

آنتن موجبری شکافدار تشعشی باند X جهت استفاده در فیوز مجاورتی موشک هدایت شونده

حسن زمینی^{۱*}، حمیدرضا دلیلی اسکویی^۲، علیرضا نخعی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده تحصیلات تکمیلی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
۲- دانشیار مهندسی برق مخابرات - دانشکده تحصیلات تکمیلی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده تحصیلات تکمیلی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹)

چکیده

آنتن‌های آرایه‌ای موجبری شکافدار به دلیل ساختار ساده و قابل ترکیب با بدنه بسیاری از تجهیزات راداری و موشکی، بسیار مورد توجه صنایع نظامی قرار گرفته است. این آنتن در واقع یک موجبر است که روی دیواره آن آرایه‌ای از شکاف‌ها ایجاد گردیده و موج عبوری از داخل موجبر بوسیله شکافها به فضای اطرف تشعشع کرده و بیم مورد نظر را تشکیل می‌دهد. از مزایای این آنتن‌ها می‌توان به قابلیت حمل توان‌های بالا، هزینه ساخت پایین، قابلیت اسکن الکترونیکی و همچنین دوام مکانیکی بالا در شرایط مختلف نام برد. با توجه به مزایای این نوع از آنتن‌ها در بسیاری از فیوزهای مجاورتی موشک‌های هدایت شونده از این نوع آنتن‌ها استفاده می‌شود. فیوز مجاورتی در واقع یک رادار برد کوتاه است که بر روی موشک‌های هدایت شونده نصب شده و وظیفه آشکارسازی صحیح هدف را دارد و در زمانی مناسب یک فرمان آتش از طرف فیوز به چاشنی ارسال شده و سر جنگی موشک منفجر می‌گردد. در این مقاله یک آنتن آرایه موجبری شکافدار با ۲۰ شکاف طولی بر روی دیواره پهن موجبر مستطیلی در باند X، با بهره حدود ۱۸ دسی‌بل، جهت استفاده در فیوز مجاورتی موشک هدایت شونده طراحی و ساخته گردیده است و در نهایت نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: آنتن شکافی موجبری، آرایه شکافی موجبری نوع موج رونده، موجبر، جاروب فرکانسی

Design & Fabrication X Band Resonance Slotted Wave Guide Antenna, Used in Proximity Fuse of Guided Missile

Hassan Zamini^{*1}, Hamid Reza Dalili Oskouei², Ali Reza Nakhaei³

Abstract

Slot waveguide array antennas are used in many of missile and radar because of their simple structure mixability feature which causes being mixed with the body of many missiles and radiates equipment. This antenna is actually a waveguide which there are some slot arrays located on its wall. The wave inside the waveguide radiates from the slots through the outer space. And the favorite beam is made. The advantages of this type antenna are usage in high power and also low costs of fabrication and also having the ability of electronic scanning and high level of mechanical durability in different conditions. According to the mentioned advantages they are used in many of proximity fuse of many guided missile. Proximity fuse is actually short radar which is located in guided missile and has to detect the targets properly. In this paper, an X band slot array antenna with 20 longitudinal slots on the broadwall of the rectangular waveguide, with a gain of about 18 dB have been designed, simulated and fabricated with it is suitable for proximity fuse of guided missiles. Finally the results of the test are compared with the results of simulation.

Key words: *slotted waveguide antenna, waveguide, Frequency Scanning, proximity fuse, missile*

مقدمه

تولید الگوی تشعشعی باریک، باید طول آنتن را بزرگ انتخاب کرد [۷]. در شرایط معمولی آنتن را به نحوی طراحی می‌کنند که مقدار α باعث تشعشع تقریباً ۹۰ درصد از توان ورودی گردد و مقدار ۱۰ درصد از توان در انتهای آنتن باقی بماند و توسط یک بار تلفاتی جذب گردد. برای برقراری شرط ذکر شده، معمولاً طول آنتن ۱۵ برابر طول موج فرکانس تحریک، انتخاب می‌شود. از آنجایی که ثابت فاز (β) وابسته به فرکانس است در نتیجه خواص آنتن شامل پهنای پرتوی نیم‌توان (HPBW)، بهره آنتن و تغییر در زاویه پرتو با تغییر فرکانس متفاوت خواهد شد که از این خاصیت برای پویا فضا استفاده می‌شود [۹-۸].

آنتن فیوز مجاورتی راداری

فیوزهای مجاورتی پیچیده‌ترین نوع فیوزها هستند که در اوایل جنگ جهانی دوم در کشور انگلستان پا به عرصه وجود نهادند. تحلیلگران تحقیقات عملیاتی مدتها در این اندیشه بودند که چگونه می‌شود تأثیر توپخانه‌های ضد هوایی را بیشتر کرده و از مهماتی با قدرت تخریب بیشتر استفاده کرد. در نتیجه این تحلیل‌ها این گونه برآورد شد که یک موشک مجهز به فیوز شناسایی و تشخیص هدف مجاورتی که به جای انفجار بعد از یک زمان مشخص، در نزدیکی هدف منفجر می‌شود، ده برابر قدرت انهدام بیشتری دارد. هر چند امروزه احتمال اصابت به هدف در موشکهای هدایت شونده بیشتر از موشکهای غیر هدایت شونده است، ولی اصول اولیه کار هنوز هم قابل قبول بوده و استفاده از فیوزهای مجاورتی جایگاه خاصی دارد.

فیوزهای مجاورتی با تشخیص اثرات هدف و بدون نیاز به هرگونه برخوردی بین هدف و سر جنگی به مقاصد خود نائل می‌شوند. این فیوزها به جای اصابت به هدف برخی ویژگی‌های هدف را شناسایی کرده و به وجود آن پی می‌برند. در بین فیوزهای مجاورتی الکترومغناطیسی، فیوزهای رادیویی پرکاربردترین نوع فیوزها در موشکها هستند.

رادارها در واقع سنسورهای الکترومغناطیسی هستند که برای موقعیت یابی و تعقیب اهداف گوناگون در فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. رادارها در فرکانس‌ها و توان‌های مختلف، برای کاربرد های بسیار متنوع طراحی شده و به کار برده می‌شوند. رادارها در واقع انرژی الکترومغناطیسی را از

آنتن‌های شکافی به دو گروه بزرگ آنتن شکافی موج ایستا^۱ و موج متحرک^۲ تقسیم می‌شوند. مستقل از اینکه آنتن شکافی در کدام گروه قرار داشته باشد، می‌توان با ایجاد آرایه‌ای از شکاف‌ها با طول محدود بر روی دیواره موجبر یا با ایجاد یک شکاف پیوسته، به الگوهای تشعشعی بادبزی با سطح گلبگرهای کناری بسیار پایین دست یافت که همین امر سبب جذابیت استفاده از آنها در کاربردهای استراتژیک همچون سیستمهای مخابراتی و راداری شده است [۴-۱]. البته علت ذکر شده فوق، تنها عامل جذابیت این نوع آنتن‌ها محسوب نمی‌شود. از مزایای دیگر آنتن‌های شکافی این است که برای به دست آوردن الگوی تشعشعی دلخواه، توزیع جریان مورد نیاز هر شکاف به راحتی توسط جایابی مناسب شکاف بر روی دیواره و نحوه قرار گرفتن آن کنترل می‌شود؛ در نتیجه نیاز به شبکه تغذیه در این نوع آنتن‌ها از بین می‌رود [۵].

