

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-مخابرات-میدان

طراحی و تحلیل آرایه‌ای از تشعشع کننده‌های صفحه‌ای کوپل شده با آنتن لوز

در باند تراهرتز

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا داداش زاده

دانشجو:

فاطمه نیک بخت

زمستان ۹۲

کلیه حقوق این پایان نامه متعلق به دانشگاه شاهد می باشد.

تقدیر و تشکر

بر خود واجب می‌دانم تا از راهنمایی‌ها و مشاوره‌های استاد گرانقدر آقای دکتر غلامرضا داداش زاده که مرا در انجام این پروژه یاری دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

محدوده‌ی فرکانسی تراهرتز به علت متمایز بودن رفتار مواد مختلف در این ناحیه، مطالعات کمی در این حوزه صورت گرفته است. با توجه به اینکه مهم‌ترین المان یک سیستم انتقال اطلاعات آنتن می‌باشد، هدف از این پروژه طراحی آنتن با بازده بالا در محدوده تراهرتز می‌باشد. همچنین در ناحیه تراهرتز به جهت ناچیز بودن عمق پوستی رسانا، تلفات رسانایی بسیار زیاد است لذا آرایه‌ای از آنتن‌های موج نشستی بر روی زیرلایه مسطح می‌توان استفاده کرد که تغذیه این آنتن‌ها به روش موجبری باشد.

در فرکانس‌های مربوط به موج زیر میلی متری قرار دادن آرایه‌ای از تشعشع‌کننده‌ها، تحت پوشش تنها یک آنتن لنز سبب می‌شود که اثرات ناشی از تلفات زیرلایه کاهش یابد. در این پایان‌نامه با شبیه‌سازی کامل ساختار آرایه‌ای آنتن موج نشستی و بکارگیری تکنیکی مبنی بر ایجاد زمین امپدانس بالا، جریان سطحی ساختار مسطح را کاهش داده و به زمینی با نصف ابعادی که تا پیش از این ارائه شده بوده، دست یافته‌ایم. طراحی مناسب ساختار ارائه شده، سبب کاهش تلفات زیرلایه و سرریز و همچنین دستیابی به آنتنی با راستاوی بالا شده است.

کلید واژه: محدوده تراهرتز، آرایه موج نشستی، زمین امپدانس بالا، آنتن لنز.

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- تاریخچه	۱
۲-۱- هدف از انجام تحقیق	۴
۳-۱- ساختار پایان نامه	۶
فصل ۲- مقدمه ای بر آنتن موج نشتی محدوده تراهرتز	۸
۱-۲- محدوده فرکانسی تراهرتز	۸
۲- آنتن موج نشتی	۱۴
۲-۲-۱- طراحی آنتن با دو اسلات	۱۵
۲-۲-۲- آنتن موج نشتی به عنوان تغذیه آنتن لنز	۱۸
۲-۲-۳- آرایه موج نشتی	۲۴
۳-۲- زمین امیدانس بالا	۳۴
۴-۲- آنتن لنز	۳۷
۴-۲-۱- عملکرد آنتن لنز	۳۸
فصل ۳- طراحی آرایه آنتن موج نشتی تحت پوشش آنتن لنز	۴۲
۱-۳- مقدمه	۴۲
۲-۳- طراحی تشعشع کننده مسطح تحت پوشش آنتن لنز	۴۳
۲-۳-۱- طراحی آنتن موج نشتی دو اسلات	۴۴
۲-۳-۲- طراحی زمین امیدانس بالا	۴۶
۲-۳-۳- طراحی محفظه تشدید	۵۰
۴-۲-۳- طراحی آنتن لنز	۵۱
۳-۳- طراحی آرایه آنتن موج نشتی تحت پوشش آنتن لنز	۵۲
۳-۳-۱- طراحی آرایه آنتن موج نشتی	۵۲
۳-۳-۲- طراحی آرایه آنتن موج نشتی با محفظه تشدید و لایه دی الکترونیک فوقانی	۵۴
۳-۳-۳- طراحی آرایه آنتن موج نشتی تحت پوشش آنتن لنز	۵۵
فصل ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات	۵۷
فهرست مراجع	۵۹

برای تامین نیاز کاربران، ظرفیت اطلاعات سیستم‌های بی‌سیم در حال ارتقا می‌باشد؛ بطوری که سرعت رشد آن از سیستم‌های سیمی بسیار فراتر است. سیستم‌های بی‌سیم امروزی بر اساس فرکانس‌های مایکروویوی کار می‌کنند که ظرفیت انتقال اطلاعات آن‌ها با افزایش بهره‌وری از طیف فرکانسی ارتقا می‌یابد. این افزایش بهره‌وری با استفاده از مدولاسیون‌های متفاوت و پردازش‌های سیگنالی گوناگون، انجام می‌گیرد. برای رسیدن به سرعت‌های انتقال اطلاعات 10Gb/s و یا بیشتر، سیستم‌های امروزی به علت کمی پهنای باند فرکانسی دارای محدودیت هستند. به‌همین دلیل، نیاز به منابع طیفی جدیدی برای سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم آینده با سرعت بالا، احساس می‌شود. کاندیداهای مختلفی نظیر سیستم‌های با پهنای باند زیاد (UWB)^۱، فرکانس رادیویی در ۶۰ گیگاهرتز، مخابرات نوری فضای آزاد و تراهرتز برای استفاده در سیستم‌های بی‌سیم آینده پیشنهاد شده‌اند. ویژگی مهم باند تراهرتز بالا بودن نرخ انتقال دیتا، قدرت تفکیک فضایی بالا و غیرمخرب بودن پرتو تراهرتز به‌منظور تصویربرداری است.

۱-۱- تاریخچه

تراهرتز غیر از کاربردهای محدود در کیهان‌شناسی، به‌علت محدودیت در وسایل و ادوات تولید و آشکارسازی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌است. ظهور لیزرهای فمتوثانیه^۲ و آنتن‌های نور-رسانایی^۳ در دهه‌ی ۱۹۸۰ باعث کاربردی شدن تراهرتز در علوم پزشکی، علوم دارویی و کاربردهای امنیتی شد. با پیشرفت‌های جدید در وسایل تراهرتز، محدوده فرکانسی ۲۷۵-۳۰۰۰ گیگاهرتز توجه بسیاری از محققان را برای استفاده از آن در مخابرات بی‌سیم به خود جلب کرده-

^۱ Ultra Wide Band

^۲ Femto second

^۳ Photoconductive

است [۱]. محدوده‌ی فرکانسی تراهرتز به علت متمایز بودن رفتار مواد مختلف در این ناحیه، مطالعات کمی در این حوزه صورت گرفته است.

یکی از موانع اصلی در سر راه فناوری تراهرتز فقدان ماده‌ای کارا برای دستکاری امواج این طیف است؛ داشتن ماده‌ای دو بعدی، مستحکم و قابل تنظیم مانند گرافن^۱ می‌تواند فرصت تازه‌ای برای طراحی ادوات تراهرتز ارائه کند. گرافن ماده‌ای نیمه‌هادی به ضخامت یک اتم است که دارای خواص الکترونیکی، مکانیکی و حرارتی منحصر به فردی است [۲]. از این ماده می‌توان برای تولید ترانزیستورهای سریع، قطعات الکترونیکی شفاف و انعطاف‌پذیر، ادوات نوری و قطعات فعال تراهرتز استفاده کرد. گرافن هسته اصلی این فناوری است. دو دانشمند بریتانیایی به دلیل کار بر روی این ماده در سال ۲۰۱۰ جایزه نوبل دریافت کردند. با این حال هنوز این ماده به شکل جدی در محصولات تجاری وارد نشده است. استفاده از گرافن در دستکاری امواج تراهرتز یکی از حوزه‌هایی است که گرافن می‌تواند در آن نقش‌آفرین باشد.

با توجه به اینکه مهم‌ترین المان یک سیستم انتقال اطلاعات، آنتن می‌باشد، اغلب سیستم‌های مخابرات نوری نیازمند آنتن با راستاوی بالا هستند. پیش از این آنتن هورن، بعنوان تغذیه آنتن رفلکتور، مورد استفاده قرار گرفته است ولی در فرکانس‌های بالا ساخت آنتن هورن دشوار است. همچنین در ناحیه تراهرتز عمق پوستی رسانا ناچیز است؛ بنابراین تلفات رسانایی بسیار زیاد است [۳]. بنابراین از آرایه یکپارچه‌ای از آنتن‌ها بر روی زیرلایه مسطح استفاده می‌شود که اغلب آنتن‌های مسطح، الگوی بیم پهنی دارند و برای کوپل توان با بازدهی مناسب به تلسکوپ‌های نوری از آرایه‌ای از این آنتن‌ها همراه با آنتن لنز استفاده می‌شود [۳]. در مخابرات فضایی؛ استفاده

^۱ Graphene

از تعداد زیادی آشکارساز، به منظور تصویر برداری آرایه‌ای، کاربرد فراوان دارد. در فرکانس‌های مربوط به موج زیرمیلی‌متری قرار دادن آرایه‌ای از تشعشع‌کننده‌ها، تحت پوشش تنها یک آنتن لنز سبب می‌شود که اثرات ناشی از تلفات در زیرلایه کاهش یابد [۳]. هم‌چنین از آنتن‌های باندهای تراهرتز به منظور تصویربرداری در پزشکی و تشخیص سرطان و در کاربردهای امنیتی به منظور تشخیص سلاح و مواد منفجره پنهان شده و رادار سنجش از راه دور^۱ استفاده می‌شود.

تاکنون از آنتن‌های مسطح مختلفی به منظور آشکارسازی استفاده شده است که از آن جمله می‌-توان به آنتن دوقطبی معمولی [۴]، آنتن دوقطبی خمیده^۲ [۵]، آنتن مارپیچی^۳ [۶]، آنتن پایبونی^۴ [۷]، آنتن متناوب [۸]، آنتن حلقه‌ای [۹]، آنتن هلیکال^۵ [۱۰]، و آنتن دی‌الکتریک میله‌ای [۱۱] اشاره نمود. تغذیه این آنتن‌ها توسط تابش لیزر فراهم می‌شود و به آنها آنتن‌های نور-رسانایی گفته می‌شود [۴]. استفاده از آنتن دو اسلات^۶ با تغذیه میکرواستریپ از جمله کارهای انجام شده است [۱۱]. در نمونه‌های دیگری از روش موجبری برای تغذیه آنتن اولیه استفاده شده است؛ بعنوان نمونه، در سال ۲۰۰۸، برای اولین بار، از روش تغذیه با کمک موجبر موج نشستی استفاده شده است [۱۲]. استفاده از موجبر موج نشستی موجب افزایش راستاوی تشعشع آنتن اولیه شده و با کاهش تاثیر بازتابش‌های سطح لنز و هوا مناسب برای کاربردهای تصویربرداری می‌باشد. بدلیل پهنای باریک پرتوی اغلب این آنتن‌ها تنها بخش کوچکی از ساختار نیمه کروی آنتن لنز بوسیله

^۱ Remote sensing radar

^۲ Folded dipole

^۳ Spiral

^۴ Bow tie

^۵ Helical

^۶ Double slot

آنتن اولیه تحت پوشش پرتو قرار میگیرد و بنابراین برای تصویربرداری‌های آرایه‌ای مجبور به استفاده از آرایه‌ای از آنتن‌های لنز در کنار هم شده‌اند. در [۱۳] به بررسی رابطه میان راستاوی پرتو و نزدیکی المان‌های آرایه به یکدیگر و رابطه آن با پهنای باند پرداخته شده‌است.

۱-۲- هدف از انجام تحقیق

یکی از معایب امواج تراهرتز وجود تلفات بالای آنها در محیط اتمسفر می‌باشد. تلفات محیط برای فرکانس‌های بیشتر از ۱۰۰ گیگاهرتز بسیار افزایش می‌یابد و این باعث کاهش محدوده پوشش برای ارتباطات و کاهش سیگنال به نویز می‌شود که در کاهش ظرفیت انتقال اطلاعات موثر می‌باشد. در فرکانس‌های بالاتر از ۱ تراهرتز تلفات غالباً ناشی از ملکول‌های آب و گازهای دیگر است، به همین دلیل برای استفاده از این پهنای باند فرکانس در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم بهتر است فرکانس آن‌ها کمتر از یک تراهرتز در نظر گرفته شود [۱۴]. البته باید در نظر داشت که تاثیر تلفات در مخابرات بی‌سیم، در درون ساختمان^۱ بسیار کمتر از کاربردهای خارج از ساختمان^۲ می‌باشد.

از آنجایی که نرخ انتقال امواج زیرمیلیمتری بسیار بالاست و این امواج قدرت تفکیک بیشتری در تصاویر دارند و همچنین غیرمخرب و بی‌خطر بودن این امواج نسبت به اشعه ایکس^۳ (که می‌تواند در مواد بسیاری نفوذ کند بدون اینکه خطری از نظر آسیب ناشی از تولید مواد یونیزه که توسط اشعه ایکس ایجاد می‌شود وجود داشته باشد)؛ کاربرد آنتن‌های تراهرتز در زمینه

^۱ Indoor

^۲ Outdoor

^۳ X-ray

تصویربرداری، آشکارسازی و کاربردهای راداری بسیار مناسب می‌باشد. امواج تراهرتز می‌توانند ردپای شیمیایی مواد دارویی، اسلحه‌های بیولوژیکی، داروهای غیرقانونی یا مواد منفجره را بیابند. تشخیص تومورهای سرطانی، مخابره داده بین ماهواره‌ها، دوربین‌های "دید در شب"، ساخت سلول‌های خورشیدی، تصویرنگاری تراهرتز، مطالعات اخترشناسی، ضخامت سنج و حسگر آتش از جمله موارد کاربرد این سیستم هستند. کاربردهای تصویربرداری تراهرتز را به صورت زیر می‌توان دسته بندی نمود:

- تصویر برداری از بیرون برای تشخیص اسلحه و یا مواد منفجره که فرد ممکن است در داخل بدن و یا زیرلباس خود قرار داده باشد.
- تشخیص جنس و نوع مواد، مانند تشخیص مواد در بسته های مشکوک در گیت‌های فرودگاه
- کنترل کیفیت برای تولید کنندگان چیپ الکترونیکی، با این کار نواقص ایجاد شده در فرآیند ساخت که ممکن است با تصویربرداری نور مرئی پنهان شده باشد، آشکار شود.
- و کاربردهای پزشکی مانند تصویربرداری از غدد سرطانی که زندگی افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

یکی از بزرگترین موانع کار در باند تراهرتز، تلفات بالای زیرلایه ساختار می‌باشد که موجب بازدهی بسیار کم ساختارهایی که تا پیش از این ارایه شده، می‌باشد. در این پایان‌نامه برآنیم تا با استفاده از چندین ساختار تشعشع کننده، پرتویی با راستاوی^۱ بالا ایجاد نماییم تا با تزویج تشعشع اولیه به آنتن لنز به ساختاری با بازده مناسب دست یابیم. راستاوی مناسب ساختار ارائه شده

^۱ Directivity

موجب افزایش فاصله کانونی آنتن لنز گردیده و در نتیجه پارامترهای مرتبط همچون سرریز بهبود می‌یابند.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در فصل بعد، ابتدا به معرفی محدوده فرکانسی تراهرتز، خواص و ویژگی‌های منحصر به فرد مواد مختلف در این محدوده فرکانسی پرداخته شده‌است. سپس به بیان ویژگی‌های موج نشستی^۱ و چگونگی انتشار آن اشاره شده و اصول و روابط مربوط به طراحی آنتن شکاف‌دار و همچنین مزیت استفاده از آنتن دوشکاف نسبت به تک شکاف ارائه شده‌است. در ادامه با معرفی یک آنتن دوشکاف که تحت پوشش آنتن لنز در باند تراهرتز است، ایده اصلی ساختار آنتن طراحی شده در این پروژه معرفی می‌گردد. به دلیل آن‌که در طراحی آنتن مورد نظر از آرایه نمودن ساختار مذکور استفاده شده‌است، به عوامل موثر بر آرایه نمودن آنتن موج نشستی و کاربرد روش "زمین امیدانس بالا"^۲ (HIGP) به منظور کاهش تزویج متقابل^۳ میان المان‌های آرایه موج نشستی پرداخته شده‌است. در تکمیل عوامل مختلف بر طراحی ساختار پیشنهادی در فصل سوم؛ به بررسی انواع آنتن‌های لنز، ویژگی‌ها و بررسی شکل ظاهری آن‌ها و بیان مناسب‌ترین ساختار این آنتن برای طراحی مدنظر اشاره شده‌است.

در فصل سوم به بیان گام به گام طراحی یک آرایه موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز پرداخته شده‌است. این روند با طراحی آنتن اولیه موج نشستی دو شکاف شروع شده و در گام بعدی زمین

^۱ Leaky wave

^۲ High Impedance Ground Plane

^۳ Mutual coupling

ساختار مذکور را به زمین امپدانس بالا تبدیل نموده‌ایم و اثر تغییر جنس ماده دی‌الکتریک به کار رفته در طراحی زمین امپدانس بالا را در میزان راستاوی آنتن بررسی کرده و سپس با آرایه کردن موجبر موج نشستی توزیع متقابل میان المان‌های آرایه مورد بررسی قرار گرفته است. پس از طراحی آنتن اولیه، بر روی آن، محفظه تشدید^۱ هوا و لایه دی‌الکتریک^۲ به منظور کاهش عرض پرتو انتشار یافته قرار دادیم و در گام نهایی از آنتن لنز سیلیکونی نیمه کروی برای افزایش بازده و راستاوی آنتن استفاده نموده‌ایم. ذکر این نکته ضروری است که تمامی مراحل طراحی این آنتن در نرم‌افزار Ansoft HFSS انجام شده است. در نهایت، در فصل چهارم به جمع بندی کارهای انجام شده می-پردازیم و پیشنهاداتی را برای کارهای آتی ارائه خواهیم داد.

^۱ Resonance cavity

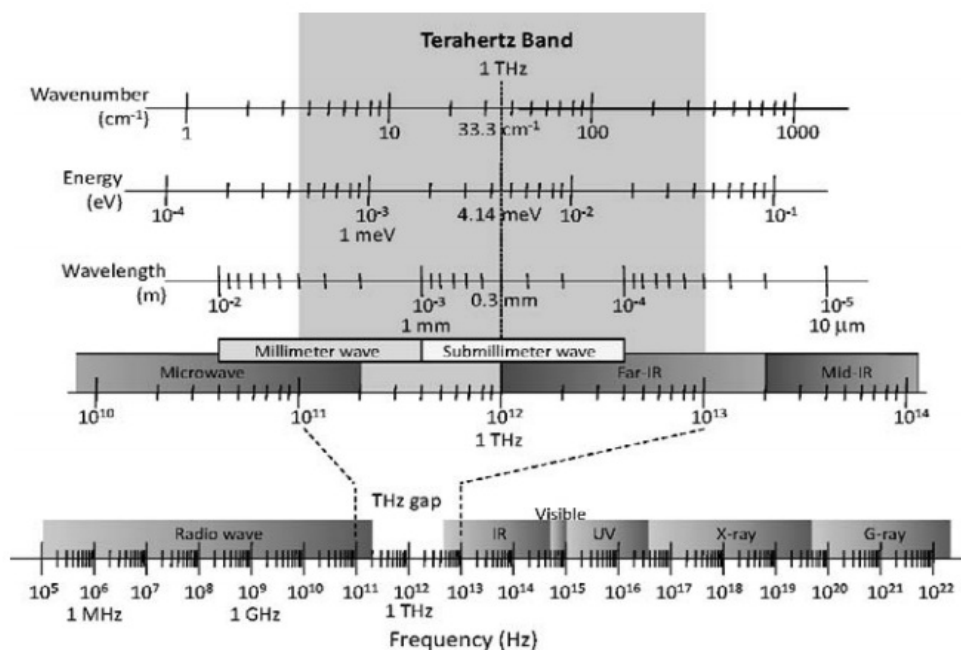
^۲ Super-layer dielectric

فصل ۲- مقدمه‌ای بر آنتن موج نشتی محدوده تراهرتز

در این فصل به معرفی محدوده فرکانسی تراهرتز، خواص و ویژگی‌های منحصر به فرد مواد مختلف در این محدوده فرکانسی پرداخته می‌شود. سپس به بیان ویژگی‌های موج نشتی و چگونگی انتشار آن اشاره شده و اصول و روابط مربوط به طراحی آنتن شکاف‌دار و همچنین مزیت استفاده از آنتن دوشکاف نسبت به تک شکاف ارائه خواهد شد. در ادامه با معرفی یک آنتن دوشکاف که تحت پوشش آنتن لنز در باند تراهرتز است، ایده اصلی ساختار آنتن طراحی شده در این پایان‌نامه معرفی می‌گردد. در طراحی آنتن مورد نظرمان از آرایه نمودن ساختار مذکور استفاده شده، بنابراین به عوامل موثر بر آرایه نمودن آنتن موج نشتی و کاربرد تکنیک HIGP بمنظور کاهش تزویج متقابل میان المان‌های آرایه موج نشتی پرداخته می‌شود. در بخش پایانی این فصل، به بررسی انواع آنتن‌های لنز، ویژگی‌ها و بررسی شکل ظاهری آن‌ها و بیان مناسب‌ترین ساختار این آنتن پرداخته خواهد شد.

