



شکل ۹(ت): الگوی تابشی میدان دور در فرکانس ۹۷/۱ گیگاهرتز



شکل ۹(ث): الگوی تابشی میدان دور در فرکانس ۱۱۲/۸ گیگاهرتز

- [22] R. Gonzalo, J. M. Canales, J. Teniente, C. Del Rio, and M. Sorolla, "Measurements of a new Gaussian profile corrugated horn antenna for millimeter wave applications," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1998 Digest. Antennas: Gateways to the Global Network. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No. 98CH36)*, pp. 1722-1725, 1998.
- [23] R. Nesti, G. Pelosi, S. Pilia, and S. Selleri, "Design of a 67–116GHz corrugated circular horn for the ALMA radio telescope," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 565-566, 2017.
- [24] A. Kishk and C.-S. Lim, "COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN CONICAL AND GAUSSIAN PROFILED HORN ANTENNAS-Abstract," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 17, pp. 599-600, 2003.
- [25] T. Salimi, A. Maghoul, and A. A. Abbasid, "Design of a compact Gaussian profiled corrugated horn antenna for low sidelobe-level applications," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 5, p. 223, 2013.
- [26] A. D. Olver and J. Xiang, "Design of profiled corrugated horns," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 36, pp. 936-940, 1988.
- [27] J. T. Vallinas, *Modern corrugated horn antennas*, PhD Thesis, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2003.
- [28] L. Shafai, S. K. Sharma, and S. Rao, *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems Volume II: Feed Systems*: Artech House, 2013.
- [29] C. Granet and G. L. James, "Design of corrugated horns: A primer," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, pp. 76-84, 2005.
- synthetic aperture radar imaging on a PR2 platform," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4304-4310, 2016.
- [7] A. Jouadé, *Millimeter-wave radar imaging systems: focusing antennas, passive compressive device for MIMO configurations and high resolution signal processing*, PhD Thesis, 2017.
- [8] H. Chen, Z. Long, L. Niu, Z. Yang, J. Liu, and K. Wang, "Millimeter-wave SFCW SAR imaging system based on in-phase signal measurement with simplified transceiver," *Optics Express*, vol. 28, pp. 1526-1538, 2020.
- [9] N. Mohammadian, O. Furxhi, R. Short, and R. Driggers, "Performance comparison of sparse array millimeter wave imager configurations," *Optics express*, vol. 27, pp. 19292-19308, 2019.
- [10] M. E. Yanik and M. Torlak, "Millimeter-wave near-field imaging with two-dimensional SAR data," in *Proc. SRC Technon*, 2018.
- [11] M. Yanik, M. E. Yanik, D. Wang, and M. Torlak, "3-D MIMO-SAR Imaging Using Multi-Chip Cascaded Millimeter-Wave Sensors," in *IEEE GLOBALSIP 2019*, 27 November 2019.
- [12] H. Hu, M. Karim, L. Ong, A. Leyman, B. Luo, T. Chiam, et al., "Millimeter wave imaging using SAR modeling," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO)*, pp. 1-3, 2013.
- [13] Q. Chen, Y. Fan, J. Zhou, and K. Song, "Design of Quasi-Optical Lens Antenna for W-Band Short Range Passive Millimeter-Wave Imaging," *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, p. 93, 2015.
- [14] M. Bevan, *Electromagnetic Analysis of Horn Antennas in the Terahertz region*, M.S. Thesis, National University of Ireland Maynooth, 2013.
- [15] Q. Jinghui, Z. Zhong, L. Kai, L. Gaofei, and X. Fei, "Design and measurement of quasi-optics for millimeter wave imaging system," in *2009 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, pp. 132-135, 2009.
- [16] C. Granet, "Profile options for feed horn design," in *2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No. 00TH8522)*, pp. 1448-1451, 2000.
- [17] T. A. Milligan, *Modern antenna design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [18] J. E. McKay, D. A. Robertson, P. J. Speirs, R. I. Hunter, R. J. Wylde, and G. M. Smith, "Compact Corrugated Feedhorns With High Gaussian Coupling Efficiency and -60 dB Sidelobes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, pp. 2518-2522, 2016.
- [19] L. Lucci, R. Nesti, G. Pelosi, and S. Selleri, "Design of an improved profiled corrugated circular horn at 320 GHz," *Journal of electromagnetic waves and applications*, vol. 18, pp. 387-396, 2004.
- [20] Y. Yao, Y. Cao, Y. Liu, J. Yu, and X. Chen, "Design and implementation of THz ultra-Gaussian corrugated feed horn," in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, pp. 1-4, 2014.
- [21] J. Wang, Y. Yao, C. Yang, X. Liu, L. Qi, Z. Chen, et al., "Design of a 94 GHz compact corrugated horn with ultra-low sidelobe," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1359-1360, 2016.

زیر نویس‌ها

¹ Spatial Resolution² Synthetic Aperture Radar³ Hanjiang Chen⁴ Spatial Stepped Frequency Continuous Wave⁵ M. Yanik⁶ Frequency-Modulated Continuous-Wave⁷ Quasi Optical⁸ Flared Sections⁹ Couple¹⁰ L. Lucci¹¹ Yao¹² Gonzalo¹³ Pitch-to-Width Ratio¹⁴ Gaussian Profiled Horn Antenna