آنتن موج نشستی^۳، آنتنی است که در دسته‌بندی آنتن شکافی موج متحرک قرار می‌گیرد. آنتن‌های موج متحرک خود بسته به این که ثابت فاز مودهای انتشاری موجبر در جهت انتشار (β) در مقایسه با ثابت فاز موج در فضای آزاد (K_0) کمتر یا بیشتر از واحد باشد به دو دسته مهم موج سریع^۴ و موج کند^۵ طبقه‌بندی می‌شوند. آنتن‌های موج نشستی در ساختار خود از موج سریع استفاده می‌کنند که باعث نشت و تشعشع موج در طول ساختار خود می‌شوند [۶].

به دلیل نشت توان، عدد موج انتشاری موجبر در راستای انتشار برابر عدد مختلط $k = \alpha + j\beta$ است که در صورت بالا بودن میزان ثابت نشت (α)، شکل هندسی شکاف، تأثیر چندانی در توزیع میدان الکتریکی ندارد که همین امر منجر به عدم کنترل بر روی سطح گلبگر کناری (SLL) و افزایش پهنای پرتو آنتن خواهد شد. در صورتی که مقدار α کوچک باشد، شکل شکاف در پارامترهای آنتن بسیار تأثیرگذار بوده و برای

^۱ Standing Wave^۲ Traveling Wave^۳ Leaky Wave Antenna^۴ Fast Wave^۵ Slow Wave^۶ Half-Power Beam Width

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار HFSS توزیع میدان الکتریکی برای یک شکاف در موقعیتهای متفاوت دیواره پهن موجبر مستطیلی بدست آمده است. با تحلیل داده‌های میدان الکتریکی، اندازه شکافها و نحوه قرارگیری آنها در دیواره پهن با هدف بدست آوردن کمترین سطح گلبزرگ کناری برای آنتن موج ساکن استخراج و نهایتاً طرح به دست آمده شبیه‌سازی و ساخته شده است.

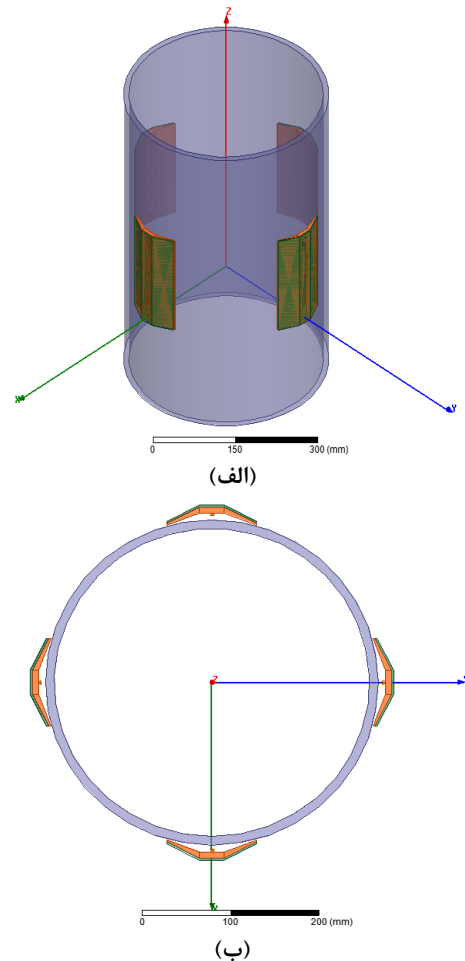
این مقاله در شش بخش تنظیم شده است. بخش دوم به پیشینه آنتن موج ساکن و روشهای طراحی آن می‌پردازد. در بخش سوم، روش پیشنهادی نویسندگان برای طراحی آنتن موج ساکن یکنواخت ارائه شده است. راستی‌آزمایی روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی آنتن در بخش چهارم انجام می‌شود. در بخش پنجم، نتایج ساخت آنتن مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً جمع‌بندی و نتایج مقاله در بخش ششم ارائه گردیده است.

پیشینه روند طراحی آنتن موج ساکن

سابقه تاریخی ایجاد شکاف در موجبرهای مستطیلی و استفاده از آن به عنوان عنصر تشعشع کننده، به جنگ جهانی دوم و کارهای Stevenson, Watson [۲۱] در دانشگاه McGill کانادا برمی‌گردد. آنها دریافتند که اگر شکاف کوچکی در دیواره‌ی موجبر ایجاد نمایند، امواج الکترومغناطیسی به فضای خارج از موجبر تابیده می‌شود. استیونسون^۷ با فرمول بندی معادله‌ی انتگرالی برای میدان الکتریکی در محل شکاف، پایه‌ی تئوری مناسبی را برای کارهای تجربی Watson بنا نمود. یکی از ویژگیهای مهم آرایه‌های شکافی موجبری آن است که توزیع جریان لازم برای تحریک آرایه به راحتی به وسیله‌ی محل شکاف و نحوه قرار گرفتن آن کنترل می‌شود. از دیگر ویژگی‌های آرایه‌های شکافی موجبری می‌توان به قابلیت حمل و انتشار توانهای زیاد، بازدهی خوب، وزن کم و استحکام مکانیکی آنها اشاره نمود. به دلیل این ویژگیها با وجود طراحی و ساخت انواع آنتن‌های جدید، همچنان در بسیاری از کاربردها از آنتن‌های شکافی موجبری استفاده می‌شود و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۱۴-۱۰].

طریق آنتن در فضا تشعشع می‌کنند. بخشی از انرژی تشعشع شده، به یک شیء که اغلب هدف نامیده می‌شود، برخورد می‌کند و در جهات گوناگون بازتابیده می‌شود. بخشی از این انرژی بازتابیده شده، به سمت رادار منتشر شده و توسط آنتن دریافت می‌گردد و پس از آن، عملیات تقویت و پردازش سیگنال و ... بر روی آن انجام می‌شود. بنابراین بخش مهمی از سامانه‌های راداری، آنتن است که بسته به مأموریت سامانه، مشخصات گوناگونی می‌تواند داشته باشد.