۲-۱- محدوده فرکانسی تراهرتز

تقاضای روبه‌رشد در مخابرات بی‌سیم، به منظور استفاده از امکانات جدید؛ مانند دسترسی سریع به شبکه جهانی اینترنت، تلفن تصویری و امکان ارسال اطلاعاتی با حجم زیاد در بازه زمانی کوتاه؛ موجب شده‌است که نیازمند پهنای باند بیشتری برای سهولت استفاده از این امکانات باشیم. تکنولوژی تراهرتز یکی از روش‌های دستیابی به این امکانات می‌باشد.

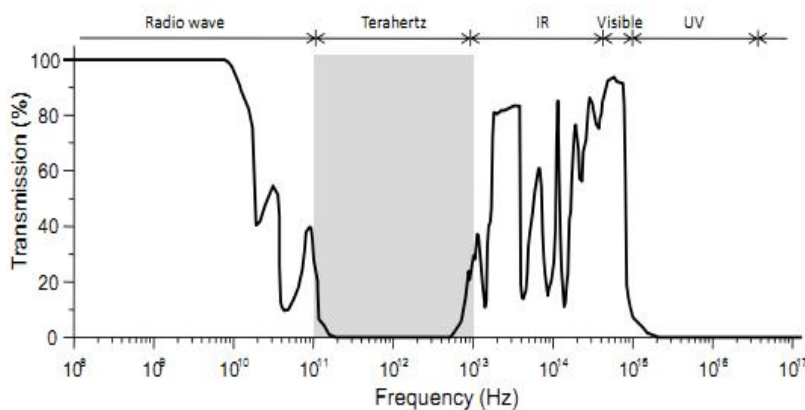


شکل ۱-۲ طیف فرکانسی تراهرتز [۴]

میدان‌های تراهرتز به امواجی با طیف فرکانسی ۱۰-۱ تراهرتز (شکل ۱-۲) گفته می‌شود، که این طیف پس از ناحیه‌ی میکروویو و پیش از ناحیه‌ی مادون قرمز قرار دارد. البته در عمل فرکانس تراهرتز را از ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز در نظر گرفته می‌شود، که مشتمل بر امواج میلی‌متری و زیرمیلی‌متری می‌باشد. این محدوده‌ی فرکانسی اهمیت علمی بالایی دارد؛ زیرا در ناحیه‌ی گذر از میکروفیزیک به تئوری کوانتومی میکروکاسمیک جای دارد.

به منظور رسیدن به درک بهتری از این ناحیه‌ی فرکانسی، ذکر این نکته ضروری است که در ناحیه تراهرتز، طول موج $3\text{ mm} - 0.03\text{ mm}$ می‌باشد که مابین طیف موج میلی‌متری و موج نوری قرار گرفته‌است. بر روی ناحیه تراهرتز کم‌ترین مطالعات تاکنون صورت گرفته‌است. در واقع به-دلیل ویژگی چند ماهیتی این ناحیه، تحقیقات بر روی آن نیازمند دانش عمیقی پیرامون فوتونیک، اپتیک، مهندسی میکروویو و فیزیک نیمه‌رساناها می‌باشد. هم‌چنین این طیف فرکانسی در علوم

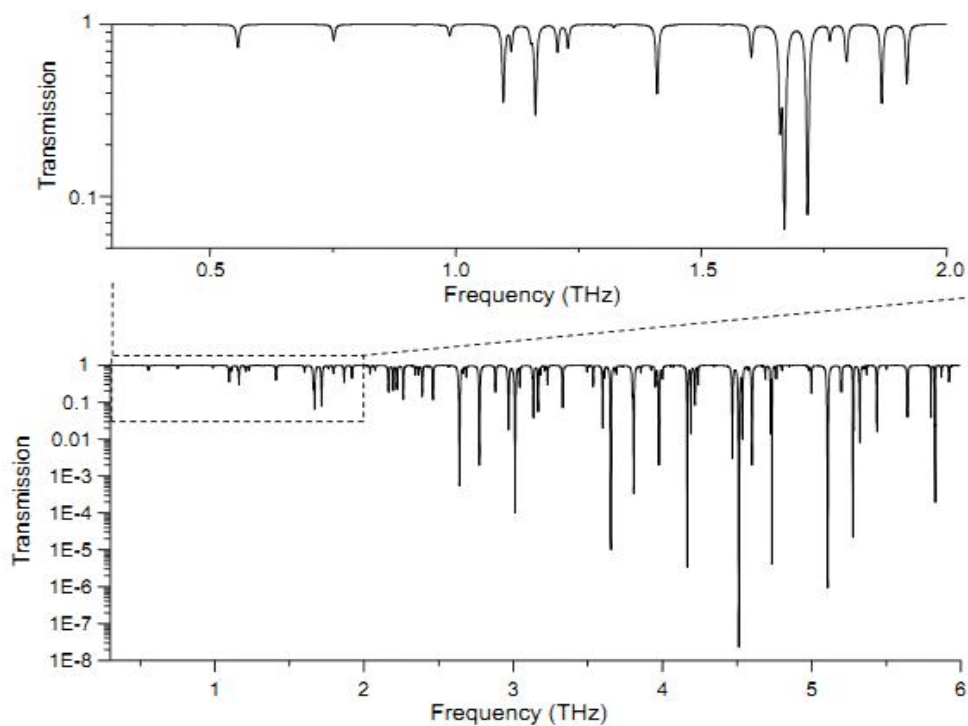
چون فیزیک نجومی، فیزیک پلاسما، طیف نگاری، تصویر برداری پزشکی، زیست‌شناسی و مخابرات کاربرد دارد. طیف موج تراهرتز در جایگاهی مابین الکترونیک و فوتونیک قرار گرفته- است و به همین علت می‌توان از دانش اپتیک یا الکترونیک و یا تلفیقی از این دو برای تولید، آشکارسازی و اجرای فرآیندهایی بر روی این میدان‌ها استفاده نمود. به‌عنوان نمونه می‌توان از روش تبدیل نوری و یا روش نور-رسانایی میدان تراهرتز تولید نمود و آن را با موجبر مسطح هدایت نمود و یا از امواج منتشره در فضای آزاد به‌عنوان منبع برای آنتن استفاده نمود. هر چند که می‌توان از منابع کاملاً الکترونیکی مانند نوسان‌سازها و ضرب‌کننده‌ها^۱ و یا منابع نوری مانند لیزر برای تولید و دریافت میدان‌های تراهرتز استفاده نمود. علاوه بر این به دلیل قرار گرفتن طول موج تراهرتز مابین طول موجهای نوری و میکروویو، تکنیک‌های آنالیز و طراحی مرتبط با آن طیف‌ها ناحیه تراهرتز را نیز پوشش می‌دهد ولی برخی مسائل کاملاً منحصر به این طیف می‌باشد که موجب شده‌اند این ناحیه همچون سایر نواحی فرکانسی پیشرفت چشم‌گیری نکرده‌باشد.



شکل ۲-۲ میزان انتقال پرتو در ناحیه تراهرتز و نواحی مجاور [۴]

^۱ Photomixer

ناحیه‌ی تراهرتز ویژگی‌های طیفی خاصی دارد که مرتبط با فرآیندهای اساسی فیزیک؛ مانند حرکت انتقالی مولکول‌ها، دامنه بزرگ حرکت لرزشی مواد آلی، حرکت لرزشی در جامدات و شکاف‌های انرژی در ابررساناها؛ می‌باشد. کاربردهای باند فرکانسی تراهرتز نیز مرتبط با این ویژگی‌های منحصر به فرد می‌باشد.



شکل ۲-۳ طیف انتقال بخار آب در محدوده تراهرتز [۴]

در مقایسه با دو ناحیه هم‌جوار؛ یعنی ناحیه امواج رادیویی و مادون قرمز؛ ناحیه تراهرتز با توجه به خطوط دورانی مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌اش از میزان کدورت بسیار بالایی در جو برخوردار است (شکل ۲-۲). در واقع، پدیده‌ی جذب به‌وسیله‌ی مولکول‌های بخار آب مهم‌ترین عامل میرایی موج تراهرتز در فضای آزاد می‌باشد [۱۵]. شکل ۲-۳ طیف انتقال بخار آب را با دقت زیاد

نشان می‌دهد. در عمل، پدیده جذب آب مهم‌ترین عاملی است که در کاربردهای مربوط به باندهای تراهرتز می‌بایست به آن توجه ویژه‌ای شود.

بر اساس خواص نوری در باندهای فرکانسی تراهرتز، مواد چگال عمدتاً در یکی از این سه گروه قرار می‌گیرند: آب، فلز و دی‌الکتریک. آب بعنوان قوی‌ترین مایع قطبی بیشترین قدرت جذب را در ناحیه‌ی تراهرتز دارا می‌باشد. به دلیل هدایت الکتریکی بالا، فلزات بیشترین بازتابش را در این ناحیه دارند. مواد غیر فلزی و غیرقطبی همچون کاغذ، پلاستیک، البسه، چوب و سرامیک که معمولاً در طول موج‌های نوری به‌عنوان ماده‌ی غیرشفاف در نظر گرفته می‌شوند در ناحیه‌ی تراهرتز شفاف می‌باشند. در جدول زیر؛ به طور اجمالی؛ به ویژگی‌های این سه دسته مواد، در باندهای فرکانسی تراهرتز پرداخته شده‌است.

جدول ۲-۱ ویژگی مواد در حالت‌های مختلف در محدوده تراهرتز [۴]

Material Type	Optical Property
liquid water	high absorption ($\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz)
metal	high reflectivity (>99.5% at 1 THz)
plastic	low absorption ($\alpha < 0.5 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz) low refractive index ($n \approx 1.5$)
semiconductor	low absorption ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz) high refractive index ($n \sim 3-4$)

ویژگی مواد مختلف در ناحیه‌ی تراهرتز متفاوت از سایر نواحی فرکانسی است و این مسئله اساس تصویربرداری تراهرتز می‌باشد. از آنجایی که بسته بندی محصولات معمولاً دی‌الکتریک هستند، تصویر برداری تراهرتز به‌عنوان یک سنسور غیرمخرب برای بسته بندی‌های مهر و موم

شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل جذب بالای آب در این ناحیه، مواد هیدراته از مواد خشک قابل تشخیص‌اند. مواد فلزی نیز به واسطه‌ی بازتابش بالا و کاملاً کدر بودن آن‌ها قابل شناسایی‌اند. همین ویژگی‌ها برای کاربردهای امنیتی نیز صادق است. تصویر برداری ترارترز مناسب برای تشخیص اسلحه، مواد منفجره و مواد مخدر پنهان شده در بسته‌بندی‌های پلمپ شده، می‌باشد.

حساسیت زیاد تشعشع ترارترز نسبت به آب، برای کاربردهای دارویی نیز مناسب است. در یک سیستم بیولوژیکی، تغییرات کم در مقدار آب می‌تواند نقایص بسیار مهم در حال ظهور در این ناحیه را نشان دهد.

زیرلایه برای آنتن‌های معمولی، عمدتاً مواد دی‌الکتریک با تلفات کم می‌باشد، در صورتی که برای آنتن‌های ترارترز مواد نور-رسانا که زیرلایه آن‌ها مواد نیمه رسانا؛ مانند سیلیکون و ایندیوم-آرسناید و گالیوم-آرسناید؛ می‌باشد، استفاده می‌شود. میدان شکست الکتریکی بالا، حرکت زیاد الکترون‌ها از ویژگی‌های مهم آن محسوب می‌شود. تفاوت دیگر زیرلایه در آنتن‌های ترارترز با آنتن‌های معمولی این است که ضخامت زیرلایه در آنتن‌های معمولی نسبت به طول موج بسیار کم است و از تاثیر آن صرف نظر می‌شود؛ اما در آنتن‌های ترارترز نسبت به طول موج این ضخامت زیاد می‌باشد و این باعث ایجاد مدهای ناخواسته در زیرلایه می‌شود و علاوه بر آن مقداری از توان میدان در داخل این فضا به دام می‌افتد.

در طراحی آنتن یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی، تعیین جنس و نوع زیر لایه می‌باشد. جنس زیر لایه روی عملکرد آنتن از نظر بهره و جهت دهی و بازدهی تشعشعی آنتن بسیار تاثیرگذار است. اگر میزان ϵ_r زیر لایه زیاد باشد، آنگاه بهره آنتن زیاد خواهد شد؛ اما در مقابل ابعاد آنتن کاهش می‌یابد که این مورد در فرکانس‌های ترارترز که ابعاد آنتن بسیار کوچک است امتیاز منفی

محسوب می شود. برای اینکه در آنتن های تراهرتز خطای ساخت کمتر شود، نیاز است تا مقدار ϵ_r زیر لایه کاهش یابد اما کاهش ϵ_r زیر لایه باعث کاهش بهره و افزایش پلاریزاسیون متقاطع می شود. برای غلبه بر این مشکل بهترین راه استفاده از دو زیر لایه با ϵ_r ها و ضخامت های مختلف می باشد به طوری که یک زیر لایه دارای ϵ_r بیشتری و زیر لایه دیگری دارای ϵ_r کم می باشد. به همین دلیل در این طراحی از دو زیر لایه استفاده شده است.

۲-۲- آنتن موج نشتی

آنتن موج نشتی به رده آنتن های موج رونده^۱ تعلق دارند. موج متحرک به دو گروه اصلی تقسیم می شود؛ آنتن های موج کند^۲ و آنتن های موج سریع^۳. در آنتن های موج سریع سرعت فاز موج بیشتر از سرعت نور می باشد. این گروه از امواج به طور پیوسته در راستای طول منتشر می شوند و چون ثابت انتشار (k_z) آنها مختلط است، موج نشتی شامل تلفات با ضریب تضعیف α می باشد که پهنای باند آنتن نیز به α وابسته است. ثابت فاز β نیز زاویه پرتو را کنترل می کند [۱۶].

آنتن های موج نشتی به دو گروه طبقه بندی می شوند: یکنواخت و متناوب. آنتن موج نشتی یکنواخت^۴، ساختاری است که در یک برش عرضی آن موج در طول ساختار به شکل یکسانی است. در این آنتن ها، معمولاً در موجبر شکاف هایی ایجاد می کنند تا اجازه تشعشع از طریق شکاف ها به موج داده شود. موجی که درون این ساختار منتشر می شود، موج سریع است. اما

^۱ Traveling wave antenna

^۲ Slow wave antenna

^۳ Fast wave antenna

^۴ Uniform leaky-wave antenna

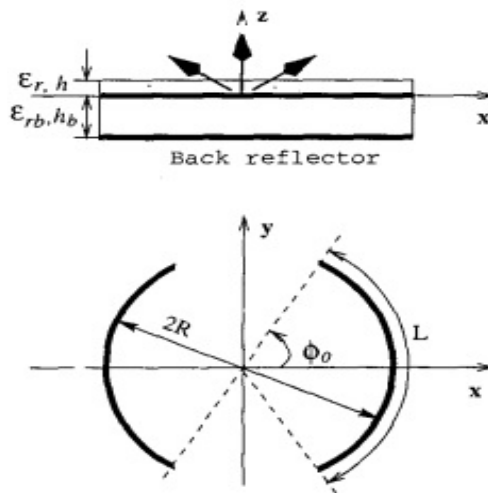
ساختار آنتن موج نشتی متناوب^۱، شامل یک ساختار یکنواخت است که موج آرام (که غیرقابل انتشار است) را پشتیبانی می‌کند و بطور متناوب در کل ساختار تکرار می‌شود. وقتی موج آرام تشعشع می‌کند، ناپیوستگی‌ها موجب می‌شود که موج بصورت متناوب در طول ساختار موجبر منتشر شود. موج نشتی متناوب به گونه‌ای طراحی می‌شود که هارمونیک اصلی آن ($n=0$) موج آرام و یکی از هارمونیک‌ها (معمولاً $n=1$) بصورت موج سریع باشد و این هارمونیک موج سریع در موجبر انتشار می‌یابد [۱۷].

۱-۲-۲- طراحی آنتن با دو اسلات

اشکال طراحی با تک اسلات آن است که موج سطحی^۲ بر روی زیرلایه ایجاد می‌کند و بخش زیادی از توان بدین ترتیب تلف می‌شود ولی با آنتن دواسلات می‌توان موج سطحی بوجود آمده توسط یک شکاف را بوسیله دیگری حذف نمود. در ساختارهای دو اسلات که هر دو اسلات مستطیل شکل بوده و موازی هم قرار گرفته‌اند حذف فاز (دو واقع از بین بردن موج سطحی) تنها در راستای عریض آن رخ می‌دهد. به همین علت از دو اسلات نیم دایروی برای طراحی اینگونه آنتن‌ها استفاده می‌شود. هر کدام از شکاف‌ها در یک پلاریزاسیون طراحی شده‌اند؛ بنابراین موجبر می‌تواند با پلاریزاسیون دایروی با قابلیت شیفت فاز وارد عمل شود. به منظور جلوگیری از تشعشع موج‌های سطحی مراتب بالاتر ضخامت اسلات‌ها می‌بایست کمتر از $\frac{\lambda_d}{4}$ باشد [۱۸].

^۱ Periodic leaky-wave antenna

^۲ Surface wave



شکل ۲-۴ طراحی آنتن دواسلات با صفحه زمین پستی [۱۸]

تحلیل عددی بازده تشعشعی آنتن‌های روزنه‌ای با توزیع جریان دلخواه در [۱۹] آمده است. برای آنتن دو اسلات که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است جریان مغناطیسی معادل با توزیع سینوسی می‌توان فرض نمود.

$$\vec{M}(\varphi') = \begin{cases} \sin[k_e R(\varphi - |\varphi'|)]\hat{\varphi} & |\varphi'| < \varphi \\ -\sin[k_e R(\varphi - |\varphi' - \pi|)]\hat{\varphi} & |\varphi' - \pi| < \varphi \end{cases} \quad (1-2)$$

که $k_e = 2\pi/\lambda_e$ و $\lambda_e = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ و برای زیرلایه ضخیم و برای زیرلایه نازک $\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}$

به روش عددی گفته شده در [۲۰] قابل محاسبه است. توان تزویج شده به موج سطحی مود TM_n بوسیله موج استوانه‌ای $TM_{n,0}$ که از مبدا منتشر شده است قابل محاسبه است [۲۰].

$$P^{TM_n} = \frac{\omega \epsilon_r \epsilon_0}{\xi \lambda_{eff}} \sum_{-\infty}^{+\infty} |C_n|^2 \quad (2-2)$$

$$C_n = \frac{2[(-1)^{n-1}k_e R]}{n^2 - (k_e R)^2} R [\cos(k_e R \varphi_0) - \cos(n \varphi_0)] [J'_n(\beta_{TM_n} R)] \quad (3-2)$$

که λ_{eff} ارتفاع لایه دی الکتریک زمین شده می باشد و C_n ضریب تزویج مربوط به مود $TM_{,n}$ می باشد که از رابطه (۳-۲) قابل محاسبه است، که $\beta_{TM} = \sqrt{2}\pi/\lambda_g$ ثابت انتشار مود TM است. برای آنتن حلقه ای شکاف دار در تشدید دوم $\varphi = \frac{\pi}{2}$ و $k_e R = 1$ است و جریان مغناطیسی بصورت رابطه (۴-۲) درمی آید.

$$\vec{M}(\varphi') = \cos \varphi' \quad (۴-۲)$$

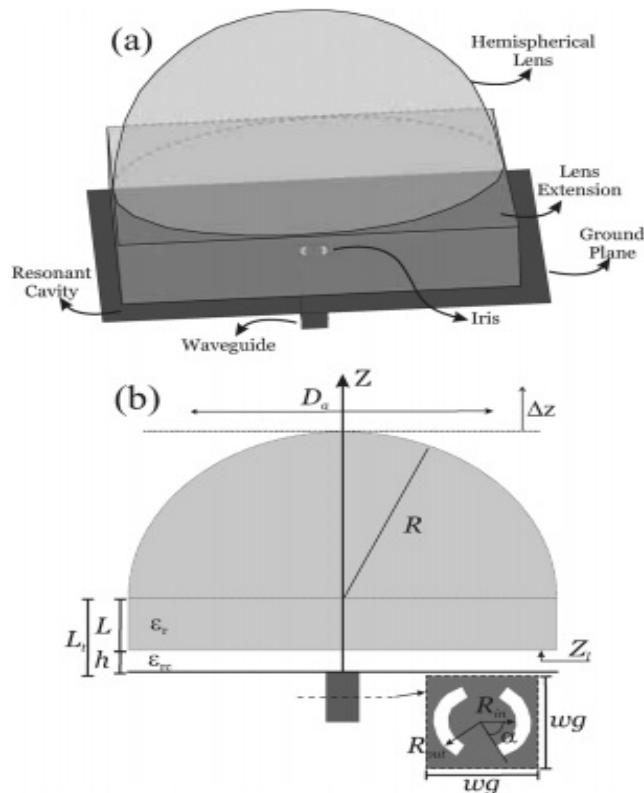
در نتیجه توان کوپل شده به موج سطحی TM که در رابطه (۲-۲) ارائه شده بود بصورت رابطه (۵-۲) بیان می شود.

$$P^{TM} = \frac{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0}{\sqrt{2} \lambda_{eff}} \pi^2 R^2 |J'_n(\beta_{TM} R)|^2 \quad (۵-۲)$$

در رابطه (۵-۲) اگر شعاع حلقه از رابطه $J'_n(\beta_{TM} R) = 0$ محاسبه شود ($\beta_{TM} R = x'_n$) که $x'_n = 1.8412$ اولین ریشه $J'_n(x)$ است، توان موج سطحی P^{TM} حذف می شود. در آنتن دو اسلات ارائه شده، عمده توان موج سطحی مربوط به پارامترهای $|n|=1$ ، $|n|=3$ و $|n|=5$ می باشد. همانطور که گفته شد، اگر R از رابطه $J'_n(\beta_{TM} R) = 0$ محاسبه شود عبارت مربوط به $|n|=1$ از رابطه (۲-۲) حذف شده و $J'_n(\beta_{TM} R)$ برای $|n| > 5$ مقدار ناچیزی می باشد. بنابراین می توان با انتخاب مناسب φ (که مرتبط به طول L است) دو فاکتور $[\cos(k_e R \varphi) - \cos(3\varphi)]$ و $[\cos(k_e R \varphi) - \cos(5\varphi)]$ مربوط به $|n|=3$ و $|n|=5$ را بگونه ای انتخاب

نمود که مجموع توان موج سطحی کمترین میزان گردد. محاسبات صورت گرفته نشان می- دهد که اگر $R = 0.293\lambda_g$ و طول قوس در حدود $L = \lambda_e$ در نظر گرفته شود بازده ساختار در حدود ۹۶٪ بدست می آید [۲۱-۲۲].

۲-۲-۲- آنتن موج نشتی به عنوان تغذیه آنتن لنز



شکل ۲-۵ نمایه آنتن موج نشتی به همراه آنتن لنز [۲۳]

آنتن شکل (۲-۵) مناسب برای آرایه‌های یکپارچه در فرکانس تراهرتز می‌باشد. آنتن شامل لنز نیمه کروی امتداد یافته می‌باشد که با موجبر موج نشتی که می‌تواند با سنسورها، آشکارسازها و دیودهای شاتکی ادغام گردد، تغذیه می‌شود. ساختار این آنتن به گونه ایست که یک جفت مود موج نشتی مدهای TE/TM در محفظه تشدید تحریک می‌گردد. بوسیله این مودها، میدان منتشر

شده بوسیله موجبر در داخل لنز الگوی تشعشعی با راستاوی بالایی دارد که بخش فوقانی لنز را روشن می‌کند. داشتن میدان اولیه با راستاوی مناسب موجب افزایش فاصله کانونی لنز شده که این مسئله موجب ارتقای برخی فاکتورها از جمله سر ریز^۱ و اعوجاج خارج محور^۲ می‌شود. ساختار این آنتن سازگار با تکنولوژی مدرن نیمه رساناها بوده و مناسب برای آرایه‌های تصویربرداری بزرگ است [۲۳].

آنتن شکل ۲-۵ شامل تغذیه موجبری می‌باشد. محفظه تشدید به منظور تطبیق امپدانس تغذیه موجبری با محیط سیلیکونی به کار رفته‌است. موج نشتی ارائه شده الگوی تشعشعی با راستاوی بالایی دارد، در نتیجه تنها بخش کوچکی از سطح فوقانی لنز را روشن می‌نماید، بنابراین تنها ساخت بخش فوقانی لنز ضروری است و می‌توان سایر بخش‌های یک لنز نیمه کروی را در روند ساخت حذف نمود. ایده استفاده از EBG^۳ به همراه لنز دی‌الکتریک نیز اولین بار در [۱۲] پیاده-سازی شده‌است.

تغذیه آنتن یک موجبر مربعی با مد غالب TE_{10} می‌باشد که بر روی دهانه موجبر دو شکاف دایروی شکل ایجاد شده‌است. شکاف‌ها به منظور تطبیق امپدانس آنتن با امپدانس مود TE_{10} است به گونه‌ای که مود ناخواسته TM درون محفظه تشدید تشعشع نکند. بین موجبر و لنز دی‌الکتریک یک محفظه تشدید سیلیکونی به ارتفاع L قرار گرفته‌است. این محفظه تشدید همانند موجبر بخشی-پر^۴ شده است و مودهای موج نشتی درون آن منتشر می‌شوند. این مودها با ثابت انتشار

^۱ Spill over

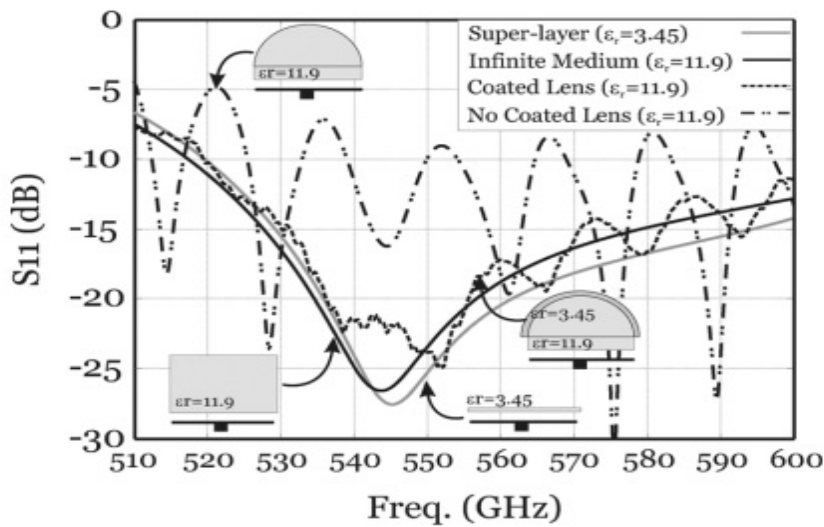
^۲ Off axis distortion

^۳ Electromagnetic Band Gap

^۴ Partially filled

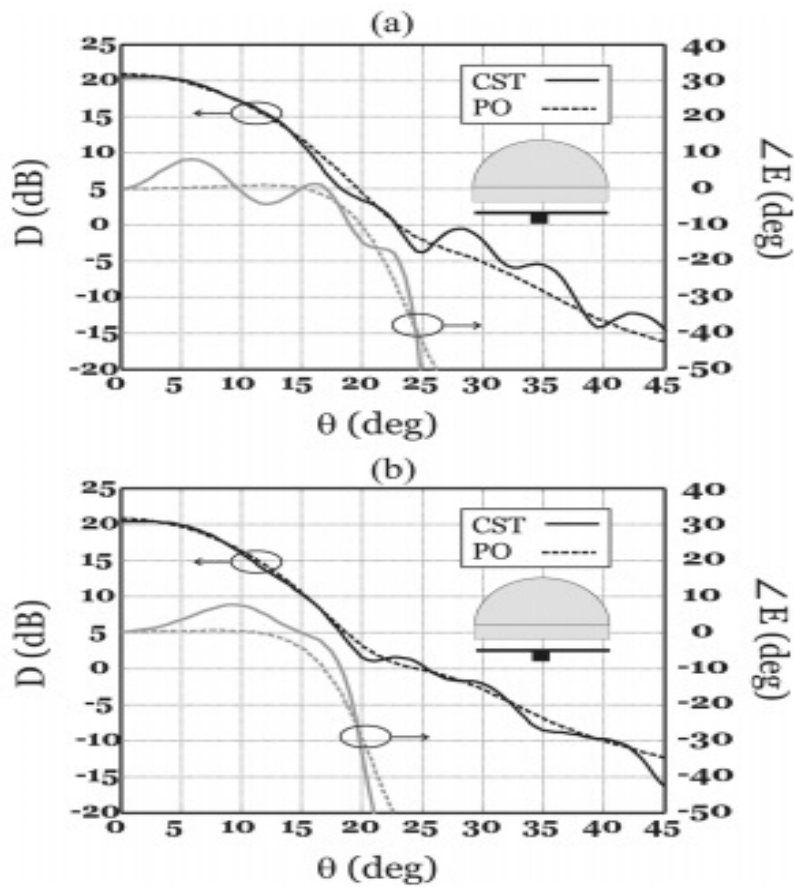
مختلط k_{TW} منتشر می‌شوند. بخش موهومی ثابت انتشار مود نشتی بیانگر تضعیف ساختار می‌باشد. همانطور که پیش از این گفته شد یک زوج موج نشتی TE/TM وقتی که $\epsilon_{rc} < \epsilon_r$ و $h \approx \frac{0.5\lambda}{\sqrt{\epsilon_{rc}}}$ تحریک می‌شوند.

در آنتن‌های موج نشتی و یا چند لایه دی‌الکتریک، امپدانس که از بالای محفظه تشدید (Z_L) در شکل ۲-۵) دیده می‌شود به ثابت دی‌الکتریک مودهای موج نشتی بستگی دارد [۲۴]. هر چه امپدانس مذکور کمتر باشد راستاوی پرتو منتشر شده بیشتر خواهد بود. امپدانس کمتر معمولاً به وسیله یک لایه دی‌الکتریک با پهنای $\frac{\lambda}{4}$ ایجاد می‌شود. در [۲۵] یک لایه کوارتز با $\epsilon_{rq} = 4.45$ به ضخامت $\frac{\lambda}{4}$ استفاده شده‌است. امپدانس Z_L از رابطه $Z_L = \frac{Z_0}{\epsilon_{rq}}$ محاسبه می‌شود که Z_0 امپدانس فضای آزاد می‌باشد. راستای انتشار در از رابطه $\theta = \sin^{-1} \left(\text{Re} \left[\frac{k_{TW}}{k_i} \right] \right)$ بدست می‌آید که k_i ثابت انتشار فضای آزاد است و در ساختار مذکور θ ، ۱۷ درجه بدست می‌آید. اگر ساختاری با راستاوی بالاتر مدنظر باشد باید از مقدار امپدانس Z_L کاسته شود، در نتیجه از ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک بالاتر باید استفاده شود که این خود موجب کم شدن پهنای باند امپدانس آنتن می‌گردد [۲۶]. وقتی به جای لایه‌ای از کوارتز از محیط دی‌الکتریک نامحدود استفاده کنیم رابطه امپدانس به صورت $Z_L = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ خواهد بود که اگر این محیط نامحدود از جنس سیلیکون باشد چون $\epsilon_{rs} = 11.9$ در نتیجه $\sqrt{\epsilon_{rs}} \approx \epsilon_{rq}$ که متعاقباً به شباهت نتایج حاصل از این دو ساختار خواهیم پرداخت. بنابراین بسته به آن‌که در کاربرد آنتن مورد نظر پهنای باند مناسب‌تر و یا راستاوی بالاتر مدنظر طراح باشد می‌توان از یکی از دو ساختار معرفی شده استفاده نمود.



شکل ۲-۶ ضریب بازتاب موجبر نشتی در حالات مختلف [۲۳]

شکل ۲-۶ ضریب بازتاب ورودی موجبر مربعی به ابعاد $w_g = 367.6 \mu m$ ، $R_{in} = 109.7 \mu m$ و $R_{out} = 192 \mu m$ و $\alpha = 50^\circ$ (که در شکل ۲-۵ به این بخش‌ها اشاره شده) را در بازه فرکانسی ۵۰۰-۶۰۰ GHz نشان می‌دهد. ارتفاع محفظه تشدید هوا $h = 275 \mu m$ می‌باشد. نمونه‌های مختلفی چون کوارتز چندلایه به ضخامت ربع طول موج، محیط سیلیکون نامحدود (در شبیه‌سازی با نرم افزار CST این حالت با در نظر گرفتن شرایط مرزی جاذب ایجاد شده است)، و لنز نیمه کروی با ارتفاع افزوده شده همراه و بدون لایه پوششی با در نظر گرفتن $R = 6 mm$ و $\frac{L}{R} = 0.05$ طراحی شده است که در همگی آن‌ها ابعاد موجبر و شکاف‌ها و محفظه هوا یکسان می‌باشد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، نتایج مربوط به ضریب بازتاب برای ساختار چندلایه با کوارتز و محیط نامحدود سیلیکونی تقریباً یکسان می‌باشد (همانند امپدانس ورودی این دو ساختار). از شکل مذکور می‌توان دریافت که اگر آنتن لنز سیلیکونی بدون روکش کوارتز مورد استفاده قرار گیرد دچار بازتاب‌های چندگانه خواهد شد [۲۷].



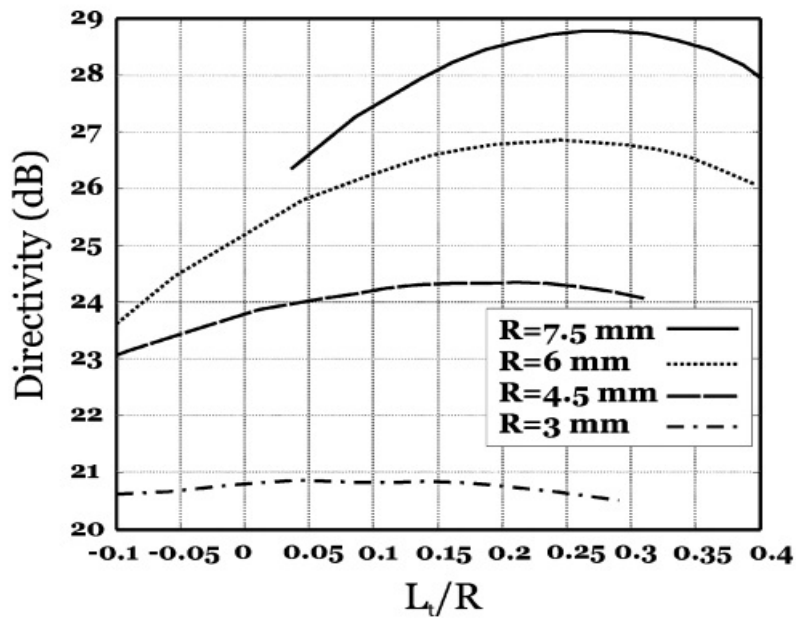
شکل ۲-۷ مقایسه راستای آنتن لنز به دو روش full wave و PO [۲۳]

شکل ۲-۷ الگوی تشعشعی آنتن لنز سیلیکونی با $R = 3 \text{ mm}$ و $L = R$ را نشان می‌دهد. نتایج فوق از شبیه سازی آنتن لنز سیلیکونی با روکش کوارتز به ابعاد موجبر مربعی $w_g = 521.9 \mu\text{m}$ در فرکانس 545 GHz در نرم افزار CST می‌باشد. هم چنین نتایج مذکور با نتایج حاصل از روش نور-فیزیک^۱ (PO) مورد مقایسه قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که نتایج انطباق قابل قبولی با هم دارند. واضح است که تنها بخش کوچکی از سطح بالایی آنتن لنز به وسیله تغذیه اولیه روشن می‌شود. در این ساختار بخشی از توان در لبه‌های محفظه هوا تلف می‌شود که میزان این تلفات به

^۱ Physical Optic

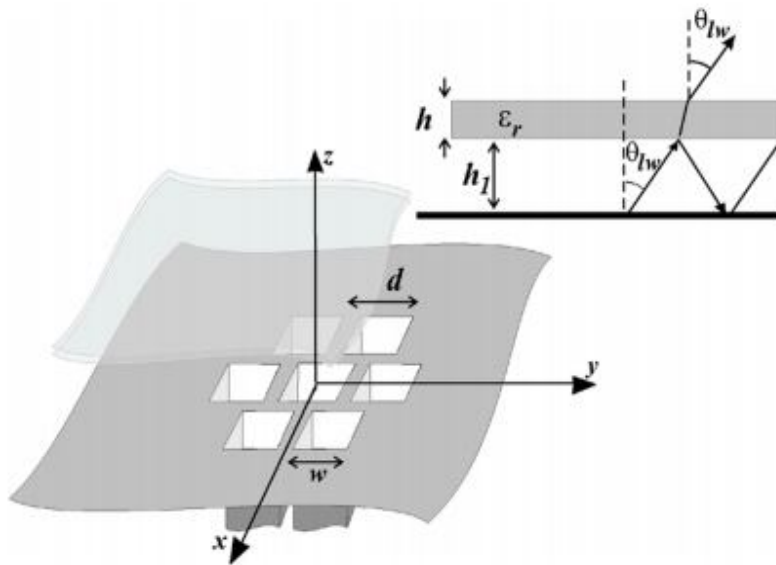
شعاع لنز بستگی دارد. میزان این تلفات برای لنز به شعاع 1.5 mm و بزرگ‌تر، کمتر از ۱٪ می‌باشد

[۲۵]



شکل ۲-۸ تاثیر تغییر شعاع لنز نیمه کروی بر راستاوی [۲۳]

در [۲۵] بهینه سازی ابعاد شعاعی آنتن لنز و همچنین تاثیر تغییرات ارتفاع L بر میزان راستاوی ساختار مذکور بررسی شده است. در [۲۵] گفته شده که وقتی مرکز فاز حقیقی آنتن بر روی صفحه بازشدگی آنتن منطبق نباشد ارتفاع بهینه L با $L = 0.39R$ ، متفاوت خواهد بود. شکل ۲-۸ تغییرات راستاوی بر حسب L را برای لنزهایی به شعاع $R = 3\text{ mm}, 4.5\text{ mm}, 6\text{ mm}$ و 7.5 mm را نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها بازده آنتن بسیار کم بوده و از ۱۱٪ فراتر نرفته است [۲۴]. برای کاربردهای آرایه‌ای، تنها می‌توان بخش کوچکی از خمیدگی رویه لنز را که به وسیله تغذیه اولیه روشن می‌شود را بر روی ارتفاع L سیلیکونی تعبیه نمود تا بدین ترتیب ابعاد و بازده ساختار بهبود یابد [۲۸].