فیوز موشک باید دارای چهار آنتن مجزا از هم بوده که بصورت متقارن با زاویه ۹۰ درجه نسبت به بدنه استوانه‌ای موشک قرار می‌گیرند. با این نحوه چیدمان، جفت آنتن‌های روبروی هم با تلفیق توان دریافتی، بیم تشعشعی دریافتی و جفت دیگر به روش مشابه بیم تشعشعی ارسالی رادار فیوز را تشکیل می‌دهند. نحوه قرارگیری آنتن فیوز مجاورتی روی بدنه موشک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - چهار آنتن فیوز منصوب بر استوانه‌ای فلزی با قطر ۴۰ cm

^۷Stevenson

تشعشع از تک شکاف در موجبر

قاعده کلی در تمام شکاف‌های موجبری، ایجاد یک میدان الکتریکی در دهانه شکاف و در عرض شکاف است. این میدان الکتریکی با قطع جریان‌های سطحی موجبر توسط شکاف ایجاد می‌شود. جریان‌های سطحی عمود بر طول شکاف ایجاد شده می‌باشند.

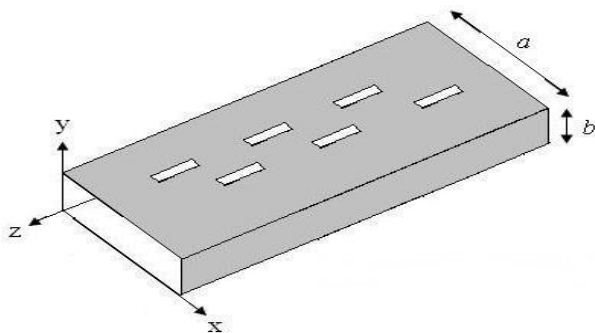
در ساختار هدایت‌کننده موج از یک هادی خوب (بصورت موجبر مستطیلی) استفاده شده است. چگالی جریان الکتریکی K در سطح هادی از رابطه $K=n \times H$ بدست می‌آید، که n بردار واحد عمود بر سطح هادی و H بردار میدان مغناطیسی بر روی سطح هادی است. اگر چند شکاف باریک در سطح هادی ایجاد شود، بدلیل قطع مولفه‌های جریان سطحی، تشعشع الکترومغناطیسی بسمت فضای آزاد ایجاد خواهد شد. تعدادی از این شکاف‌ها یک آرایه آنتن تشکیل می‌دهند. بیشترین کاربرد آنتن آرایه‌ای با روش فوق‌الذکر با استفاده از موجبر مستطیلی به عنوان ساختار هدایت‌کننده با ابعاد عرضی مشخص در مود TE_{10} می‌باشد. شکل ۲ توزیع جریان لحظه‌ای را در روی دیواره موجبر نشان می‌دهد. با گذر زمان این توزیع جریان با سرعت فاز مود TE_{10} بصورت طولی منتشر می‌شود.

شکاف‌های دیواره پهن با offset از خط مرکزی

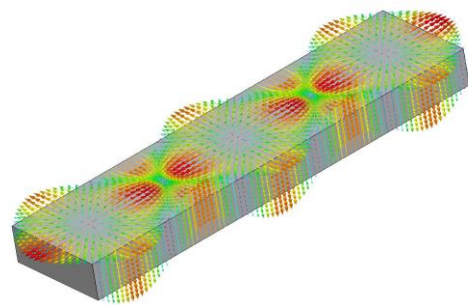
اگر یک شکاف باریک روی دیواره پهن موجبر ایجاد شود، بطوریکه بزرگترین بعد این شکاف موازی با جریان القا شده روی سطح موجبر باشد، این نوع شکاف‌ها موازی با خط مرکزی موجبر بوده و مولفه‌های جریان عرضی روی دیواره پهن موجبر را قطع می‌کنند. هنگامی که موجبر موازی با صفحه زمین باشد، پلاریزاسیون این شکافها عمودی است.

مولفه‌های جریان در خط مرکزی دیواره پهن موجبر صفر می‌باشد، یعنی اگر شکاف روی خط مرکزی موجبر باشد، هیچ گونه مولفه جریانی را قطع نکرده و بنابراین تشعشعی نیز وجود ندارد. به عبارت دیگر بر اساس توزیع جریان روی موجبر این شکاف آشفتگی خیلی ناچیز در توزیع جریان بوجود می‌آورد. همچنین کوپل انرژی در این حالت از داخل موجبر به فضای خارج قابل صرف‌نظر کردن است. چنین شکافی برای اندازه‌گیری میدان الکتریکی داخل موجبر مفید است. به این ترتیب که از این شکاف پروب به داخل موجبر برده می‌شود و از میدان داخل موجبر نمونه برداری می‌کند. جریان در دیواره‌های موجبر متناسب با اختلاف میدان الکتریکی بین دو نقطه است. بنابراین یک شکاف در وسط دیواره موجبر اصلاً تشعشع‌کننده نیست، زیرا میدان الکتریکی اطراف مرکز موجبر متقارن است و از اینرو در دو لبه‌ی شکاف کاملاً برابر است. حال اگر این شکاف طولی، از خط مرکزی موجبر مستطیلی فاصله بگیرد همانند شکل ۳ با حرکت شکاف از خط مرکزی به سمت دیواره‌های باریک موجبر، با افزایش مولفه‌های جریان سطحی، تشعشع از شکاف نیز بیشتر می‌شود. یعنی هر چه فاصله این شکاف از خط مرکزی موجبر بیشتر باشد، جریان بیشتری را قطع می‌کند و میدان الکتریکی در داخل این شکاف گسترش می‌یابد. دامنه تشعشعی این نوع شکافها با دورتر شدن از خط مرکزی موجبر، افزایش می‌یابد. این نوع شکاف بیشترین استفاده را دارد.

بنابراین در شکافی که در خارج از مرکز قرار گرفته است اختلاف میدان بین دو لبه‌ی شکاف بزرگتر است، بطوریکه جریان بیشتری قطع می‌شود و انرژی بیشتری در شکاف کوپل می‌شود و توان تشعشعی افزایش می‌یابد. قطبش میدان الکتریکی القا شده با عکس کردن جهت جابجائی معکوس می‌شود.



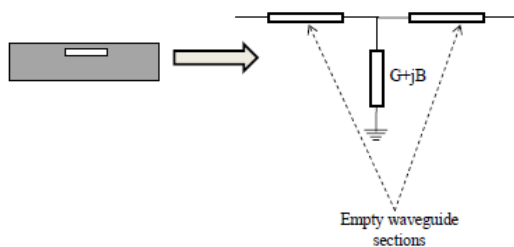
شکل ۳- نحوه قرار گرفتن شکاف از خط مرکزی



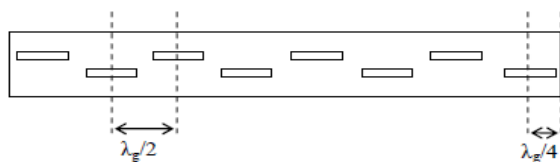
شکل ۲- توزیع جریان روی یک موجبر مستطیلی

امپدانس ورودی حقیقی خالص در یک فرکانس معین، تشدید نامیده می‌شود. با انحراف از فرکانس مرکزی، طول الکتریکی بین فاصله گذاری‌ها تغییر می‌کند. (کمتر از $\lambda_g/2$ می‌شود) این باعث می‌شود که امپدانس ورودی، عددی مختلط شود. به علاوه فاز مطلوب و توزیع یکنواخت در دسترس نیست، زیرا برای یک اختلاف فاصله گذاری نسبت به $\lambda_g/2$ ، ولتاژ بین ادیمیتانس‌ها از یک شکاف به شکاف دیگر تفاوت می‌کند، هم در دامنه و هم در فاز. سرعت تغییر در ولتاژ شکاف و امپدانس ورودی با در نظر گرفتن مقدار انحراف از فرکانس مرکزی تابعی از اندازه آرایه می‌باشد.