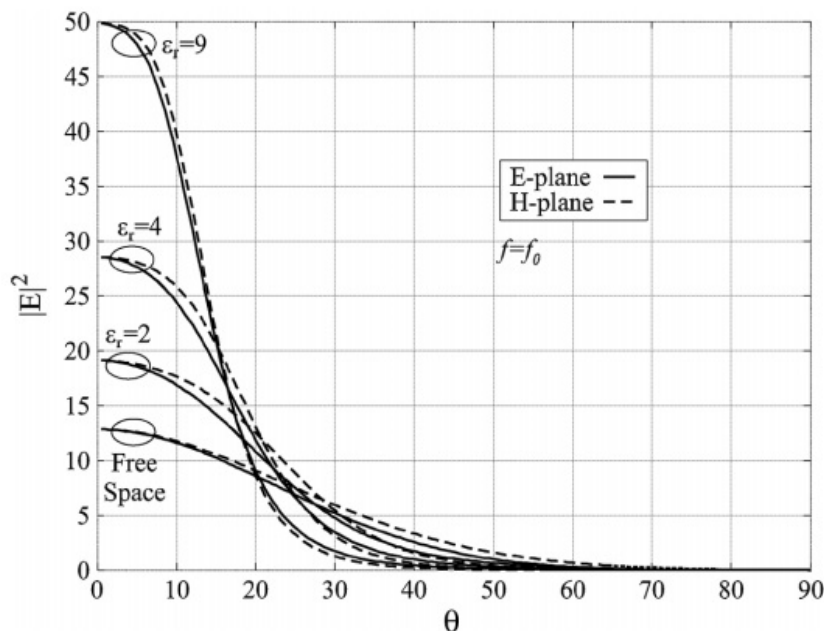
شکل ۲-۹ آرایه موج نشتی با لایه فوقانی دی الکتریک [۱۳]

در ساختار شکل ۲-۹ ساده ترین سیستم تصویربرداری مسطح کانونی چندپرتویی^۱ که هر پرتو به وسیله یک موجبر تغذیه می شود بکار گرفته شده است. در این سیستم های تصویربرداری، ابعاد فیزیکی هر المان تغذیه می بایست آنقدر کوچک باشد که المان ها به حدی بهم نزدیک باشند که به پرتوی ثانویه با سطح قابل قبولی از سرریز دست یابیم. اصلی ترین محدودیت در استفاده از موج نشتی در این آرایه ها اثر تزویج متقابل می باشد.

به منظور افزایش بهره بر روی موجبر صفحه زمین شده از لایه ای از ماده دی الکتریک استفاده می شود. ضخامت این صفحه دی الکتریک می بایست $\frac{\lambda_d}{4}$ باشد که λ_d طول موج ماده دی الکتریک در فرکانس f می باشد و $h_1 \approx \frac{\lambda_0}{4}$. صفرهای تابع گرین این ساختار بیانگر قطب های موج نشتی می باشد. قطب ها را می توان به صورت $k_{lw} = k.(\sin \theta_{lw} + j\delta_{lw})$ بیان نمود [۲۹]. در [۳۰]

^۱ Multi beam

تحلیل‌های تقریبی برای قطب‌های موج نشستی در محدوده وسیع فرکانسی برآورد شده‌است. در نمودارهای مربوطه نشان داده شده‌است که برای موادی با ثابت دی‌الکتریک کمتر، پرتو موج نشستی با زاویه تابش بزرگتری انتشار یافته‌است. بنابراین مقادیر کمتر ثابت دی‌الکتریک منجر به ثابت تضعیف بیشتری شده‌است که البته بر اثر آن راستاوی ساختار کاهش یافته‌است. شکل ۲-۱۰ $|E|^2$ را در صفحات H و E در فرکانس f برای $w = \lambda$ نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مذکور واضح است که هر قدر ثابت دی‌الکتریک بالاتر باشد راستاوی بیشتر خواهد بود.



شکل ۲-۱۰ نمودار $|E|^2$ مربوط به ساختار شکل ۲-۹ [۱۳]

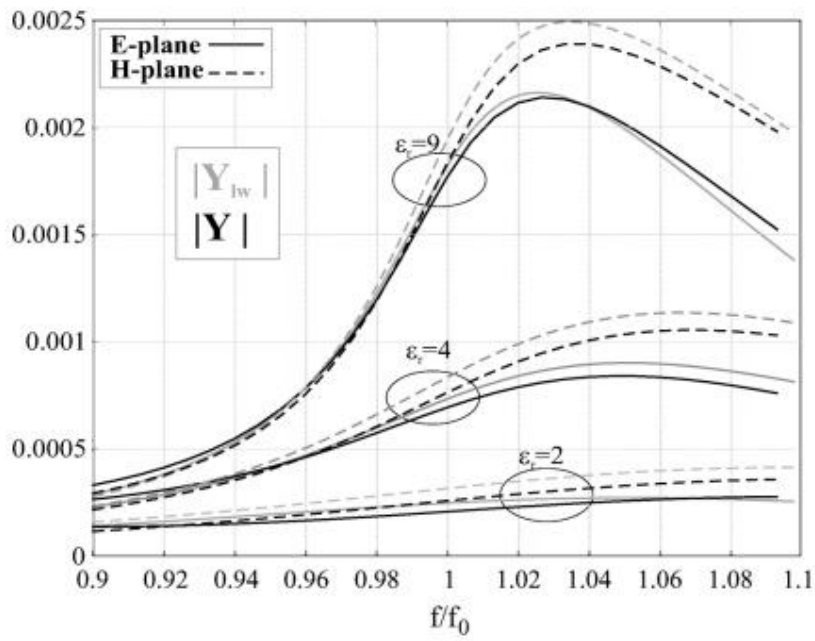
پهنای امپدانسی روزنه موجبری ارائه شده در شکل ۲-۹ کم است. به همین خاطر جنس ماده دی‌الکتریک از موادی با ثابت دی‌الکتریک متوسط انتخاب می‌شود. البته یک فاکتور مهم برای انتخاب ماده دی‌الکتریک میزان توزیع متقابل بین المان‌های کنار هم قرار گرفته در ساختار

شکل ۲-۹ می‌باشد. به منظور محاسبه ترویج متقابل ابتدا ادمیتانس متقابل میان المان‌ها را از روابط [۳۱] محاسبه می‌کنیم.

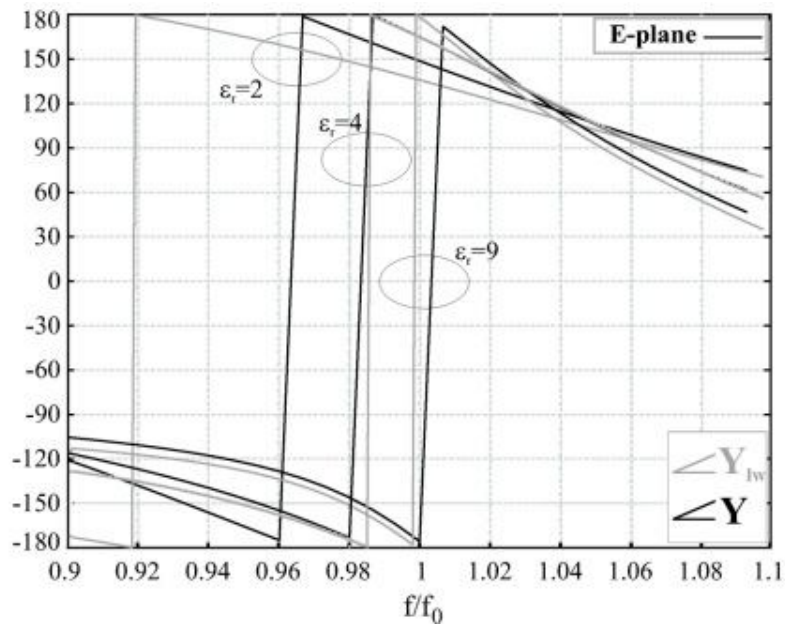
$$Y = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |M(k_x, k_y)|^2 G_{xx}^{hm}(k_x, k_y) e^{-jk_\rho d} dk_x dk_y \quad (6-2)$$

که $k_\rho = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ و $G_{xx}^{hm}(k_x, k_y) = -((k_x^2 I_{TE}(k_\rho) + k_y^2 I_{TM}(k_\rho)) / k_\rho^2)$ تابع گرین ساختار مذکور است و $M(k_x, k_y)$ تبدیل فوریه جریان مغناطیسی معادل $m(x, y)$ می‌باشد. هم چنین $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ که d_x و d_y به ترتیب فاصله میان موجرها در راستای x و y می‌باشد. انتگرال فوق با روش عددی و یا تقریبی ارائه شده در [۳۲] قابل محاسبه است. اگر دو موجبر کنار هم را در موقعیت صفحه E ($\phi = \frac{\pi}{4}$) و یا در صفحه H ($\phi = 0$) در نظر بگیریم، ادمیتانس موج ناشی با رابطه (۷-۲) قابل تخمین است.

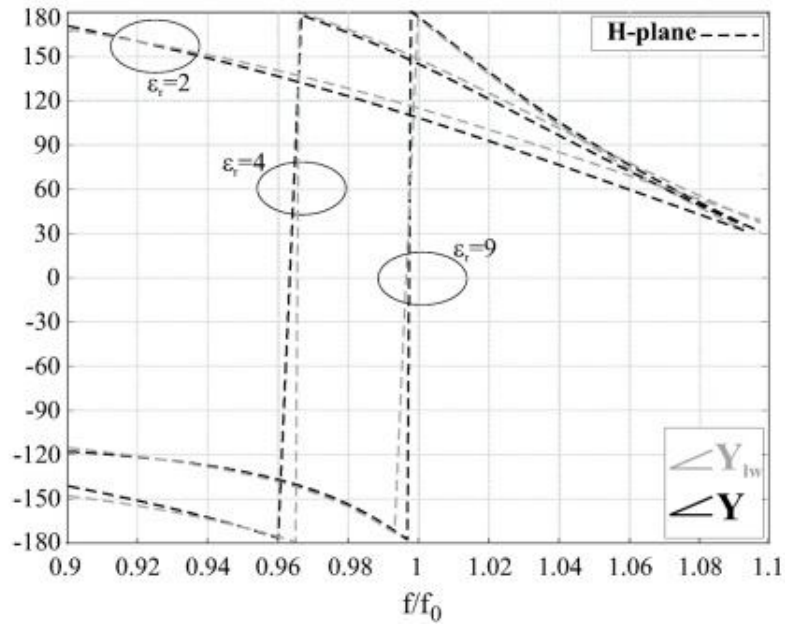
$$Y_{lw}^{H/E} = j \frac{\sqrt{k_{lw}(TE|TM)} e^{j\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{2}\pi} |M(k_{lw}(TE|TM), \phi)|^2 \times Res(I_{TE/TM}) \frac{e^{-jk_{lw}(TE/TM)d}}{\sqrt{d}} \quad (7-2)$$



(الف)



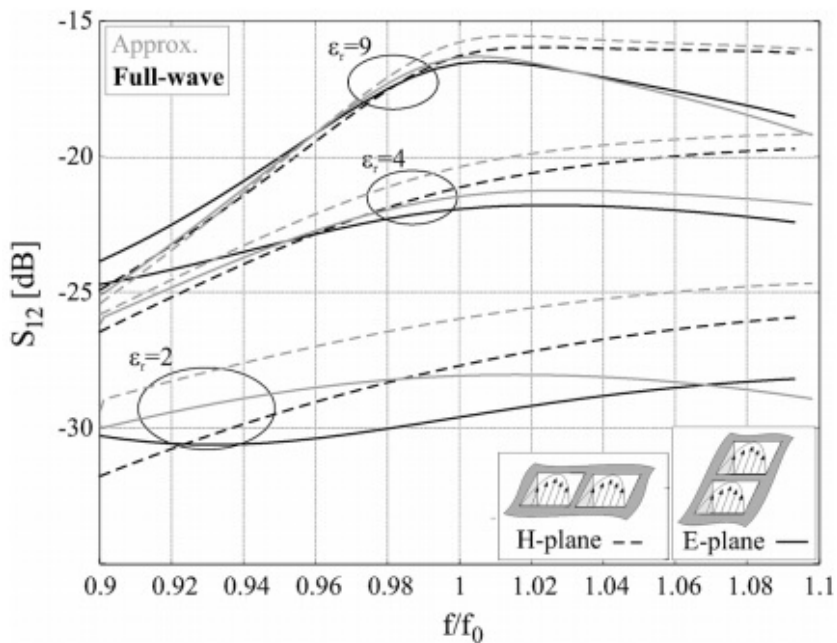
(ب)



(ج)

شکل ۲-۱۱ ادیتانس میان دو موجبر بطول $w = \lambda_0$ که در فاصله $d = 1.2\lambda_0$ از هم قرار گرفته‌اند،

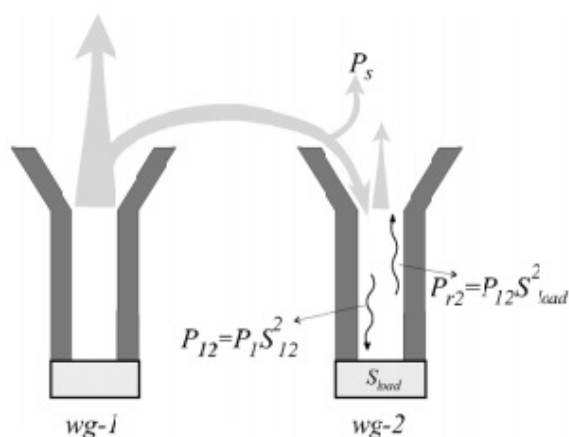
(الف) نمودار اندازه، (ب) نمودار فاز و (ج) نمودار فاز در صفحه H [۱۳]



شکل ۲-۱۲ تزویج متقابل مربوط به همان ساختار شکل ۳-۱۱ [۱۳]

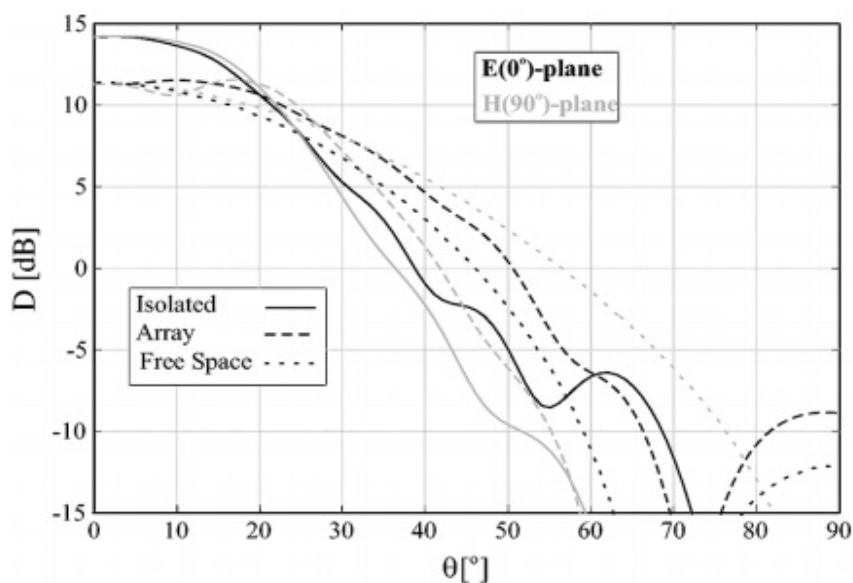
که $k_{lw}(TE/TM)$ اولین قطب موج نشتی TM و یا TE می‌باشد و Res بیانگر مانده جریان الکتریکی خط انتقال مربوطه را نشان می‌دهد [۳۳]. $Res(I_{TE/TM}) \propto \frac{1}{k_{lw}(TE/TM)}$ و بنابراین $Y_{lw}^{H/E} \propto \frac{1}{\sqrt{k_{lw}(TE/TM)}}$ حتی بدون در نظر گرفتن تضعیف توانی، واضح است که برای مقادیر کوچک‌تر $k_{lw}(TE|TM)$ ، ادمیتانس متقابل موج نشتی بزرگ‌تر خواهد شد. شکل ۱۱-۲ نیز این موضوع را تایید می‌کند. شکل ۱۱-۲-الف اندازه ادمیتانس متقابل میان موجبرهای مربعی به ابعاد λ و فاصله $d = 1.2\lambda$ را در صفحات H و E نشان می‌دهد. $Y_{lw}^{H/E}$ با رابطه تقریبی تخمین زده می‌شود، در حالیکه Y بوسیله تکنیک‌های تمام موج^۱ ارائه شده در [۳۴] قابل محاسبه است. شکل-های ۱۱-۲-ب و ۱۱-۲-ج تطابق فاز این دو ادمیتانس را نشان می‌دهد. همچنین تزویج متقابل آن نیز در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی که با نرم افزار CST صورت گرفته است ابعاد صفحه دی‌الکتریک و صفحه زمین نامحدود در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۲-۲ می‌توان گفت، تزویج برای ساختارهایی با ثابت دی‌الکتریک بالا، بیشتر است. بنابراین، راستاوی ارتباط تنگاتنگی با تزویج متقابل دارد. این نتیجه‌گیری برای ساختارهای چندلایه، دی-الکتریک پرپودیک و EBG های فلزی قابل تعمیم است [۳۵].

^۱ Full wave



شکل ۲-۱۳ نمایش توان تلف شده و توان منتشر شده برای دو موجبر در کنار هم قرار گرفته [۱۳]

توان تزویج شده به موجبر مجاور از رابطه $P_{12} = P_1 |S_{12}|^2$ قابل محاسبه است (شکل ۲-۱۳). اثر تزویج متقابل بر روی الگوی تشعشی در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. این شکل میدان تشعشی را در غیاب لایه دی‌الکتریک (با خطوط نقطه‌چین) و در حضور ماده دی‌الکتریک (با $\epsilon_r = 4$) برای موجبر ایزوله شده و موجبر آرایه‌ای نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی ابعاد صفحه دی‌الکتریک و زمین به قدر کافی بزرگ ($12\lambda \times 12\lambda$) در نظر گرفته شده است تا بتوان از اثرات لبه‌ها صرف نظر نمود [۳۶]. بیشینه راستاوی در حالتی که موجبرها بصورت آرایه قرار گرفته‌اند کمتر از حالت موجبر ایزوله شده می‌باشد که در حضور و یا عدم حضور لایه دی‌الکتریک نیز همین حالت ایجاد می‌شود. این مسئله ناشی از آن است که میدانی که بوسیله موجبرهای مجاور موجبر مرکزی ساطع می‌شوند، فازی غیر از فاز موجبر مرکزی دارند و این روند کاهش راستاوی زمانی که موجبرها بیشتر به یکدیگر نزدیک شوند، افزایش می‌یابد؛ زیرا در رابطه (۲-۷) وقتی d کاهش یابد $Re[k_{tw}]d \approx 0$ است.

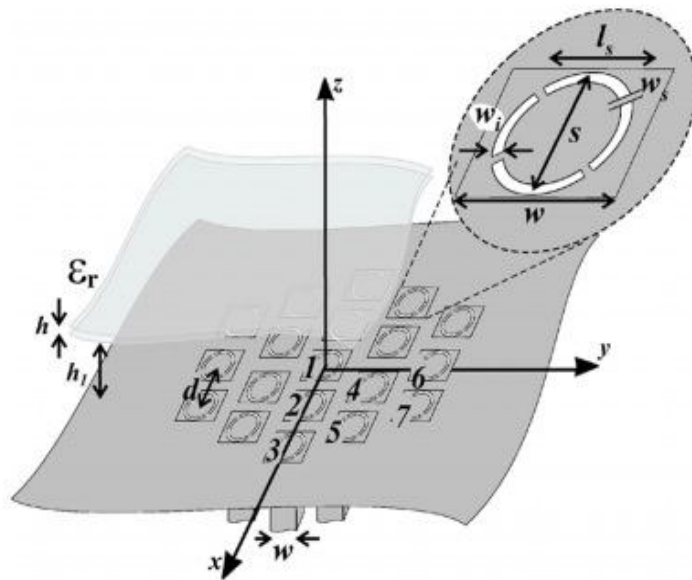


شکل ۲-۱۴ راستاوی آنتن موج نشی در صفحات E و H [۱۳]

همانطور که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده، الگوی تشعشی مربوط به موجبر محاط شده تا زاویه ۲۰ درجه مسطح می‌باشد و پس از آن به سرعت افت می‌کند. بنابراین اگر حتی موجبر محاط شده راستاوی کمتری نسبت به نمونه ایزوله آن داشته باشد ولی شکل پترن آن بازده پرتوی بالاتری نسبت به نمونه ایزوله شده دارد. اگرچه افت بهره سریع را نیز می‌توان با بهینه کردن شکل المان‌های انتشاری بهبود بخشید.