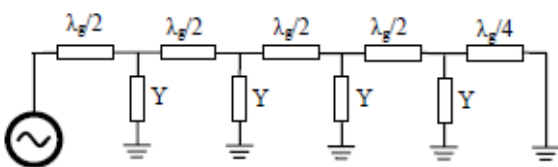
آرایه کوچکتر، انحراف کمتری دارند و بنابراین پهنای باند مورد استفاده بزرگتر می‌شود. این اثر را می‌توان مستقیماً با تجزیه و تحلیل ولتاژهای مدار معادل شکل ۴ در یک فرکانس ثابت، برای آرایه با سایزهای متفاوت مشاهده کرد. بنابراین این روش جهت ساخت آرایه‌های بزرگ و آرایه‌های صفحه‌ای با لوب کناری پایین بدون استفاده از تکنیک ساب آرایه کردن در هر ردیف موجبر، مناسب نمی‌باشد.



شکل ۴- مدار معادل انحراف از خط مرکزی شکاف



شکل ۵ - آرایه موجبری شکافدار نوع موج ایستا



شکل ۶- معادل مداری آرایه موجبری شکافدار

هنگامی که طرفین موجبر نزدیک هستند، میدان خیلی کوچک است، بنابراین دیواره‌های کناری برای میدان الکتریکی اتصال کوتاه هستند. همچنین جریان القا شده کوچک می‌شود. شکاف‌های طولی خیلی نزدیک به دیواره‌های کناری تشعشع قابل توجهی نخواهند داشت.

این نوع شکاف را می‌توان با یک ادیمیتانس موازی معادل سازی کرد. که در شکل ۴ نشان داده شده است. اندازه ادیمیتانس به وسیله Offset و طول شکاف تعیین می‌شود. قسمت حقیقی ادیمیتانس (کنداکتانس) عمدتاً توسط Offset، و قسمت موهومی ادیمیتانس (سوسپتانس) به وسیله طول شکاف کنترل می‌شود. قسمت حقیقی ادیمیتانس (کنداکتانس) مستقیماً متناسب با دامنه تحریک شکاف است. زاویه ادیمیتانس به فاز تشعشعی در ناحیه دور مربوط می‌شود.

شکافهایی که دارای مقدار ادیمیتانس حقیقی خالص باشد را شکاف تشدید می‌گویند. یک شکاف تشدید در فرکانس مرکزی بهترین پهنای باند امپدانس را می‌دهد. بنابراین اغلب آرایه‌های موجبری شکافدار از شکاف‌های تشدید در فرکانس مرکزی تشکیل می‌شوند.

اولین ساختار پیشنهادی آنتن موج ساکن، موجبری بود که یک شکاف طویل بر روی دیواره باریک آن قرار داشت. شکاف ایجاد شده به گونه‌ای در دیواره باریک تعبیه شده بود که باعث قطع خطوط جریان سطحی در داخل موجبر می‌شد. همین امر سبب ایجاد آشفتگی در توزیع میدان الکتریکی که نهایتاً منجر به نشت زیاد موج به بیرون می‌شد.

یک آرایه موجبری شکافدار نوع موج ایستا، در بر دارنده یک موج ولتاژ-میدان ایستا در طول موجبر است. در فرکانس مرکزی ولتاژ ماکزیمم در محل هر شکاف واقع می‌شود. یک آرایه موجبری شکافدار نوع موج ایستا با چند المان و فید در مرکز با دامنه یکنواخت در شکل ۵ نشان داده شده است.

در این آرایه فاصله آخرین شکاف از موجبر $\lambda_g/4$ می‌باشد. همچنین فاصله بین شکافها در فرکانس مرکزی $\lambda_g/2$ است. نتایج در مدل مداری معادل شکل ۶ نشان داده شده است. آنجاییکه خط ربع طول موج، اتصال کوتاه را به اتصال باز تبدیل می‌کند و خط نصف طول موج تاثیری در امپدانس‌ها ندارد، اگر ادیمیتانس شکاف نرمالیزه شده به ادیمیتانس مشخصه موجبر، 0.25 انتخاب شود، ادیمیتانس ورودی دیده شده از سمت راست و چپ فید هر دو مساوی یک خواهد بود. وقوع

در سنتز آنتن موج ساکن، بعد از تعیین الگوی تشعشعی دلخواه نهایی، ثابت تلفات مورد نیاز برای تحقق الگو، از رابطه داده شده در (۴) محاسبه و نهایتاً توزیع مکانی شکاف بر روی دیواره موجبر به دست آمده است.

$$2\alpha(y) = \frac{|A(y)|^2}{\frac{P(0)}{P(0)-P(L)} \int_0^L |A(\zeta)|^2 d\zeta - \int_0^y |A(\zeta)|^2 d\zeta} \quad (4)$$

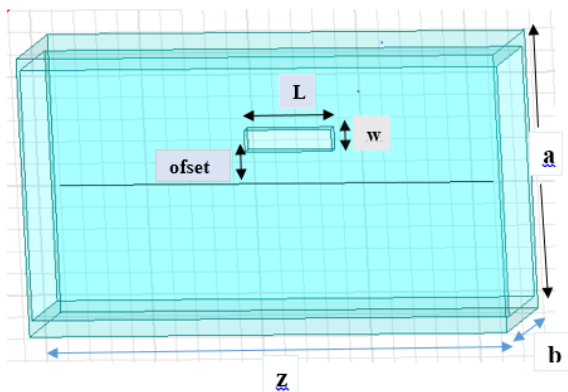
$\alpha(y)$ در رابطه فوق بر حسب نپر بر طول واحد و $A(y)$ توزیع میدان برای تحقق الگوی تشعشعی دلخواه است. نگاه گذرا به رابطه نشان می‌دهد که مقدار $P(L)$ ، میزان توان رسیده به انتهای موجبر، نمی‌تواند برابر با صفر باشد زیرا در این صورت، $\alpha(y)$ در L بینهایت خواهد شد که چنین امری به طور فیزیکی قابل تحقق نیست.

بررسی پارامتریک خواص تشعشعی تک شکاف

جهت بررسی خصوصیات تشعشعی شکاف مطرح شده، یک موجبر مستطیلی به ابعاد a و b و z و یک شکاف به طول L و به عرض W و با انحراف از خط مرکزی (offset) بر روی دیواره پهن موجبر (مطابق شکل ۷)، در نرم‌افزار HFSS شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته است.

بعد از محاسبه پارامترهای پراکندگی S_{11} و S_{21} ، توان تشعشی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$p_r = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2}{|S_{21}|^2} \quad (5)$$



شکل ۷- نحوه قرار گرفتن شکاف بر روی موجبر

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان انحراف از خط مرکزی، بین شکافهای متوالی، متناوباً تکرار می‌شود. بین شکافهای متوالی ۱۸۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد. تناوب offset شکاف نیز اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ای دیگری را بوجود می‌آورد که کاملاً هر اختلاف فازی در فرکانس مرکزی را خنثی می‌کند. بنابراین میدانهای الکتریکی در دهانه شکاف بوسیله این جریانها، ۱۸۰ درجه خارج فاز هستند. این مکانیسم فاز برگشتی در اغلب آرایه‌های موجبری شکافدار استفاده می‌شود.

نتیجه اینکه در روش موج ایستا، فاصله بین شکافها برابر نصف طول موج موجبر در نظر گرفته می‌شود. در این آنتن‌ها یکی از دو طرف موجبر یا هر دو طرف اتصال کوتاه می‌باشد. در این روش تطبیق در ورودی برای تعداد زیاد شکافها مشکل است و اصولاً در ساختارهایی که تعداد شکافها زیاد است از این روش استفاده نمی‌شود و روش موج متحرک مناسب‌تر است.

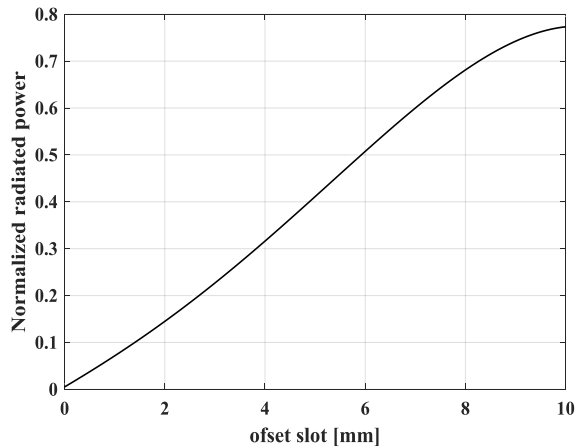
مشخصات تشعشعی یک آنتن موج ساکن با طول L و شکل شکاف معین با فرض معلوم بودن ثابت تلف α و ثابت انتشار β به راحتی محاسبه می‌شوند [۹-۱۸]. به عنوان نمونه، رابطه جهت پرتو آنتن نسبت به خط عمود بر آن (θ_m) و پهنای پرتو نیم‌توان ($\Delta\theta$) به طور ساده با روابط (۱) و (۲) بیان می‌شود.

$$\sin \theta_m \approx \frac{\beta}{k_0} \quad (1)$$

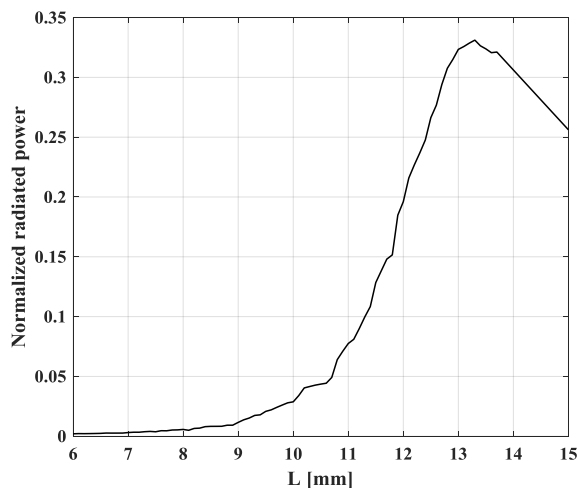
$$\Delta\theta \approx \frac{1}{(L/\lambda_0) \cos \theta_m} \quad (2)$$

که در آن θ_m بر حسب رادیان، L طول فیزیکی آنتن، $\Delta\theta$ بر حسب رادیان و K_0 عدد موج فضای آزاد است. برای افزایش دقت رابطه (۲)، ضریب واحد در صورت رابطه، بسته به شکل شکاف، پهنای شکاف و میزان نشتی در طول آن، می‌تواند مقادیر ۰/۸۸، ۰/۹۱ و ۱/۲۵ اختیار شود. همچنین طول آنتن با فرض ۹۰ درصد نشت توان در طول شکاف و با کنترل سطح گلبرگ کناری در حد قابل قبول، با رابطه داده شده در (۳) بیان می‌شود [۱۵].

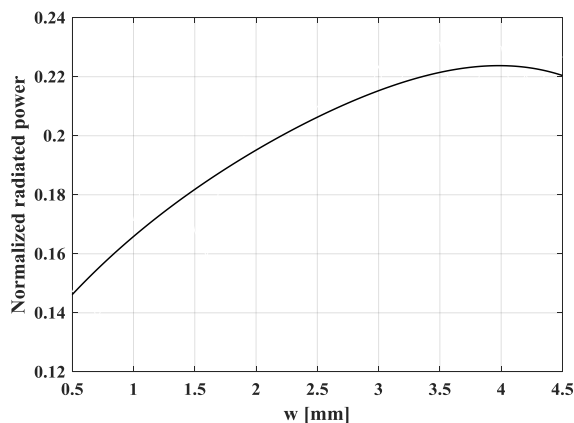
$$\frac{L}{\lambda_0} \approx \frac{0.18}{\alpha/k_0} \quad (3)$$



شکل ۸- نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب انحراف از خط مرکزی موجبر (آفست)



شکل ۹- نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب طول شکاف



شکل ۱۰- نمودار توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب عرض شکاف

تأثیر انحراف از خط مرکزی موجبر (آفست)

بعد از ایجاد شکاف روی دیواره پهن موجبر مقدار انحراف شکاف از خط مرکزی موجبر (offset)، از صفر تا ۱۰ میلی متر متغیر در نظر گرفته شده و با اجرای برنامه HFSS به بررسی نتایج پرداخته شده است. سپس به تدریج، شکاف را از خط مرکز به سمت دیواره‌های بالا و پایین موجبر انتقال داده، شدت میدان الکتریکی بر روی شکاف با استفاده از پروب خوانده و ذخیره می‌شود.

همچنین با افزایش و کاهش طول شکاف خواندن و ذخیره کردن، شدت میدان الکتریکی در هر مرحله تکرار می‌شود. نمودار تغییرات دامنه توان تشعشعی نسبت به انحراف از خط مرکزی، در شکل ۸ نشان داده شده است. با بررسی نمودار مشاهده می‌شود که دامنه تشعشعی با تغییر آفست نسبت مستقیم دارد. یعنی با تغییر آفست می‌توان به دامنه تشعشعی بالا و پایین دست یافت.