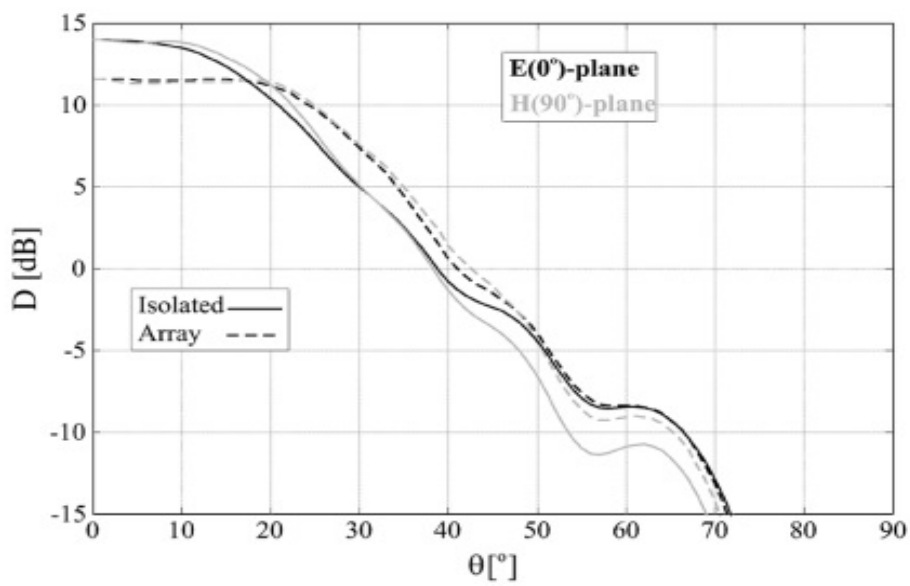
الگوی تشعشی ارائه شده در شکل ۲-۱۴ بهینه نیست و بنابراین برای استفاده بعنوان تغذیه آنتن ثانویه (مانند آنتن بازتابی) مناسب نیست، زیرا اولاً پترن آن در دو صفحه اصلی (E و H) متقارن نیست و علاوه بر این قرار گرفتن صفحه دی‌الکتریک بر روی ساختار موجبر موجب تحریک دومین مود TM با $\theta_{TM}^{TM} \approx 70^\circ$ شده، در نتیجه منجر به پهن شدگی پرتو در صفحه E شده‌است. از اثرات نامطلوب انتشار این مود به افزایش تلفات سرریز می‌توان اشاره نمود. اگر موجبر را از لحاظ سایز دهانه کوچک‌تر کنیم و بر روی دهانه آن از دو اسلات مشابه شکل ۲-۱۵

استفاده نماییم خواهیم دید که مود نامطلوب گفته شده حذف می‌شود. هر کدام از شکاف‌ها در یک قطبش طراحی شده‌اند؛ بنابراین موجبر می‌تواند با قطبش دایروی با قابلیت شیفت فاز وارد عمل شود. هر جفت شکاف بوسیله یک منبع هم‌فاز تغذیه می‌شود. فاصله دو شکاف از هم s می‌باشد که در $\theta_{l_w}^{TM}$ اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. در این ساختار $s = 0.53\lambda$ بوده و همانطور که در شکل نشان داده شده، شکاف‌ها بصورت بخشی از یک دایره هستند.

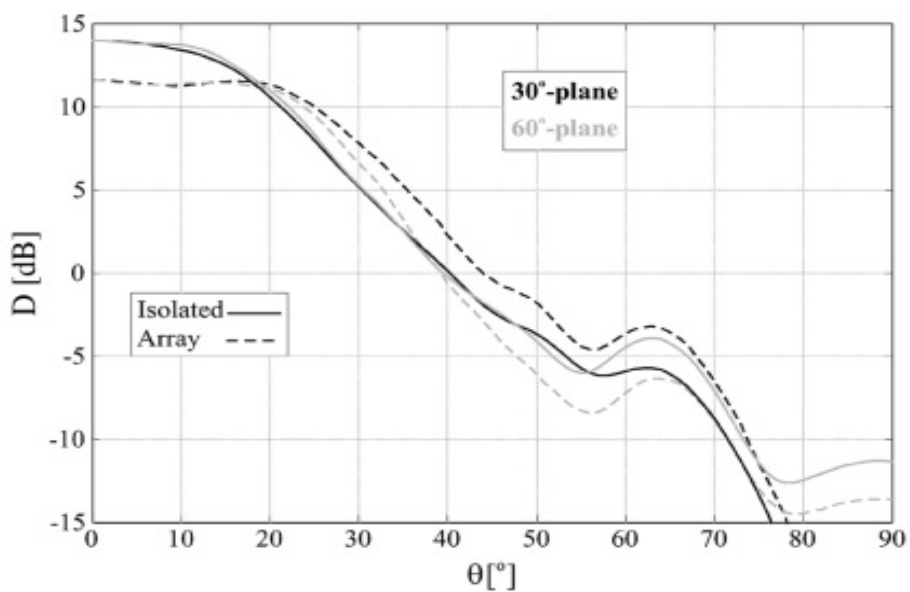


شکل ۲-۱۵ آرایه موجبری نوزده تایی دوشکاف دار [۱۳]

شکل ۲-۱۵ یک آرایه نوزده تایی از موجبرهای مربعی به طول ضلع $w = 0.67\lambda$ با فاصله $d = 1.2\lambda$ را نشان می‌دهد. در این طراحی ابعاد دهانه بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت نمونه شکل ۲-۹ کاهش یافته است.



(الف)



شکل ۲-۱۶ اندازه دامنه پترن تشعشی ساختار شکل ۲-۱۵ در صفحات گوناگون (الف و ب) [۱۳]

شکل ۲-۱۶ نشان می‌دهد که قرار دادن شکاف‌ها بر روی دهانه موجبرها موثر بوده و الگوی

تشعشی در چهار صفحه نشان داده شده در شکل بسیار مشابه یکدیگرند بدین معنا که الگوی

تشعشی آنتن طراحی شده متقارن بوده و این ساختار مناسب برای تغذیه آنتن‌های همچون آنتن بازتابی می‌باشد.

۲-۳- زمین امپدانس بالا

در این بخش به معرفی ساختار زمین امپدانس بالا (HIGP) با ابعاد محدود پرداخته می‌شود. مزیت استفاده از این ساختار کاهش موج سطحی تحریک شده، در دهانه موجبر می‌باشد. کاهش موج سطحی موجب افزایش بازده آنتن و در نتیجه کاهش سطح گلبه‌های کناری می‌شود.

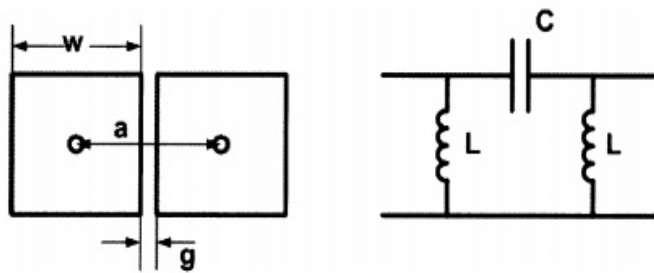
ساختارهای فوتونیک باند ممنوعه^۱ (PBG)، ساختارهای پریودیک هستند که از تشعشع موج-های الکترومغناطیسی با فرکانس‌های مشخص، جلوگیری می‌کنند. ایده استفاده از PBG ها نخست در [۳۷] مطرح گردیده‌است. خواص منحصر به فرد این ساختارها موجب رویکرد ویژه به این ساختارها، در باند میکروویو شده‌است. در ناحیه مایکروویو استفاده از این ساختارها موجب افزایش توان خروجی تقویت کننده‌ها شده‌است. هم‌چنین در باند مذکور استفاده از PBG ها موجب بهبود الگوی تشعشی آنتن‌های بازتابی گردیده‌است [۳۸].

HIGP گونه‌ای از زمین است که به‌عنوان کریستال الکترومغناطیسی در حذف موج سطحی مورد استفاده قرار گرفته‌است و سبب بهبود الگوی تشعشی آنتن طراحی شده، گردیده‌است.

در طراحی موجبرهای تک موده، ابعاد دهانه موجبر به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که تنها یک مود درون ساختار منتشر شود، ولی در عمل در دهانه موجبر، مودهای زیادی شروع به تشعشع می‌-

^۱ Photonic Band Gap

کنند. این ساختارها میزان لوب بازگشتی زیادی دارند. در موجبرهایی با بازشدگی زمین نامحدود این مشکل مرتفع می‌شود ولی در حقیقت ابعاد زمین آنتن‌های موجبری نامحدود نبوده و کاهش سایز زمین به کوچک‌سازی ابعاد نهایی آنتن طراحی شده بالاخص در ساختارهای آرایه‌ای می‌گردد. بنابراین HIGP با کاهش موج سطحی به بهبود الگوی تشعشعی موجبرهای آنتنی با زمین محدود کمک میکند.

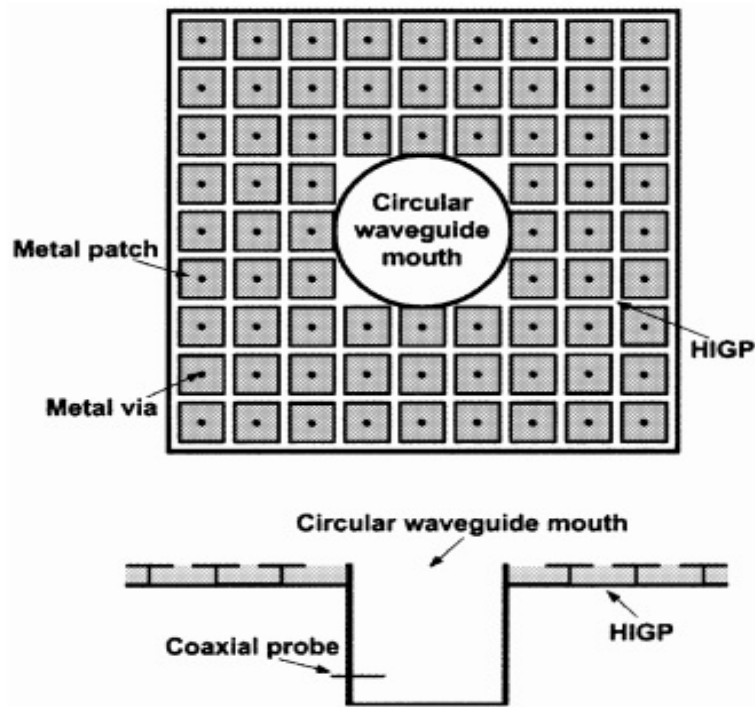


شکل ۲-۱۷ نمای پیچ‌های فلزی HIGP و معادل LC آنها [۳۹]

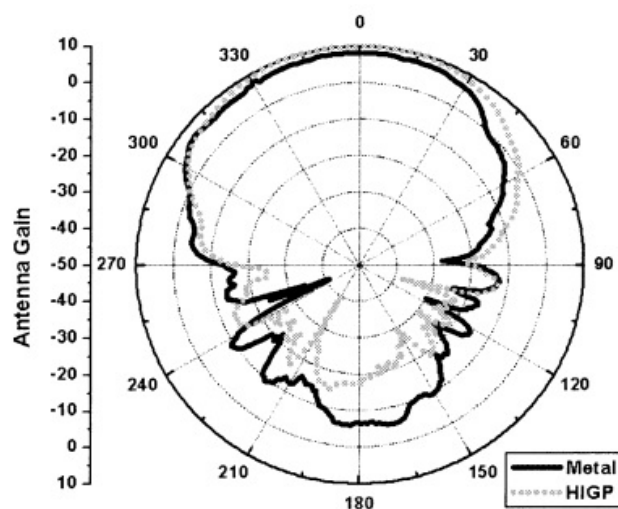
HIGP شامل یک صفحه فلزی مسطح که با آرایه‌ای از محفظه‌های تشدید تزویج شده، پوشانده شده است. این محفظه‌ها معمولاً به شکل پونز هستند، یعنی پیچ‌های فلزی کوچکی که بوسیله میله نازک رابط به صفحه زمین متصل شده‌اند. اگر ابعاد این پیچ‌ها کوچک‌تر از طول موج کاری باشد، این ساختار مشابه یک مدار LC عمل می‌کند. امپدانس این زمین از رابطه $Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$ قابل محاسبه است که اندوکتانس L از رابطه $L = \mu t$ بدست می‌آید که μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی لایه دی‌الکتریک است و ظرفیت خازنی ساختار از رابطه $C = \pi^{-1} \omega (\epsilon_r + \cosh^{-1}(a/g))$ که ϵ_r و ϵ_0 به ترتیب ضریب الکتریکی لایه دی‌الکتریک و خلا اند، محاسبه می‌شود. پارامترهای a و g و w نیز در شکل ۲-۱۷ مشخص شده‌است. وقتی در فرکانس

$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ تشدید رخ می‌دهد، امپدانس زمین بسیار زیاد است و این امپدانس بالا موجب کاهش

جریان سطحی بر روی زمین می‌شود. این مکانیزم اساس کار HIGP می‌باشد.



شکل ۲-۱۸ یک موجبر دایروی HIGP [۳۹]



شکل ۲-۱۹ بهره آنتن شکل ۲-۱۸ در فرکانس ۰.۵GHz [۳۹]

شکل ۲-۱۸ یک موجبر دایروی را که با کابل کوکسیال تغذیه شده است و دهانه باز آن به HIGP منتهی شده است را نشان می‌دهد. در شکل ۲-۱۹ بهره ساختار مذکور در فرکانس تشدید ۵.۵ GHz نشان داده شده است. دیده می‌شود که بهره ساختار در این حالت نسبت به بهره با زمین معمولی ۲dB افزایش یافته است. بنابراین HIGP مناسب برای پیاده سازی بر روی آنتن آرایه‌ای موج نشستی (که در فصل سوم به آن مفصلاً پرداخته خواهد شد) می‌باشد.

۲-۴- آنتن لنز

آنتن لنز و بازتابنده به عنوان دو عنصر موازی در طراحی‌های میلی متری و زیر میلی متری استفاده می‌شوند. آنتن‌های بازتابنده یک درجه‌ی آزادی دارند که همان سطح بازتابنده است. این آنتن‌ها تلفات داخلی و انحرافات تصادفی ندارند و تلفات انعکاسی کمی دارند. آنتن‌های بازتابنده می‌توانند سوارخ دار طراحی شوند تا وزن زیاد آن‌ها و تاثیر باد بر آن‌ها کاهش یابد. ولی لنزها تا چهار درجه آزادی در طراحی دارند که این چهار درجه عبارتند از: سطح داخلی، سطح خارجی، ضریب شکست و موقعیت سطح تشعشع کننده داخلی به خارجی برای لنزهای محدود. مزیت آنتن لنز نسبت به آنتن بازتابنده آن است که لنزها مشکل انسداد دهانه به وسیله آنتن تغذیه را ندارند. از معایب آنتن لنز به تلفات سطحی و داخلی و همچنین حجیم و سنگین بودن این آنتن‌ها می‌توان اشاره کرد.

در حالت کلی اگر یک بازتابنده بتواند عملکرد مورد نیاز را برآورده نماید، بهترین گزینه همان آنتن بازتابنده می‌باشد. از آنجا که آنتن‌های لنز تنوع بیشتری دارند، مخصوصاً در زوایای اسکن پهن، از آن‌ها می‌توان به جای آنتن‌های آرایه‌ای فازی که پیچیدگی زیادی دارند، استفاده نمود.

برخی از آنتن‌های لنز به‌طور مستقیم از اپتیک اقتباس می‌شوند. در باند تراهرتز تکنیک‌های خاصی به طراحان اجازه استفاده از این‌گونه آنتن‌ها را می‌دهد. این تکنیک‌ها عبارتند از: سطح لنز غیر کروی، مواد دی‌الکتریک مصنوعی و ضریب شکست متغیر با موقعیت در محیط.

۲-۴-۱- عملکرد آنتن لنز

لنزها به‌منظور موازی کردن یک جبهه موج با جبهه موج دیگر؛ با استفاده از روش ردیابی اشعه بر مبنای قانون مسیره‌های موازی؛ در سطح لنز طراحی می‌شوند. این آنتن‌ها جبهه موج استوانه‌ای یا کروی دارند که این جبهه موج به‌وسیله یک تغذیه خطی یا نقطه‌ای، در داخل یک جبهه موج خطی یا صفحه‌ای ایجاد می‌شوند. در عمل، برای اینکه عملکرد آنتن با جابجایی خارج محوری تغذیه بهم نریزد می‌توان، از تغذیه‌های پیچیده تری استفاده نمود.

در فرکانس‌های بالا محیط دی‌الکتریک همگن طبیعی، با ضریب شکست $n > 1$ کاربرد دارد که به لنزهایی با سطح محدب می‌انجامد. اگر محیط دی‌الکتریک مصنوعی باشد و ضریب شکستی در محدوده $n \ll 1$ و یا $n \gg 1$ داشته باشد؛ در این حالت سطح مقعر برای تمرکز دسته پرتو لازم است. در حالت کلی لنزهایی با ضریب شکست $n < 1$ به شدت پاشنده بوده و ضریب شکست آن‌ها به شدت با فرکانس تغییر می‌کند؛ در حالیکه لنزهایی با ضریب شکست $n > 1$ غیرپاشنده می‌باشند. بنابراین لنزهایی با $n < 1$ معمولاً به پهنای باند فرکانسی کوچک محدود می‌شوند در حالیکه لنزهایی که $n > 1$ دارند می‌توانند برای طراحی‌های با پهنای باند اکتاو و یا بیشتر استفاده شوند [۴۰].

روشن کردن روزنه (دهانه) لنز به چند فاکتور بستگی دارد. یکی از این فاکتورها تلفات ماده لنز است، که با ضخامت لنز متناسب است و برای لنزهای تقسیم بندی شده با $n > 1$ این تلفات برای

پرتوی محوری بیشتر است. از آنجا که یک لنز تقسیم بندی شده، باریک تر است، تلفات کمتری دارد ولی اشکالات متعددی در روشن کردن دهانه با لنزهای تقسیم بندی شده روی می دهد که نیاز به دقت بالایی در طراحی دارد و در باند تراهرتز، با توجه به کوچک بودن ابعاد، تاکنون از این نوع لنز استفاده نشده است.

بهره آنتن لنز توسط چند عامل کنترل می شود؛ که این عوامل عبارتند از: میزان انرژی آنتن تغذیه که به سطح لنز نمی تابد (تلفات سرریز)، تاثیر شکل لنز بر روشن کردن دهانه، تلفات پراکندگی در محیط لنز و بازتاب از سطوح. در کاربردهایی که سطح گلبیگ کناری^۱ بسیار پایین مورد نیاز است، استفاده از تغذیه چند عنصری (آرایه) به منظور روشن کردن مناسب روزه و کاهش سرریز پیشنهاد می شود.

۲-۴-۱-۱- تلفات پراکندگی

ثابت تضعیف پراکندگی برای ماده دی الکتریک تقریباً برابر $\left(\frac{dB}{wavelength}\right) 27.3n \tan \delta$ که n ضریب شکست محیط و $\tan \delta$ تانژانت تلفات محیط است. از آنجایی که بیشترین ضخامت لنز برای $n < 1$ تقریباً برابر $\frac{\lambda}{n-1}$ است. حد بالای تضعیف لنز تقریباً $\left(\frac{n}{n-1}\right) 27.3 \tan \delta$ دسی بل است. بنابراین برای اغلب مواد کاربردی، ماکزیم تلفات پراکندگی چند دهم دسی بل است [۴۰].

۲-۴-۱-۲- بازتاب سطحی

سطح مشترک هوا به دی الکتریک، یک موج بازتاب و انتقالی ایجاد می کند. دامنه و فاز موجها بوسیله معادله فرزنل، وابستگی به n ، زاویه تابش و پلاریزاسیون نسبت به صفحه تابش (صفحه

^۱ Side lobe level

تابش صفحه‌ای است بین پرتو تابشی و بردار عمود بر سطح) بدست می‌آید. از آنجا که بازتاب‌ها در دو صفحه لنز وجود دارد تاثیر بازتاب‌های چندگانه داخلی به وسیله طول مسیرهای پرتو بین صفحات بدست می‌آید. ضخامت یک لنز معمولی به طور قابل ملاحظه ای در دهانه اش تغییر می‌کند. برای اغلب لنزها زاویه تابش کمتر از ۴۵ درجه می‌باشد بطوریکه تلفات بازتاب در همه پلاریزاسیون‌های تابش و زوایا می‌تواند میانگین‌گیری شود تا تلفات از رابطه $۸.۶۹ \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$ (برحسب دسی‌بل) بدست آید. برای لنزی با $n = ۱.۶۵$ این تلفات بازتاب کمتر از ۰.۵ dB می‌باشد. برای زوایای تابش نزدیک به عمود، با اضافه کردن یک پوشش به ضخامت ربع طول موج با ضریب شکست $n^{۰.۵}$ به سطح لنز؛ که n ضریب شکست ماده لنز است؛ می‌توان از بازتاب‌های چندگانه درون ساختار لنز جلوگیری به عمل آورد [۴۱].