تأثیر طول شکاف

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تشعشع، طول شکاف (L) می‌باشد. پارامترهای دیگر شکاف همانند قبل، ثابت نگه داشته و طول شکاف از ۶ تا ۱۵ میلی متر متغیر گرفته شده است. تغییرات دامنه توان تشعشعی نرمالیزه بر حسب طول شکاف در شکل ۹ رسم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود دامنه تشعشعی با افزایش طول شکاف تا حدود ۱۴ میلی متر افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. بنابراین در طراحی نهایی طول شکاف حداکثر ۱۴ میلی متر انتخاب شده است.

تأثیر عرض شکاف

بررسی نهایی روی عرض شکاف (w) انجام شده است. پارامترهای دیگر شکاف ثابت می‌ماند و عرض شکاف از ۰/۵ تا ۴/۵ میلی متر متغیر می‌باشد. نمودار تأثیر عرض شکاف بر توان تشعشعی نرمالیزه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

طراحی آنتن آرایه شکافدار خطی مناسب فیوز مجاورتی

آنتن‌های شکافدار موج نشستی موجبری، از مدت‌ها قبل تا کنون در کاربردهای فضایی متعددی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. دلایلی از جمله پهنای باند باریک، توانایی حمل توان‌های بالا و سادگی ساختار باعث چنین امری بوده‌اند [۱۶ و ۱۷]. مهم‌ترین ایراد آنتن‌های شکافدار موجبری یکنواخت، سطح بالای گلبرگ‌های جانبی داخلی در الگوی تشعشعی آن‌ها است. سطح همه گلبرگ‌های جانبی از جمله گلبرگ‌های جانبی داخلی را می‌توان با Taper کردن مناسب توزیع روزنه (شکاف) به آسانی کنترل کرد. این امر با تغییر آهسته میزان آفست شکاف‌ها قابل پیاده‌سازی است. با انتخاب مناسب میزان آفست برای هر شکاف روی دیواره پهن موجبر به گونه‌ای که از خط وسط موجبر شروع شده و تا نزدیکی دیواره جانبی ادامه یابد، توزیع روزنه به گونه‌ای Taper می‌شود که الگوی تشعشعی راه دور آنتن، دارای سطح گلبرگ‌های جانبی پهنه خواهد شد. هم چنین پهنای بیم نیم توان (HPBW) و راندمان تشعشعی آنتن نیز با انتخاب مناسب طول و عرض شکاف تنظیم می‌شوند به گونه‌ای که حتی ایزولاسیون میان دو آنتن به راحتی کنترل پذیر می‌شود.

اولین گام به سمت طراحی آنتن موجبری شکافدار در نظر گرفتن ابعاد موجبر می‌باشد، بطوریکه آنتن در باند X بتواند تشعشع داشته باشد. ابعاد موجبر مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد:

$$a = 23\text{mm}, b = 5\text{mm}, z = 378\text{mm}$$

در مرحله بعد تعداد اسلات یا همان شکاف‌ها می‌باشد. تعداد اسلات‌ها را ۲۰ در نظر می‌گیریم. در (شکل ۱۱- الف و ب) نحوه قرار گیری شکافها روی دیواره پهن موجبر نشان داده شده است. با معلوم بودن مقدار هدایت مورد نیاز هر شکاف، طول و آفست مد نظر برای آن شکاف، جهت تشدید در فرکانس مرکزی انتخاب می‌شود. از آن جایی که توان در موجبر پیوسته در حال تضعیف شدن است، پس برای رسیدن به میزان تزویج مطلوب، شکل ایده آل و میزان انحراف شکاف را باید با در نظر گرفتن میزان توان تابشی در نقاط مختلف و میزان توان باقی مانده در موجبر، تعیین کرد. از این رو در نقاط نزدیک به تغذیه موجبر، شکاف می‌تواند در نزدیکی خط میانی موجبر قرار گیرد

تا توان کافی برای تشعشع وجود داشته باشد. برای نقاط دورتر از تغذیه که سطح توان در موجبر کاهش می‌یابد، شکاف باید نزدیک دیواره های کناری موجبر باشد تا سطح توان مورد نیاز برای تشعشع تامین شود.

آنتن طراحی و ساخته شده از نوع آرایه موجبری شکافی رزونانسی (موج ساکن) است. شکافهای این آرایه به طور نامتقارن و بصورت خطی از مرکز موجبر دور می‌شوند تا لوب کناری کمتری داشته باشد. همچنین تغذیه آنتن از کنار آن، باعث می‌شود فازهای متفاوتی به هر یک از شکافها اعمال شود و بیم آنتن را بتوان چرخاند. با حصول مشخصات آنتن و اندازه گیری ابعاد موجبر و شکافها، کل آنتن توسط نرم افزار HFSS، شبیه سازی و تحلیل تمام موج الکترومغناطیسی می‌شود. طول شکافهای مورد نیاز L ، عرض شکاف W ، فاصله با شکاف بعدی d و انحراف از خط مرکزی موجبر را با f نمایش می‌دهیم. کلیه ابعاد به میلی‌متر می‌باشد. ابعاد شکافها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مشخصات و پارامترهای شکافهای آنتن پیشنهادی

| d(mm) | f(mm) | W(mm) | L(mm) | Slot Number |
|-------|-------|-------|-------|-------------|
| ۱۴ | ۰ | ۲ | ۱۱ | ۱ |
| ۱۴ | ۰/۵ | ۲ | ۱۱ | ۲ |
| ۱۴ | ۰ | ۲ | ۱۱ | ۳ |
| ۱۴ | ۱ | ۲ | ۱۱ | ۴ |
| ۱۴ | -۱ | ۲ | ۱۱ | ۵ |
| ۱۴ | ۲ | ۲ | ۱۱ | ۶ |
| ۱۴ | -۱ | ۲ | ۱۱/۵ | ۷ |
| ۱۴ | ۳ | ۲ | ۱۲ | ۸ |
| ۱۴ | -۲ | ۲ | ۱۲ | ۹ |
| ۱۴ | ۲ | ۲ | ۱۲ | ۱۰ |
| ۱۴ | -۳ | ۲ | ۱۳ | ۱۱ |
| ۱۴ | ۳ | ۲ | ۱۳ | ۱۲ |
| ۱۴ | -۴ | ۲ | ۱۳ | ۱۳ |
| ۱۴ | ۴ | ۲ | ۱۴ | ۱۴ |
| ۱۴ | -۴ | ۲ | ۱۴ | ۱۵ |
| ۱۴ | ۵ | ۲ | ۱۴ | ۱۶ |
| ۱۴ | -۴ | ۲ | ۱۴ | ۱۷ |
| ۱۴ | ۵ | ۲ | ۱۴ | ۱۸ |
| ۱۴ | -۶ | ۲ | ۱۴ | ۱۹ |
| ۱۴ | ۶ | ۲ | ۱۴ | ۲۰ |

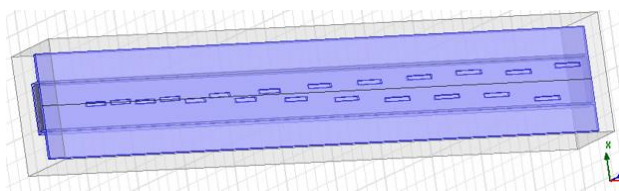
جدول ۲ - نتایج اندازه‌گیری ثابت گذردهی نسبی ریدوم آنتن فیوز

| Frequency (GHz) | $\tan \delta$ | ϵ_r'' | ϵ_r' |
|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| ۹/۴۰۹ | ۲/۰۴۰۴ | ۰/۰۰۰۵۹ | ۰/۰۰۰۲۹ |
| ۱۸/۸۳۷ | ۲/۰۷۳۲ | ۰/۰۰۰۵۱ | ۰/۰۰۰۲۴ |

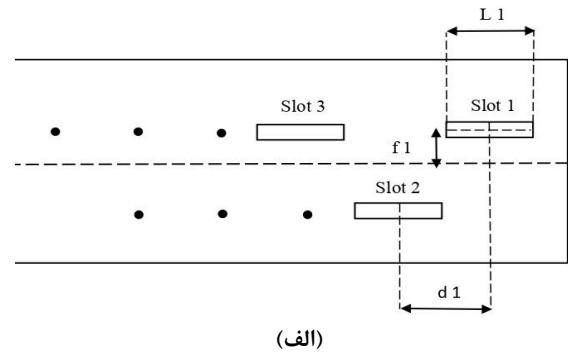
نتایج شبیه‌سازی

بعد از محاسبه و به دست آوردن پارامترهای هر شکاف، آنتن شکافی با مشخصات مورد نظر با استفاده از نرم افزار HFSS شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۲.

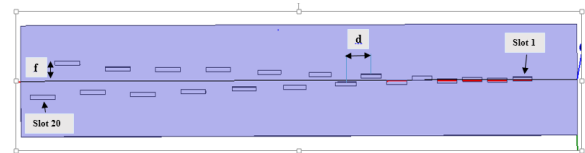
در شکل ۱۳، پارامتر پراکندگی آنتن طراحی شده در فرکانس مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده ($S_{11} < -10$ dB) این شکل بیانگر این است که راندمان این آنتن در پهنای باند مورد نظر بسیار خوب می‌باشد. بعد از طراحی و شبیه‌سازی آرایه خطی نهایی، اگر دامنه مطلوب بدست نیامد، میزان خطای تحریک برای هر شکاف محاسبه می‌شود و تغییر و اصلاحات کوچکی روی شکاف‌ها، جهت جبران خطاهای محاسبه شده انجام می‌گیرد. به عنوان مثال، اگر دامنه‌ای بیشتر از مقدار مورد نظر باشد، آفست و طول مربوط به آن شکاف را کاهش داده و سپس شبیه‌سازی جهت آرایه جدید تکرار شده است. اگر الگوی تشعشعی مطلوب هنوز بدست نیامده باشد، مراحل قبل تکرار می‌شود. الگوی تشعشعی مطلوب عموماً بعد از چند بار تکرار، حاصل می‌شود. در شکل ۱۴، الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۱۱ گیگاهرتز نشان داده شده است.



شکل ۱۲- نمایی از آنتن شبیه سازی شده در نرم افزار HFSS



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- نحوه قرارگیری شکافها روی موجبر (الف) : نحوه قرارگیری شکافها روی دیواره پهن موجبر (ب) : نمایی دیگر از شکافهای ایجاد شده روی موجبر

نقش ریدوم در آنتن

آنتن شکافی در سمت تشعشعی خود دارای ریدومی از جنس تفلون است که با چسب مخصوصی به فلز آنتن چسبیده است که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاه تأیید نمونه آنتن و میکروویو دانشگاه تهران، برای اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی یک مدل ریدوم اقدام گردیده است. دستگاه مورد استفاده در این آزمایشگاه، Agilent 85072A (یک رزوناتور سیلندری دو تکه‌ای^۸ در فرکانس رزونانس ۱۰ GHz) است که با استفاده از دستگاه آنالیزگر شبکه سری PNA شرکت Agilent و نرم‌افزار واسطی که دارد، این کار را انجام می‌دهد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری ثابت گذردهی نسبی با این چیدمان در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری فوق و در نظر داشتن نحوه اندازه‌گیری که نتایج را در فرکانس حدود ۱۰ گیگا هرتز و یا هارمونیک‌های فرکانسی بالاتر می‌دهد، می‌توان مقدار ثابت گذردهی و تانژانت تلف این ریدوم را به ترتیب ۲/۰۵ و ۰/۰۰۰۲۵ در فرکانس کاری آنتن (حدود ۱۱ گیگا هرتز) لحاظ نمود.

^۸ Split Cylinder Resonator

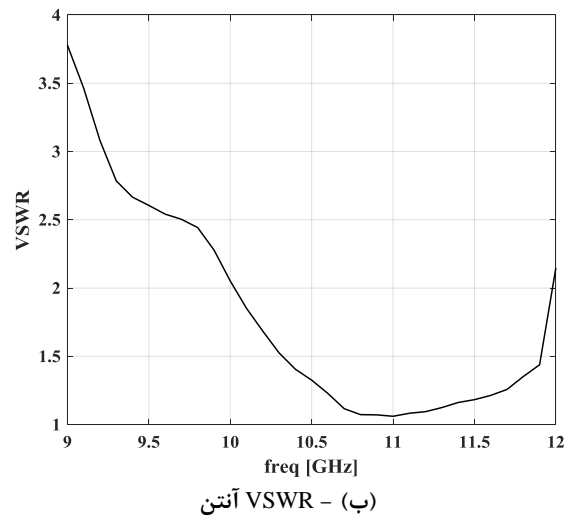
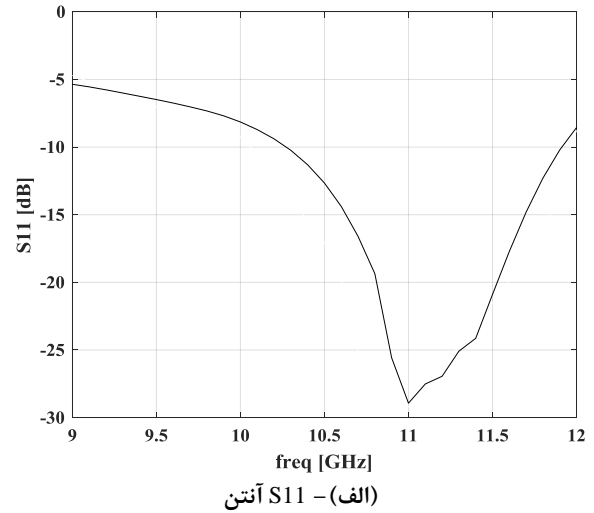
نتایج ساخت

آنتن پیشنهادی بعد از شبیه‌سازی و اطمینان از عملکردش، ساخته و پارامترهای عملکردی آن، اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تطبیق خوبی بین آنها وجود دارد.