با توجه به مشکلات انتشار امواج در محدوده تراهرتز؛ مانند نرخ بالای تضعیف، بهره کم، نرخ بالای پراکندگی از اجسام؛ مسئله‌ی طراحی آنتن در باند تراهرتز پراهمیت شده‌است. در باند تراهرتز تاکنون آنتن‌هایی با نمایه شکل داده شده طراحی شده‌اند که می‌توان به آنتن تک قطبی با زمین شکل داده شده، آنتن بازتابنده شکل داده شده، آنتن مایکرواستریپ و آنتن لنز اشاره نمود. آنتن تک قطبی با زمین شکل داده شده نسبت به تغییرات ابعاد در ساخت بسیار حساس است. آنتن بازتابنده نیز نیاز به یک زیر بازتابنده بزرگ برای پوشش تمامی زوایا دارد و در نهایت آنتن آرایه‌ای تلفات بالایی در فرکانس‌های بالا دارد. در این میان آنتن لنز می‌تواند با استفاده از دی-الکتریک با تانزانته تلفات پایین تا حدودی این مشکلات را در فرکانس‌های بالا حل نماید.

در این فصل به معرفی محدوده فرکانسی تراهرتز و بیان ویژگی‌های مواد در این محدوده فرکانسی پرداخته شد. سپس با بیان ویژگی‌های موج نشستی، به مبانی طراحی آنتن با اسلات بر

روی سطح ساختار اشاره گردید و هم‌چنین مزیت استفاده از آنتن دواسلات نسبت به تک اسلات ارائه شد. در ادامه با معرفی یک آنتن دواسلات که تحت پوشش آنتن لنز در باند تراهرتز است، ایده اصلی ساختار آنتن طراحی شده در این پایان‌نامه معرفی گردید. به منظور بهبود نتایج حاصل از آنتن معرفی شده در بخش ۲-۲-۲، به عنوان راه حلی برای کاهش جریان سطحی ساختار مذکور، تکنیک زمین امیدانس بالا را ارائه نمودیم تا با بکارگیری آن بتوانیم از آرایه‌ای از آنتن موج نشستی بر روی یک زمین مشترک و تحت پوشش تنها یک آنتن ثانویه استفاده نماییم. با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۲-۴ به این جمع بندی دست یافتیم که مناسب‌ترین ساختار برای پوشش آنتن اولیه آرایه‌ای، به منظور کاهش تلفات سرریز و محیط در محدوده تراهرتز، آنتن لنز دی‌الکتریک می‌باشد. در فصل سوم با توجه به موارد ارائه شده در این فصل به شبیه‌سازی آنتن آرایه موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز می‌پردازیم.

فصل ۳- طراحی آرایه آنتن موج نشتی تحت پوشش آنتن لنز

۳-۱- مقدمه

در این فصل برآنیم تا به طراحی یک آرایه موج نشتی که تحت پوشش یک آنتن لنز است در باند تراهرتز پردازیم. برای دستیابی به این هدف، ابتدا یک موجبر موج نشتی تک المان را با دو شکاف قوسی شکل (همانگونه که در بخش ۲-۲-۱ بیان شد) طراحی می‌نماییم. این موجبر با دهانه باز به یک زمین با ابعاد $12\lambda \times 12\lambda$ منتهی می‌شود. در ادامه به منظور کاهش جریان سطحی ایجاد شده بر روی زمین و کم کردن ابعاد زمین، زمین را با کمک پچ‌های پونز شکل (همانگونه که در بخش ۲-۳ بیان شد) به زمین امیدانس بالا تبدیل می‌کنیم. سپس از یک محفظه تشدید هوا بر روی ساختار استفاده می‌نماییم. محفظه تشدید به منظور تطبیق امیدانس تغذیه موجبری با محیط سیلیکونی (آنتن لنز سیلیکونی) به کار می‌رود. همچنین از یک لایه سیلیکونی بر روی محفظه تشدید هوا، استفاده می‌گردد که در واقع، محفظه را به محفظه تشدید بخشی-پیر شده تبدیل می‌نماید. استفاده از این محفظه تشدید بخشی-پیر شده به افزایش راستاوی و کاهش زاویه تابش پرتو در جهت اصلی (عمود بر ساختار) کمک می‌کند. در پایان طراحی، از آنتن نیمه کروی لنز بر روی ساختار استفاده می‌شود که همچون محفظه تشدید موجب بهبود راستاوی ساختار می‌گردد.

پس از طراحی آنتن تک المان، به منظور افزایش بازده آنتن از آرایه نمودن موجبر موج نشتی استفاده می‌نماییم. برای این منظور از پنج موجبر مربعی موج نشتی (همانگونه که در بخش ۲-۲-۳

بیان شد) که به زمین با ابعاد بالا منتهی می‌شوند استفاده نموده و میزان تزویج میان المان‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

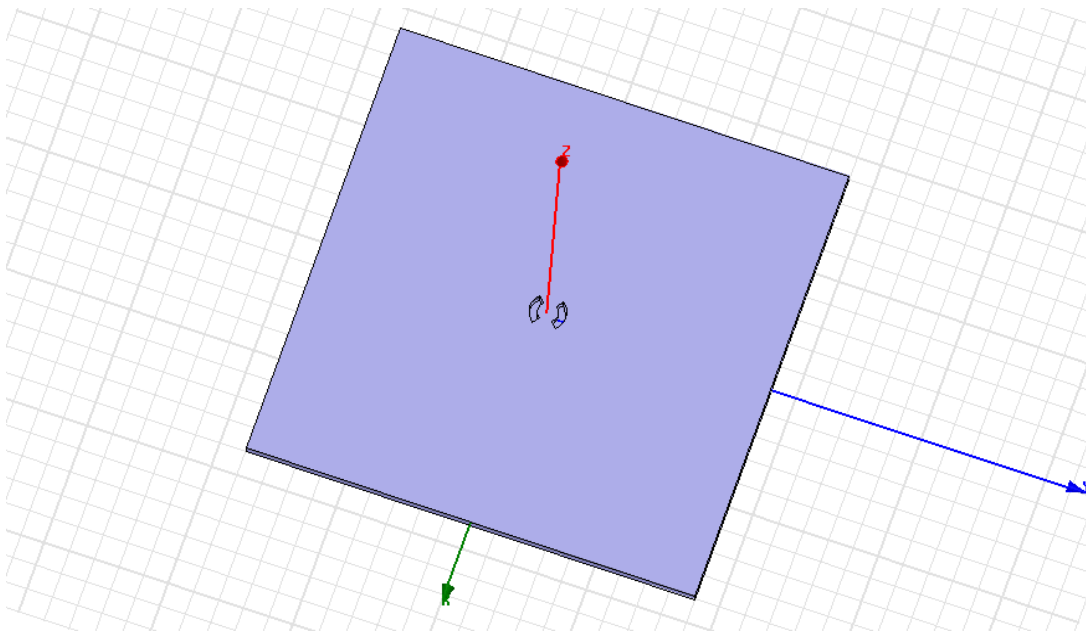
بنابراین روند طراحی بدین گونه است که ابتدا یک موجبر مربعی دو اسلات که به زمین با ابعاد وسیع باز می‌شود را طراحی نموده و سپس با تکنیک HIGP ابعاد زمین را افزایش داده تا با کاهش موج سطحی ایجاد شده بر روی سطح، به زمینی با ابعاد مناسب دست یابیم. در ادامه با پیاده‌سازی محفظه تشدید بخشی-پر و آنتن لنز نیمه کروی، آنتن موج نشی تک المان تحت پوشش لنز محقق می‌گردد. در نهایت با طراحی چینش پنج المان از موجبر موج نشی که همه آن-ها بر روی یک زمین مشترک قرار داشته و تحت پوشش یک آنتن لنز نیمه کروی می‌باشند، به آنتنی با بازده مناسب و راستاوی بالا در ابعاد مناسب دست می‌یابیم. ذکر این نکته ضروری است که تمامی مراحل طراحی آنتن مذکور در نرم افزار Ansoft HFSS در فرکانس مرکزی GHz ۱۰۰ صورت گرفته است.

۲-۳- طراحی تشعشع کننده مسطح تحت پوشش آنتن لنز

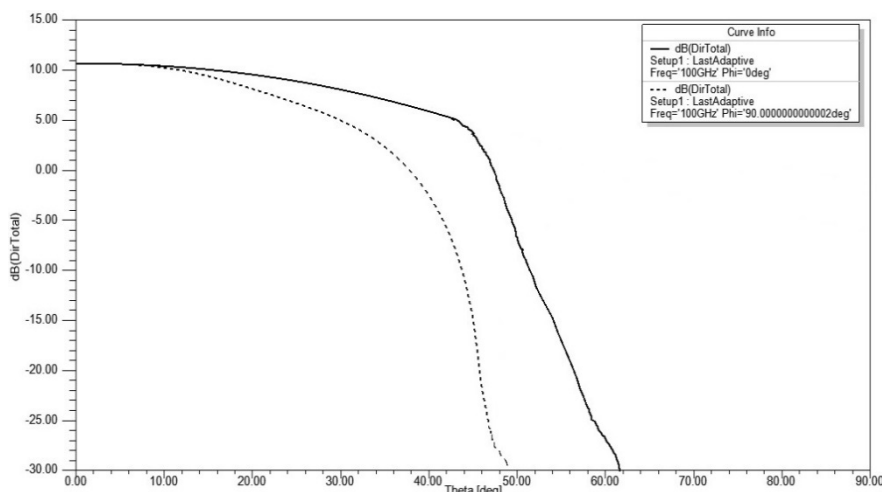
در این بخش ابتدا به طراحی موجبر مربعی موج نشی با صفحه زمین وسیع، می‌پردازیم و با هدف کاهش جریان سطحی ساختار و در نتیجه فراهم آمدن شرایط برای کاهش ابعاد زمین، از تکنیک HIGP استفاده نموده تا ابعاد زمین را محدود می‌نماییم و با طراحی محفظه تشدید مناسب و لایه دی‌الکتریک بر روی ساختار مذکور زمینه لازم برای دستیابی به پرتو با راستاوی بالا را فراهم می‌آوریم. در پایان از آنتن لنز نیمه کروی استفاده نموده تا بازده ساختار طراحی شده، افزایش یابد.

۱-۲-۳- طراحی آنتن موج نشستی دو اسلات

به منظور تحریک ساختار مورد نظر ابتدا موجبر مربعی را بصورت تک مد برای تشعشع در فرکانس مرکزی ۱۰۰ GHz طراحی نموده ایم. بر روی دهانه باز مربعی موجبر یک لایه نازک فلزی به ضخامت $\frac{\lambda}{4}$ و بر روی آن یک لایه سیلیکونی به ضخامت $\frac{\lambda d}{4}$ قرار داده و دو شیار دایروی بر روی دهانه موجبر به صورت شکل ۱-۳ ایجاد می‌کنیم تا موج از طریق آنها به بیرون موجبر انتشار یابد. ابعاد قوسی که بر روی این لایه فلز-دی‌الکتریک پیاده سازی می‌شود از روابط زیربخش ۱-۲-۲ بدست می‌آید. همانطور که در زیربخش ۱-۲-۲ توضیح داده شد علت استفاده از لایه فلزی جلوگیری از ایجاد لوب بازگشتی می‌باشد. ابعاد زمین این ساختار $12\lambda \times 12\lambda$ می‌باشد. شکل ۲-۳ نمودار راستاوی ساختار مذکور را نشان می‌دهد.

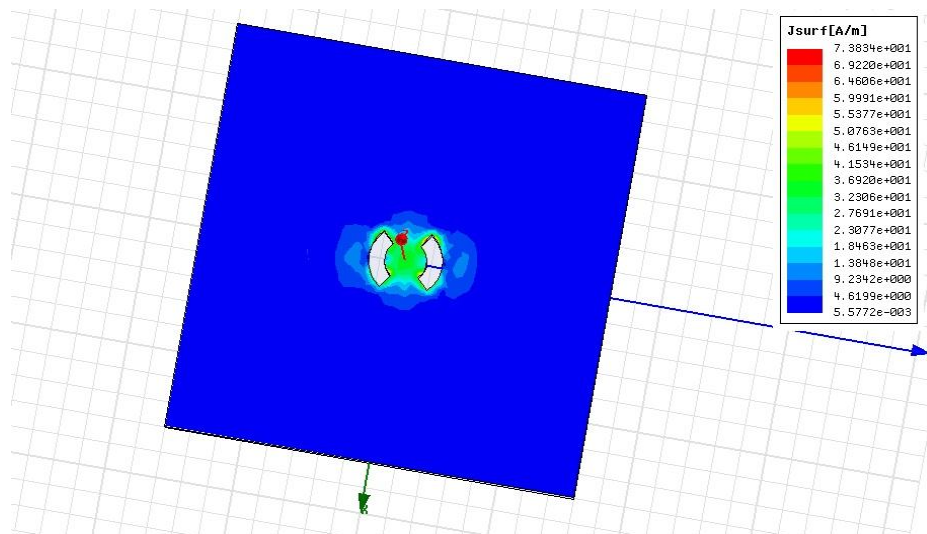


شکل ۱-۳ موجبر موج نشستی دو اسلات دار باز شده در زمین مسطح



شکل ۲-۳ راستاوی موجبر موج نشستی

همانطور که در زیربخش ۲-۲-۳ اشاره شد، طراحی صحیح اسلات‌ها موجب می‌شود که موج سطحی TM_0 حذف شده و زاویه پرتو تابشی کاهش یابد. شکل ۲-۳ نیز این مسئله را تایید میکند که وجود اسلات‌ها بر دهانه موجبر باعث شده که در زوایای نزدیک به سطحی افق (حدود ۶۰ الی ۹۰ درجه) تشعشعی وجود ندارد. شکل ۳-۳ جریان سطحی روی صفحه زمین موجبر موج نشستی را نشان می‌دهد. از نحوه توزیع جریان بر روی ساختار می‌توان دریافت که چگالی جریان سطحی بر روی ساختار در اطراف اسلات‌ها بیشتر بوده و به علت گستره بودن ابعاد زمین تشعشعی در لبه‌های ساختار وجود ندارد ولی در عمل بمنظور کاهش ابعاد آنتن می‌بایست ابعاد زمین را کاهش داده که در این حالت جریان نشستی موجود در لبه‌ها موجب کاهش چشمگیر بازده ساختار می‌گردد. بنابراین در ادامه روند طراحی برآنیم تا با کمک تکنیک‌هایی زمین با امپدانس بالا ایجاد کنیم تا جریان سطحی را کاهش دهیم. کاهش جریان سطحی، امکان کاهش ابعاد زمین را به طراح داده و همچنین زمینه لازم برای کم کردن تزویج متقابل میان چند ساختار تشعشع کننده را فراهم می‌سازد.

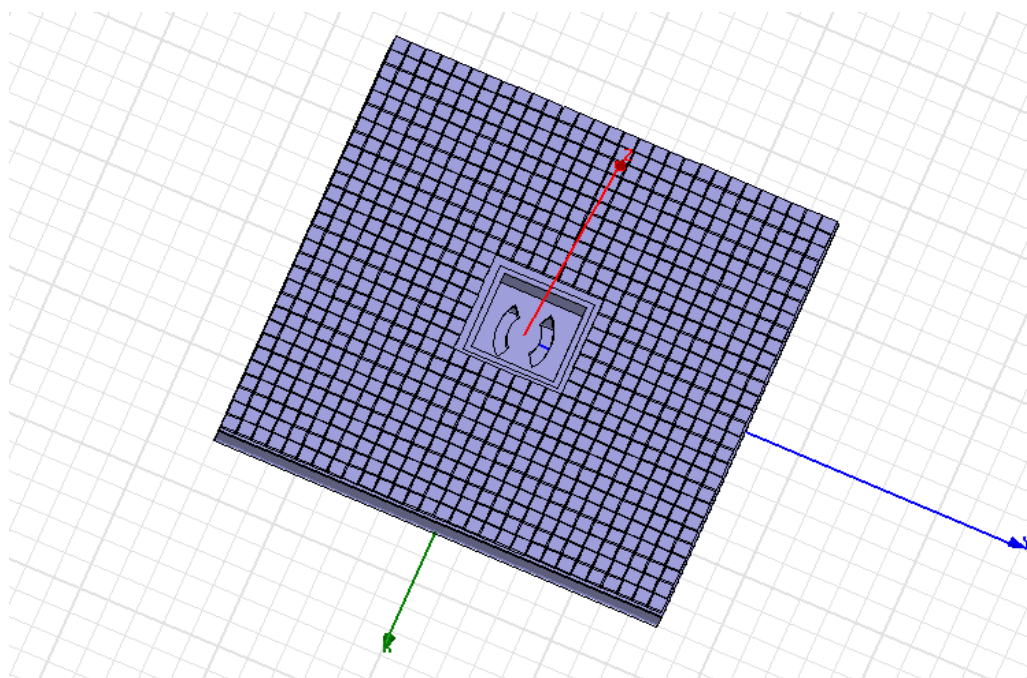


شکل ۳-۳ جریان سطحی مربوط به ساختار شکل ۱-۳

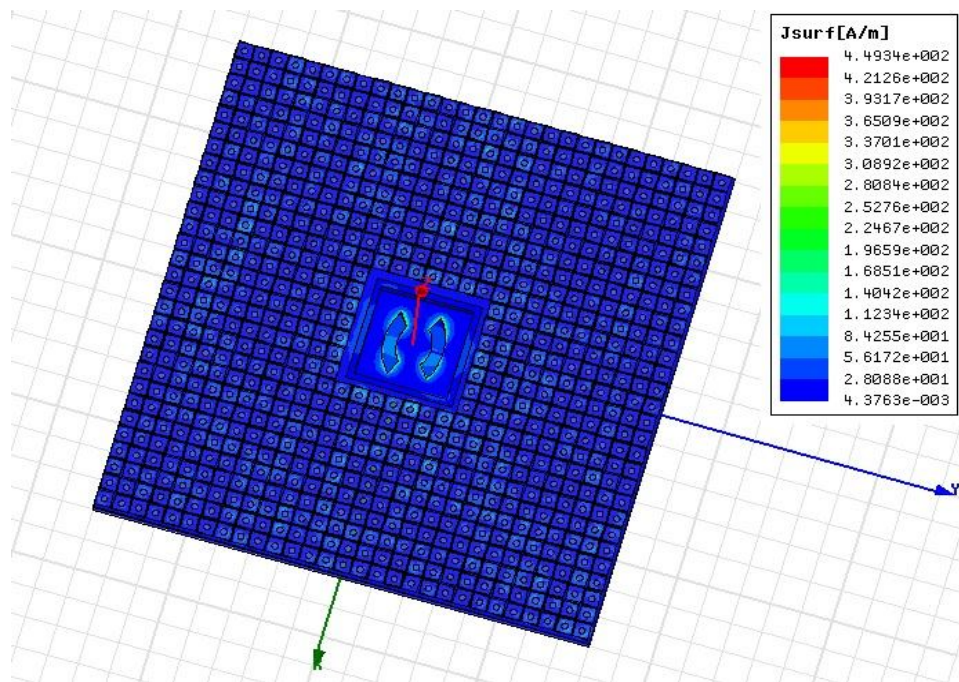
طراحی زمین امپدانس بالا - ۲-۲-۳

همانطور که در زیربخش ۲-۳ گفته شد، با تبدیل زمین معمولی به زمین با امپدانس بالا، جریان سطحی ایجاد شده بر روی زمین کاهش می‌یابد. ساختار زمین ارائه شده در این بخش به صورت یک لایه نازک دی‌الکتریک بر روی زمین می‌باشد. ضخامت لایه دی‌الکتریک ۰.۰۷۵ میلی‌متر می‌باشد. پچ‌های فلزی با ابعاد کمتر از طول موج بر روی این لایه قرار می‌گیرند که با پایه فلزی به زمین اصلی ساختار مرتبط می‌شوند. شکل ۳-۴ ساختار طراحی شده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳-۵ جریان سطحی ایجاد شده بر روی HIGP نمایش داده شده است. طراحی زمین با امپدانس بالا می‌تواند با کاهش جریان ایجاد شده بر روی سطح، زمینه لازم برای بهینه کردن ابعاد نهایی آنتن را فراهم آورد. همانطور که در فصل اول اشاره شد، کاربرد آنتن موردنظر در تصویربرداری‌های تراهرتز می‌باشد، بنابراین هرچه ابعاد آنتن تک المان کوچک‌تر باشد تعداد

بیشتری از این آنتن‌ها را می‌توان بصورت آرایه بکار برد تا تصویر با وضوح و کیفیت بالاتری ایجاد گردد.

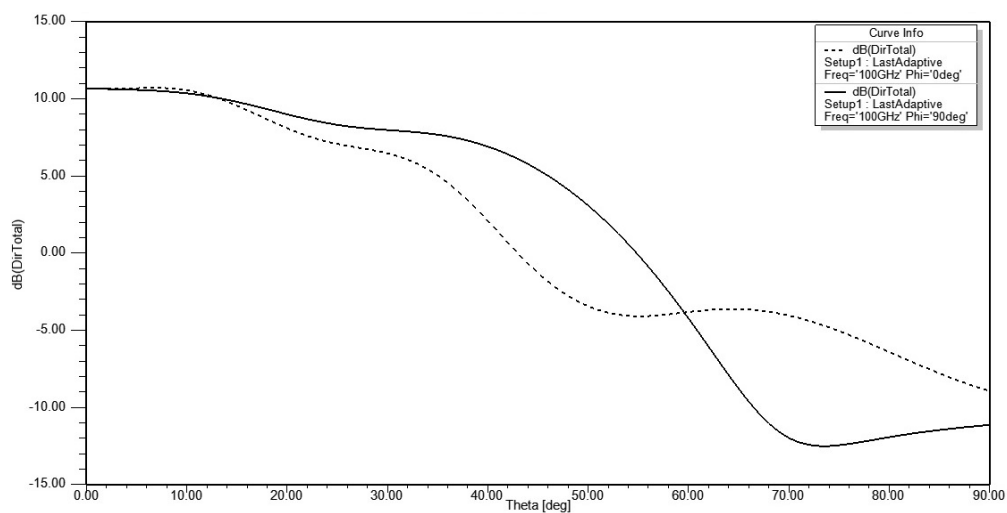


شکل ۳-۴ موجبر موج نشستی با زمین امپدانس بالا

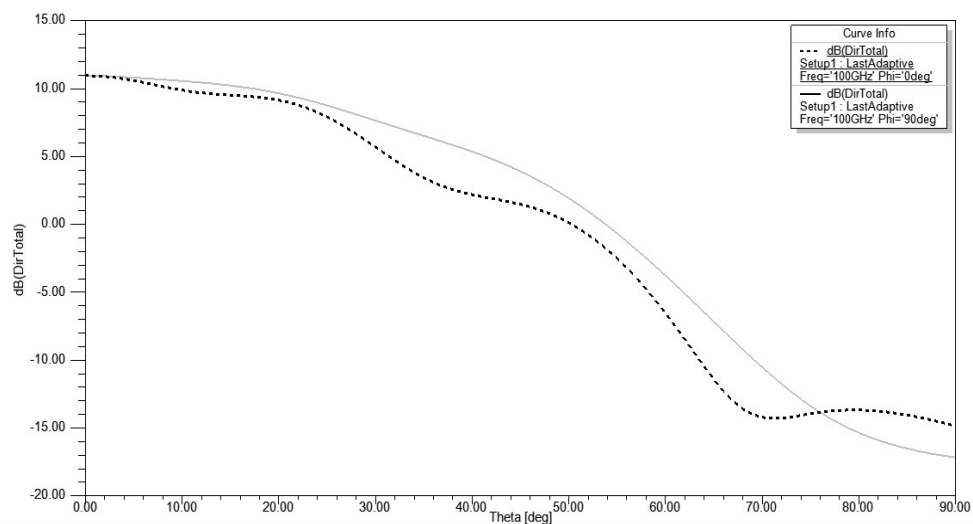


شکل ۳-۵ جریان سطحی ایجاد شده بر روی HIGP

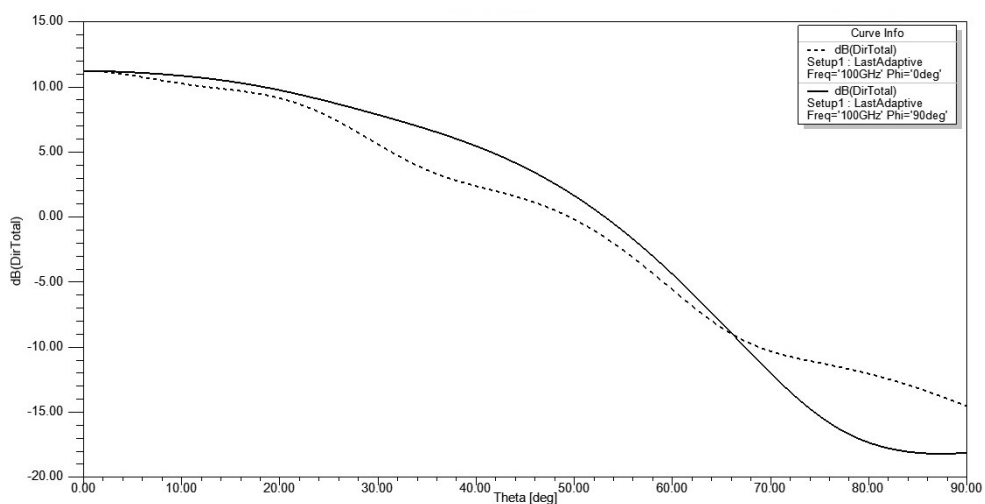
برای انتخاب ماده دی‌الکتریک که منجر به ایجاد راستاوی بالاتری گردد، چند ماده مورد آزمایش قرار گرفت که با توجه به نتایج حاصل از آن‌ها گالیوم آرسناید به‌عنوان لایه دی‌الکتریک موردنظر انتخاب گردید.



شکل ۳-۶ نمودار راستاوی موجبر موج نشتی با HIGP با لایه کوارتز



شکل ۳-۷ نمودار راستاوی موجبر موج نشستی با HIGP با لایه سیلیکون

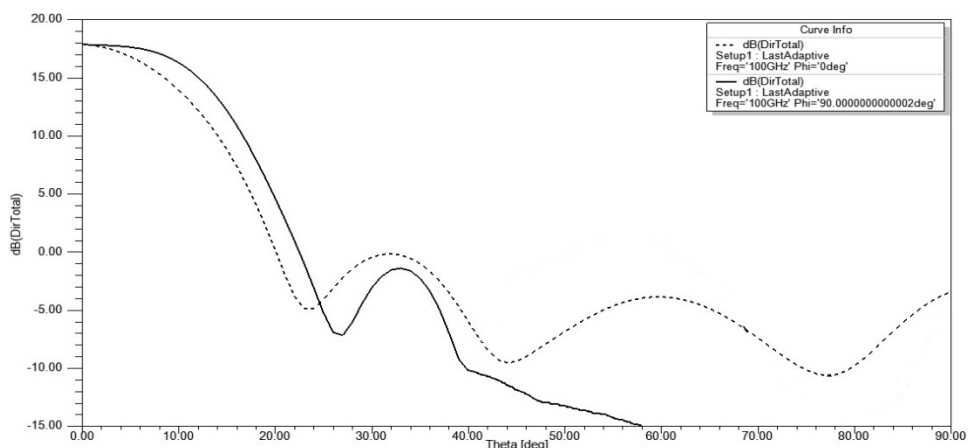


شکل ۳-۸ نمودار راستاوی موجبر موج نشستی با HIGP با لایه گالیوم آرسناید

شکل های ۳-۵ تا ۳-۸ نشان می دهد که طراحی آنتن با زمین امپدانس بالا با لایه دی الکتریک از جنس گالیوم آرسناید منجر به کاهش جریان سطحی شده و با بهبود پارامتر راستاوی ساختار در حدود یک دسی بل، انتخابی مناسب در طراحی بخش آنتن اولیه ساختار موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز می باشد.

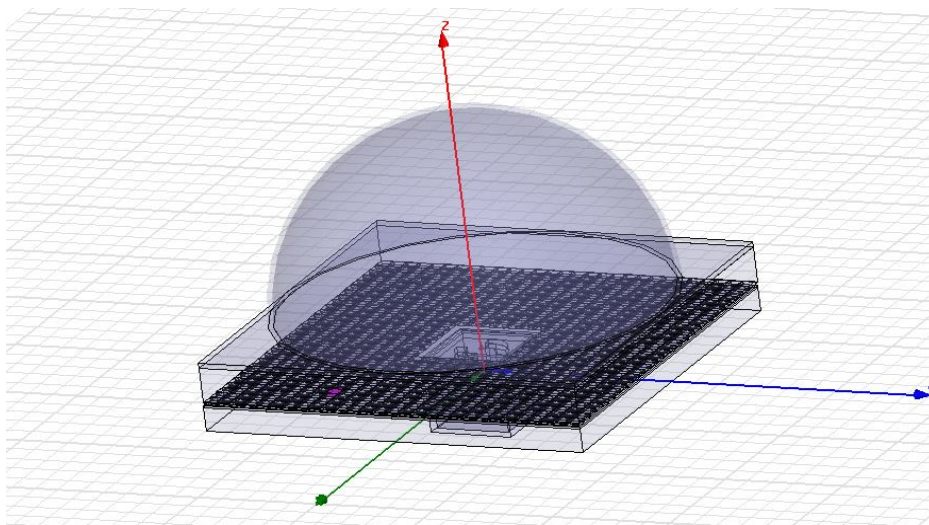
۳-۲-۳- طراحی محفظه تشدید

هدف از طراحی آنتن موج نشستی که تحت پوشش آنتن لنز قرار دارد، دستیابی به پرتو با زاویه تابش کم و راستاوی بالا می‌باشد. پس از طراحی آنتن اولیه (که در بخش ۳-۲-۲ ارائه گردید)، در این بخش به دنبال روشی برای افزایش بهره آن ساختار می‌باشیم. یکی از روش‌های افزایش راستاوی، استفاده از لایه فوقانی از جنس دی‌الکتریک بر روی ساختار تشعشع کننده می‌باشد. برای پیاده سازی این روش از یک محفظه هوا به ضخامت $\frac{\lambda_0}{4}$ استفاده می‌نماییم تا امپدانس دهانه موجبر را با دی‌الکتریک فوقانی تطبیق دهد. در این طراحی ارتفاع محفظه تشدید هوا ۱.۵ میلی‌متر بوده و بر روی آن لایه نازکی از سیلیکون قرار گرفته‌است. شکل ۳-۹ راستاوی ساختار طراحی شده را نشان می‌دهد. در این شکل، افزایش راستاوی و هم‌چنین باریک شدن پرتوی تشعشعی کاملاً مشهود است. باریک شدن پرتو با کمک قوانین پایه اپتیک قابل توجیه است. در طراحی این آنتن با توجه به اینکه نیازمند پرتو با عرض کم‌تر بوده‌ایم از لایه دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک بالا ($\epsilon_{rc} = 11.9$) استفاده نموده‌ایم.

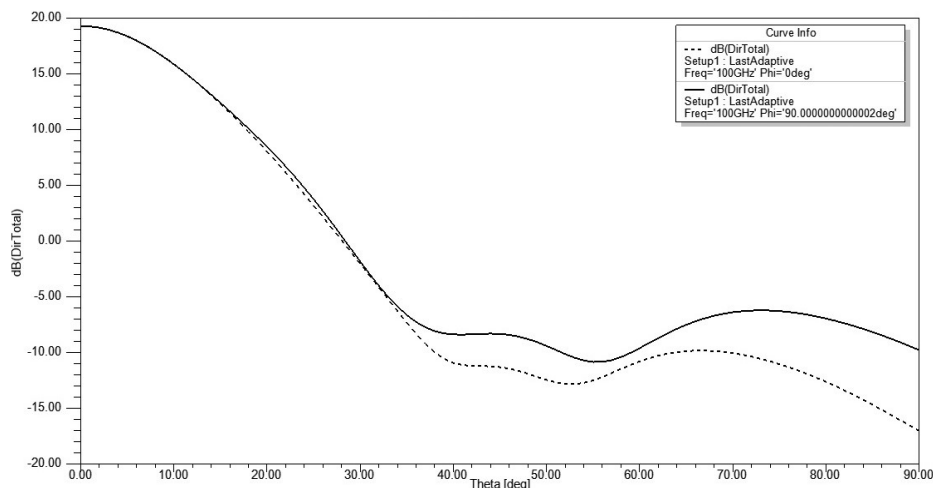


شکل ۳-۹ نمودار راستاوی موجبر موج نشستی به‌همراه محفظه تشدید بخشی-پرشده

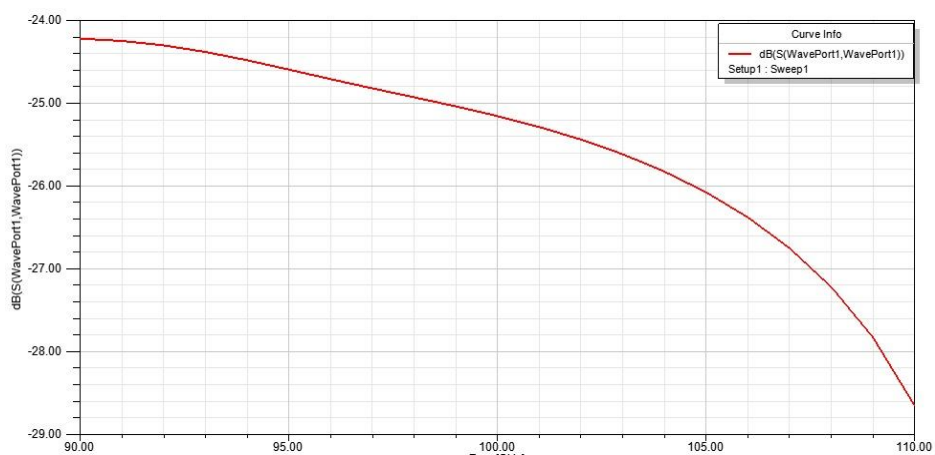
طراحی آنتن تک المان موج نشتی با قرار دادن آنتن لنز نیمه کروی بر روی محفظه تشدید به پایان می‌رسد (شکل ۳-۱۰). همانطور که پیشتر اشاره شده، بازده آنتن‌ها در محدوده تراهرتز کم بوده و استفاده از آنتن‌های ثانویه همچون آنتن لنز به افزایش بازده ساختار کمک می‌کند. لازم به ذکر است که جنس آنتن لنز از سیلیکون بدون تلف می‌باشد زیرا در [۲۳] گفته شده اگر جنس آنتن اولیه با آنتن ثانویه یکسان باشد میزان افزایش راستاوی پرتوی حاصل از آنتن ثانویه بیشتر خواهد بود. در شکل ۳-۱۱ راستاوی آنتن نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که راستاوی ساختار نسبت به آنچه در بخش ۳-۲-۳ گردید، بیشتر شده است که به نظر می‌رسد این افزایش ناشی از کاهش تلفات سرریز، به دلیل پوشش آنتن اولیه بوسیله آنتن لنز، می‌باشد. هم‌چنین شکل ۳-۱۲ ضریب بازگشتی آنتن در بازه فرکانسی ۹۰ تا ۱۱۰ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. اندازه ضریب بازگشتی این آنتن حاکی از آن است که در دهانه آنتن اولیه، تطبیق امپدانسی مناسبی ایجاد شده است.



شکل ۳-۱۰ آنتن موج نشتی با آنتن ثانویه لنز



شکل ۳-۱۱ راستاوی آنتن ثانویه (لنز)



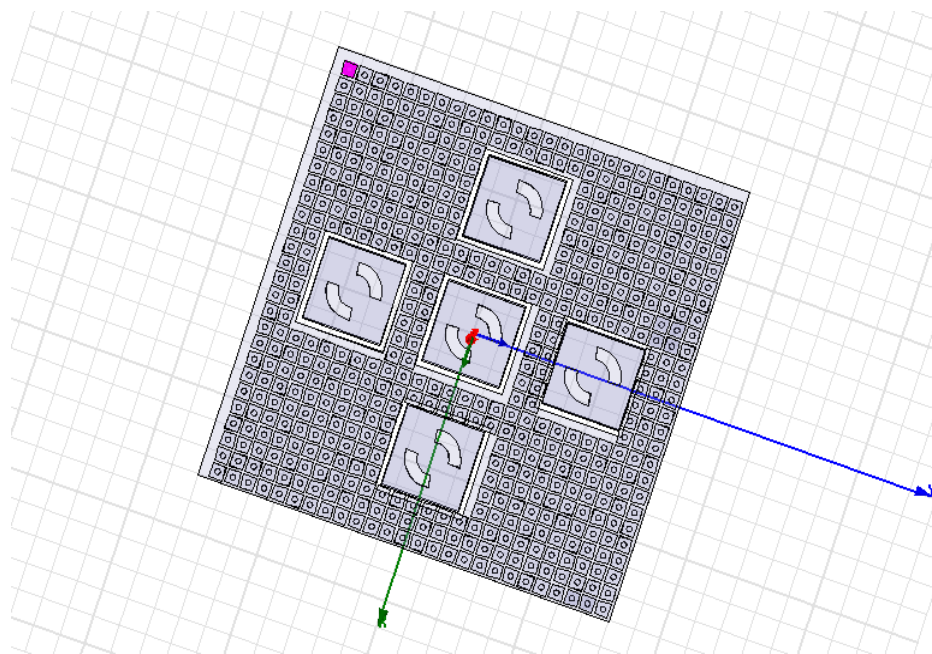
شکل ۳-۱۲ ضریب بازگشتی آنتن موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز

۳-۳ طراحی آرایه آنتن موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز

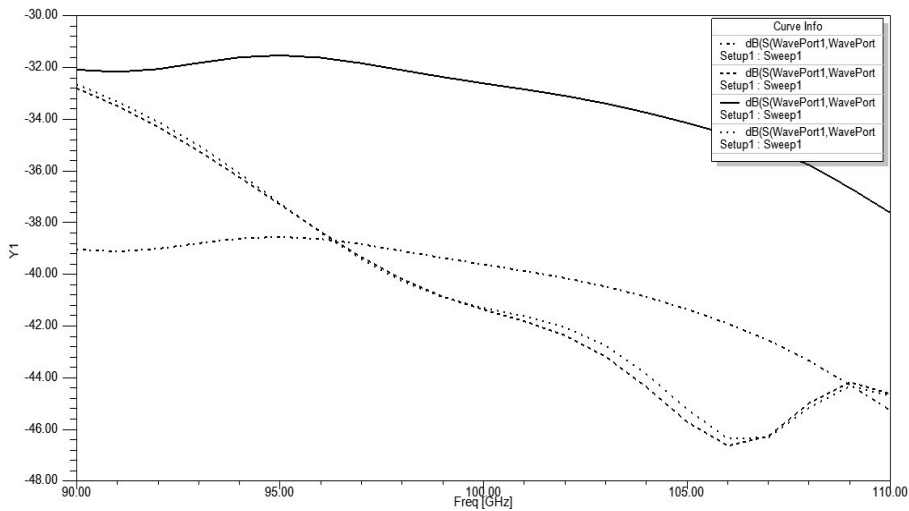
۱-۳-۳ طراحی آرایه آنتن موج نشستی

این ساختار ساده‌ترین سیستم تصویربرداری مسطح کانونی چندپرتویی که هر پرتو به وسیله یک موجبر تغذیه می‌شود، می‌باشد. در این سیستم‌ها ابعاد فیزیکی هر المان تغذیه می‌بایست آنقدر کوچک باشد که المان‌ها به حدی بهم نزدیک باشند که به پرتوی ثانویه با سطح قابل قبولی از

سرریز دست یابیم. اصلی‌ترین محدودیت در استفاده از موج نشتی در این آرایه‌ها اثر تزویج متقابل می‌باشد که با بکارگیری زمین با امپدانس بالا میزان تزویج متقابل میان موجرها کاسته شده‌است. شکل ۳-۱۳ آرایه پنج تایی از موجبر موج نشتی طراحی شده در بخش ۲-۳ را نشان می‌دهد. پارامترهای پراکندگی مربوط به این ساختار در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده‌است. در واقع شکل ۳-۱۴ تزویج متقابل میان موجبر مرکزی با چهار موجبری که آن را احاطه کرده‌اند را بیان می‌کند. نتایج بیانگر آن است که انتخاب فاصله مناسب بین المان‌های آرایه و بکارگیری تکنیک HIGP موجب شده‌است که تزویج میان این المان‌ها بسیار ناچیز بوده و در این طراحی به‌خوبی از تزویج توان میان موجرها جلوگیری به عمل آمده‌است.



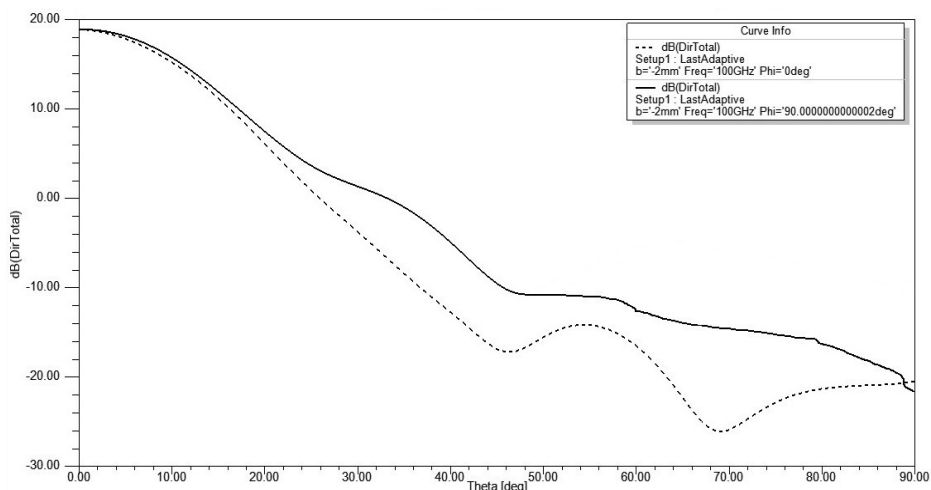
شکل ۳-۱۳ آرایه موجبر موج نشتی



شکل ۳-۱۴ پارامترهای پراکندگی مربوط به آرایه موج نشتی

۳-۳-۲- طراحی آرایه آنتن موج نشتی با محفظه تشدید و لایه دی الکتریک فوقانی

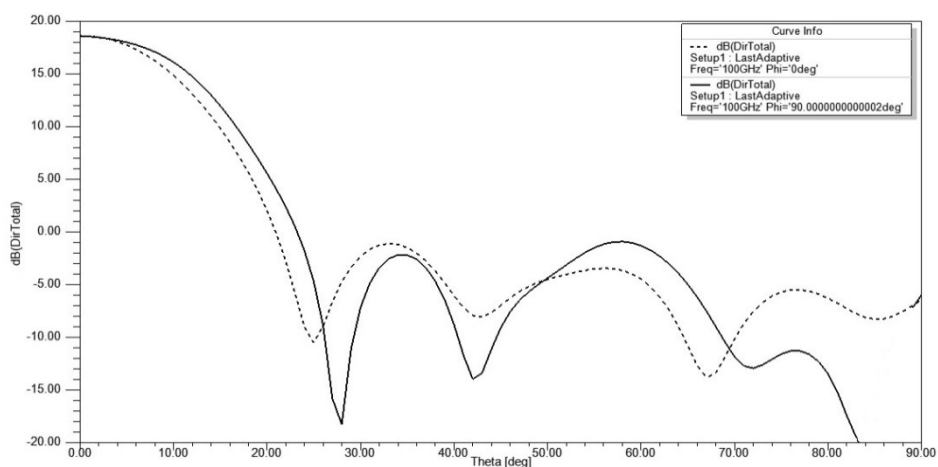
در بخش ۳-۲-۳ بمنظور افزایش راستاوی ساختار طراحی شده، از یک لایه دی الکتریک به موازات صفحه زمین و به فاصله ربع طول موج از آن، استفاده نمودیم. در این بخش نیز همانند آنتن تک المان، بر روی آرایه موج نشتی، از محفظه تشدید هوا و یک لایه نازک دی الکتریک استفاده می نماییم. شکل ۳-۱۵ راستاوی ساختار طراحی شده را نشان می دهد. اگرچه پارامتر راستاوی آرایه ارائه شده نسبت به ساختار طراحی شده در بخش ۳-۲-۳ افزایش یافته است ولی بعلاوه افزایش پهنای پرتو انتشار یافته توسط آنتن اولیه، پهنای پرتو انتشار یافته از آن نیز افزایش یافته است که این افزایش عرض بیم را با طراحی یک آنتن لنز نیمه کروی بر روی ساختار طراحی شده در این زیربخش می توان تا حدودی بهبود بخشید.



شکل ۳-۱۵ راستاوی آرایه موجبر نشستی با محفظه تشدید بخشی-پرشده

۳-۳-۳ طراحی آرایه آنتن موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز

مشابه بخش ۳-۲-۴ بر روی ساختار طراحی شده در زیربخش قبلی آنتن نیمه کروی قرار می-دهیم. بهتر است جنس آنتن لنز دی الکتریکی با تانژانت تلفات ناچیز باشد. هم چنین بنابر آنچه در [۲۳] گفته شده می بایست جنس آنتن اولیه (آنتن موج نشستی) و آنتن ثانویه (آنتن لنز) یکی باشد تا تزویج انرژی بین دو آنتن با کمترین میزان تلفات صورت گیرد. شکل ۳-۱۶ میزان راستاوی مربوط به طراحی نهایی را در فرکانس ۱۰۰ GHz نشان می دهد.



شکل ۳-۱۶ راستاوی آرایه موجبر موج نشستی تحت پوشش آنتن لنز

ملاحظه می‌شود که تشعشع ثانویه از آنتن لنز نسبت به تشعشع از محفظه تشدید دارای زاویه تابش کوچکتری می‌باشد و ثبات میزان راستاوی در راستای عمود بر سطح نسبت به شکل ۳-۱۵ بهبود یافته است، که بیانگر افزایش بازده تشعشعی آنتن می‌باشد. همانطور که پیش از این نیز گفته شده، مشاهده می‌شود که آرایه‌ای از آنتن موج نشستی که با هم زمین مشترک دارند، اگرچه پارامتر راستاوی آنتن ثانویه حدود یک دسی‌بل کاسته می‌شود ولی مقدار آن در مقطع بزرگتری از مقطع عرضی عمود بر محور اصلی لنز ثابت می‌ماند که موجب کاهش تلفات ساختار کلی آنتن می‌گردد. در فصل چهارم با جمع‌بندی نتایج حاصل از طراحی‌های این فصل، به دستاوردهای حاصل از طراحی این آنتن، بیان محدودیت‌های پیش رو و پیشنهادهای به منظور بهینه‌سازی ساختار ارائه شده می‌پردازیم.

فصل ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

همانطور که در فصول پیشین مطرح شد، در طراحی آنتن در محدوده تراهرتز با محدودیت‌های زیادی روبرو هستیم؛ فقدان روش تحریک مناسب، تلفات بالای موج تراهرتز و در دسترس نبودن تکنولوژی ساخت آنتن با ابعاد میکرومتر نمونه‌ای از محدودیت‌های پیش روی طراحان آنتن می‌باشد که موجب شده باند تراهرتز را باند شکاف نیز به‌نامند. تراهرتز غیر از کاربردهای محدود در کیهان‌شناسی، به علت محدودیت در وسایل و ادوات، تولید و آشکارسازی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. ظهور لیزرهای فمتو ثانیه و آنتن‌های نور-رسانایی در سال‌های ۱۹۸۰ باعث کاربردی شدن تراهرتز در علوم پزشکی، علوم دارویی و کاربردهای امنیتی شد. با ساخت لیزرهای فمتوثانیه زمینه برای تحریک لیزری این ساختارها فراهم گردید ولی تکنولوژی ساخت اینگونه لیزرها پیچیده بوده و مقرون به صرفه نیست. تلاش برای تحریک موجبری آنتن‌های تراهرتز از سال ۲۰۰۸ آغاز گردیده‌است و در این پروژه نیز از روش موجبری به‌منظور تحریک آنتن طراحی شده استفاده شده‌است.

از دیگر محدودیت‌ها به تلفات بالای موج تراهرتز اشاره گردید؛ تلفات محیط اتمسفر برای فرکانس‌های بیشتر از ۱۰۰ گیگاهرتز بسیار افزایش می‌یابد و این باعث کاهش محدوده پوشش برای ارتباطات و کاهش سیگنال به نویز می‌شود که در کاهش ظرفیت انتقال اطلاعات موثر می‌باشد. به منظور کاهش این تلفات، با بکارگیری تکنیک زمین امپدانس بالا از تلفات زیرلایه ساختار کاسته شد. بکارگیری تکنیک HIGP موجب کاهش جریان سطحی آنتن اولیه شد و دستاورد این

روش، کاهش ابعاد زمین ساختار به نصف نمونه قبلی آن می‌باشد. هم‌چنین با چینش مناسب پنج آنتن موج نشتی بر روی زمین مشترک و پوشش دادن این ساختار با لایه فوقانی و لنز دی‌الکتریک از تلفات سرریز آنتن اولیه کاسته شده و به آنتن با راستاوی و بازده مناسبی دست یافتیم.

به منظور تحلیل ساختار آنتن از نرم افزار Ansoft HFSS استفاده گردید. به نظر می‌رسد که این بسته‌ی نرم‌افزاری از دقت و سرعت کافی برای تحلیل ساختارهایی در محدوده تراهرتز برخوردار نیست. مشخصاً در فرکانس ۵۴۵ GHz پاسخ‌های دریافتی از همگرایی مطلوب برخوردار نبوده و بنابراین مجبور به طراحی آنتن در ابتدای محدوده تراهرتز (فرکانس ۱۰۰ GHz) شدیم. هم‌چنین به دلیل بالا بودن فرکانس طراحی، نرم‌افزار ملزم به شبکه‌بندی با ابعاد بسیار کوچکی شده بود که ذخیره‌سازی این اطلاعات نیازمند حافظه بالایی می‌باشد. رایانه‌ای که پروژه ما بر روی آن پیاده‌سازی می‌شد تنها از ۱۶ GB RAM برخوردار بود که در بسیاری از موارد بدلیل کمبود فضای حافظه، تحلیل و بهینه‌سازی ساختار متوقف می‌شد. علاوه بر این تحلیل ساختار نیازمند صرف زمان زیادی بوده (۷ تا ۱۰ روز) و توصیه می‌شود برای ادامه روند طراحی آنتن در فرکانس بالا از ابر رایانه استفاده گردد. شایان ذکر است که همین کمبود امکانات سخت‌افزاری مانع استفاده از تعداد بیشتری آرایه موج نشتی بر روی زمین امیدانس بالا شده‌است.

ساختار این آنتن تک فرکانس می‌باشد. امروزه با توجه به کاربردهای فراوان آنتن پهن باند، طراحی این آنتن‌ها مورد توجه می‌باشد. امید است در ادامه روند طراحی آنتن در باند تراهرتز به آنتن‌هایی با پهنای باند بیشتر دست یابیم. هم‌چنین با پیاده‌سازی تکنیک‌های کاهش موج سطحی در محدوده موج میلی‌متری بر روی آنتن‌های باند تراهرتز، می‌توان به آنتن‌هایی با بازده بیشتر دست یافت.

فهرست مراجع

- [١] Huang, Yi, et al. "Terahertz photoconductive antenna efficiency." Antenna Technology (iWAT), International Workshop on. IEEE, ٢٠١١.
- [٢] Park, Sungjin, and Rodney S. Ruoff. "Chemical methods for the production of graphenes." Nature nanotechnology ٤,٤,٢٠٠٩.
- [٣] Li, Di, and Yi Hunag. "Comparison of terahertz antennas." Antennas and Propagation (EuCAP), ٢٠٠٦.
- [٤] Matsuura, Shuji, Masahiko Tani, and Kiyomi Sakai. "Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas." Applied Physics Letters ٧٠,٥ ,١٩٩٧.
- [٥] Moon, Kyungsik, Haewook Han, and Ikmo Park. "Terahertz folded half-wavelength dipole antenna for high output power." Microwave Photonics, International Topical Meeting on. IEEE, ٢٠٠٥.
- [٦] Brown, E. R., et al. "Photomixing up to ٣,٨ THz in low-temperature-grown GaAs." Applied Physics Letters ٦٦,٣ ,١٩٩٥.
- [٧] Tonouchi, M., M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, M. Hangyo, N. Wada, and Y. Murakami. "Enhanced THz radiation from YBCO thin film bow-tie antennas with hyper-hemispherical MgO lens." Applied Superconductivity, IEEE Transactions on ٧, no. ٢ ,١٩٩٧.
- [٨] González, F. J., and G. D. Boreman. "Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas." Infrared physics & technology ٤٦,٥ ,٢٠٠٥.
- [٩] Hanham, S., Bird, T., & Johnston, B. "A ring slot excited dielectric rod antenna for terahertz imaging". In Antennas and Propagation Society International Symposium, ٢٠٠٧.
- [١٠] Dean, Robert N., Paul C. Nordine, and Christos G. Christodoulou. "٣-D helical THz antennas." Microwave and Optical Technology Letters ٢٤,٢ ,٢٠٠٠.
- [١١] Cherednichenko, Sergey, Vladimir Drakinskiy, Therese Berg, Pourya Khosropanah, and Erik Kollberg. "Hot-electron bolometer terahertz mixers for the Herschel Space Observatory." Review of scientific instruments ٧٩, no. ٣ ,٢٠٠٨.

[12] A. Neto, D. Bekers, G. Gerini, J. Baselmans, S. Yates, H. Hoevers, "EBG Enhanced Dielectric Lens Antennas for the Imaging at Sub-mm Waves", Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008.

[13] Llombart, N.; Neto, A.; Gerini, G.; Bonnedal, M.; De Maagt, P., "Impact of Mutual Coupling in Leaky Wave Enhanced Imaging Arrays", Antennas and Propagation, IEEE Transactions, 2008.

[14] Lee, Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.

[15] Cai, Y., et al. "Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas." Applied physics letters 91, 10, 1997.

[16] Oliner, Arthur A., and David R. Jackson. "Leaky-wave antennas." Antenna Engineering Handbook 4, 1993.

[17] Liu, Lei, C. Caloz, and T. Itoh. "Dominant mode leaky-wave antenna with backfire-to-endfire scanning capability." Electronics Letters 38, 23, 2002.

[18] Qiu, Meide, George V. Eleftheriades, and Michael Hickey. "A reduced surface-wave twin arc-slot antenna element on electrically thick substrates." Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, 2001.

[19] Qiu, Meide, Michael Simcoe, and George V. Eleftheriades. "High-gain meanderless slot arrays on electrically thick substrates at millimeter-wave frequencies." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 50, 2, 2002.

[20] Qiu, Meide, Michael Simcoe, and George V. Eleftheriades. "Radiation efficiency of printed slot antennas backed by a ground reflector." Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, 2001.

[21] Jackson, D. R., J. T. Williams, Arun K. Bhattacharyya, Richard L. Smith, Stephen J. Buchheit, and S. A. Long. "Microstrip patch designs that do not excite surface waves." Antennas and Propagation, IEEE Transactions on 41, 8, 1993.

[22] Janaswamy, R., and D. H. Schaubert. "Characteristic Impedance of a Wide Slotline on Low-Permittivity Substrates." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 34, 8, 1986.

[23] B. Liombart, G. Chattopadhyay, A. Skalare, I. Mehdi, "Novel Terahertz Antenna Based on a Silicon Lens Fed by a Leaky Wave Enhanced Waveguide", IEEE Trans. Antennas and Propag. VOL. 59, NO. 6, JUNE 2011.

[24] A. Neto, S. Maci and P. J. I. De Maagt "Reflections inside an elliptical dielectric lens antenna", IEE Proc. Microw., Antennas Propag., vol. 140, no. 3, pp.243-247 1998.

[25] Filipovic, Daniel F., Steven S. Gearhart, and Gabriel M. Rebeiz. "Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 41,10, 1993.

[26] A. Neto, N. Llombart, G. Gerini, M. Bonnedal and P. De Maagt "EBG enhanced feeds for the improvement of the aperture efficiency of reflector antennas", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 50, no. 8, pp.2180-2193, 2002.

[27] A. Neto "UWB, non dispersive radiation from the planarly fed leaky lens antenna—Part 1: Theory and design", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 5, pp.2238-2247, 2010.

[28] N. Llombart, G. Chattopadhyay and C. Lee "Micro-lens antenna for integrated THz arrays", Int. Workshop on Antenna Technology, 2010.

[29] D. R. Jackson and A. A. Oliner "A leaky-wave analysis of the high-gain printed antenna configuration", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 36, no. 5, pp.900-909 1988.

[30] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra and W. S. Park "Application of electromagnetic bandgap superstrates with controllable defects for a class of patch antennas as spatial angular filters", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 1, pp.224-230, 2005.

[31] R. Gardelli, M. Albani and F. Capolino "Array thinning by using antennas in a Fabry-Perot cavity for gain enhancement", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 54, no. 5, pp.1979-1990, 2006.

[32] A. Neto, R. Bolt, G. Gerini and D. Schmidt "Multimode equivalent network for the analysis of a radome covered finite array of open ended waveguides", IEEE/AP-S-URSI Meeting, 2003.

[33] S. Stein "On cross coupling in multiple-beam antennas", IRE Trans. Antennas Propag., vol. AP-10, pp.548-557, 1962.

[34] A. Polemi and S. Maci "On the polarization properties of a dielectric leaky wave antenna", IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 5, pp.306-310, 2006.

[35] M. Bonnedal , N. Llombart , A. Neto , G. Gerini and P. De Maagt "Leaky wave enhanced feeds in multi-beam reflector antennas: The radiometric and telecom scenarios", 39th ESA Antenna Workshop on Multiple Beams and Reconfigurable Antennas, 2007.

[36] Jha, Kumud Ranjan, and G. Singh. "Analysis and design of rectangular microstrip antenna on two-layer substrate materials at terahertz frequency." *Journal of computational electronics* 9,2 ,2010.

[37] Zhang, Guo-Hua, Yun-Qi Fu, Chang Zhu, Dun-Bao Yan, and Nai-Chang Yuan. "A circular waveguide antenna using high-impedance ground plane." *Antennas and Wireless Propagation Letters*, no. 162003.

[38] M. P. Kesler , J. G. Maloney and B. L. Shirley "Antenna design with the use of photonic bandgap materials as all dielectric planar reflectors", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 11, pp.166 - 174,1996.

[39] D. Sievenpiper , L. Zhang , R. Broas , N. Alexopolous and E. Yablonovitch "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp.2009 -2014,1999.

[40] Jones, E. M. T., and S. B. Cohn. "Surface matching of dielectric lenses." *Journal of Applied Physics* 26,4 ,1900.

[41] Pendry, John Brian. "Negative refraction makes a perfect lens." *Physical review letters* 85. 2000.

Abstract

Due to the distinct behavior of different materials in the terahertz frequency range, few studies have been done in this area.

Given that the most important element of a data transmission system is an antenna, the goal of this project was to design an antenna with high efficiency in the terahertz range.

Moreover in the terahertz region, due to the negligible skin depth of the conductor, the conductivity loss is very high. Therefore arrays of leaky-wave antenna on planar substrate can be used which has the wave guide technique as feeding method.

The frequency of the wave flagship placing an array of radiation that are covered by a lens antenna causes the effects of substrate losses are reduced.

In this research, with full simulation of the structure of leaky-wave antenna array and using techniques to create high-impedance ground, we have achieved decreases in the surface flow of planar structure to half the size of land that has been previously presented.

Proper design of the proposed structure reduces substrate waste and overflow, as well as achieving high-gain antenna.

Keywords: terahertz range, array signal leakage, high impedance ground, lens antennas.



Shahed University
Faculty of Engineering

A thesis for the degree of Master of Science (M.Sc)

**Design and analysis of array planar radiators coupled with lens
antenna in terahetz band**

Supervisor: Dr Gh. Dadashzadeh

Submitted by: Fatemeh Nikbakht

January 2014