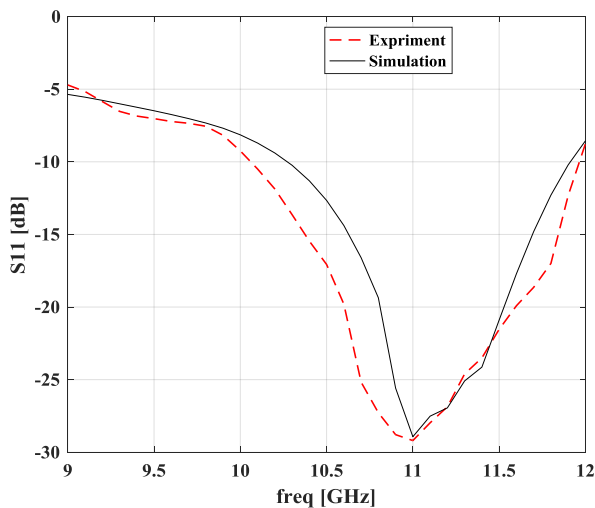
در شکل ۱۵ تصویر آنتن موجبری ساخته شده و شکافهای ایجاد شده روی دیواره پهن موجبر و نحوه قرارگیری شکافها نشان داده شده است. جنس موجبر از فلز آلومینیوم می‌باشد. نتایج S_{11} شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی در شکل ۱۶ ارایه شده است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آنتن در فرکانس ۱۱ گیگاهرتز در شکل ۱۷ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودار خط ممتد، الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده و نمودار نقطه چین، الگوی تشعشعی آنتن شبیه‌سازی شده به کمک نرم افزار HFSS می‌باشد. مقایسه نمودارهای شکل ۱۷ نشان می‌دهد که الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده مشابه الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده است و نتایج تطبیق بسیار خوبی دارند.



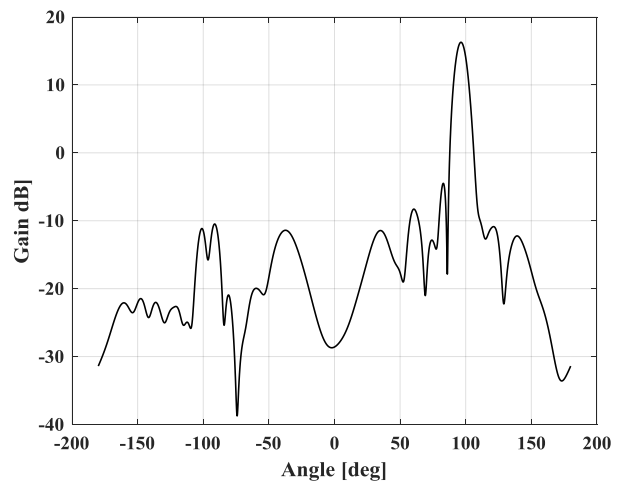
شکل ۱۵ - آنتن ساخته شده



شکل ۱۳ - نتایج شبیه‌سازی مشخصه تطبیق آنتن فیوز بر حسب فرکانس



شکل ۱۶ - S_{11} شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی

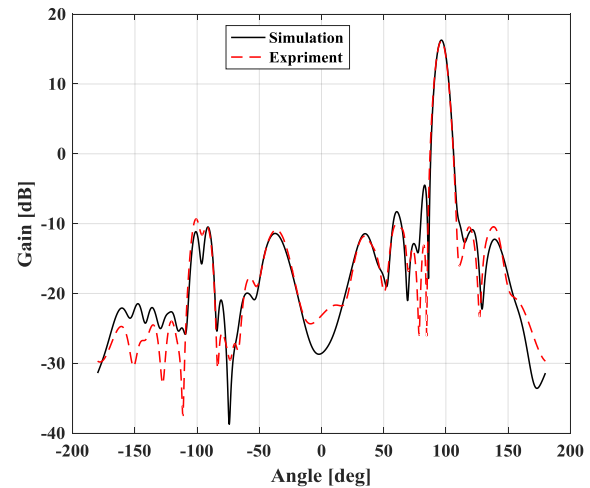


شکل ۱۴ - الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده در فرکانس ۱۱ گیگاهرتز

دیواره پهن موجبر مستطیلی در باند X، با بهره حدود ۱۸ دسیبل، تحقق یافته است.

منابع و مراجع

- [1] A. F. Stevenson, "Theory of slots in rectangular waveguides," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, pp. 24-38, 1948.
- [2] S. R. Rengarajan, L. G. Josefsson, and R. S. Elliott, "waveguide-fed slot antennas and arrays: A review," *Electromagnetics*, vol. 19, No. 1, pp. 3-22, 1999.
- [3] Saeed Ali Kivan, Homayoun Aridzi, "A 64-element slot array antenna with a back cavity and SIW fabrication technology using higher-order mode excitation", *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Volume 18, Issue 3, (2021) pages 37-42.
- [4] Yaghoob G. Garabagh and Majid Akhoond, "Dynamic Beam Steering of a Leaky-Wave Metallic Slotted Antenna at a Constant Frequency via Surface Impedance Modulation," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 16(4), 9-13, 2018-2019.
- [5] P. Hudec, P. Panek, and V. Jenik, "Multimode Adaptable Microwave Radar Sensor based on Leaky-Wave Antennas", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol.65, No.3, pp.3464-3473, 2017.
- [6] D. Karmokar, Y. Guo, P.-Y. Qin, and T. Bird, "Forward and Backward beam Scanning Tri-band Leaky-Wave Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*., Vol.16, pp.1891-1894, 2017.
- [7] A. H. Dorrah and G. V. Eleftheriades, "PencilBeam Single-Point-Fed Dirac Leaky-Wave Antenna on a Transmission-Line Grid," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.16, pp.545-548, 2016
- [8] A. A. Oliner and D. R. Jackson, "Leaky-Wave Antennas", in *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed., J. L. Volakis, Ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007.



شکل ۱۷- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ساخت در فرکانس ۱۱ گیگا هرتز

نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی، ساخت و اندازه‌گیری نوع خاصی از یک آنتن موجبری شکافدار رزونانسی در باند X جهت کاربرد در فیوز مجاورتی موشک‌های هدایت شونده ارایه شده است. با توجه به مزایای آنتن‌های شکافدار موجبری، از قبیل پهنای باند باریک، توانایی حمل توان‌های بالا و سادگی ساختار، این آنتن‌ها اغلب در کاربردهای فضایی متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین ایراد آنتن‌های شکافدار موجبری یکنواخت، سطح بالای گلب‌های جانبی داخلی در الگوی تشعشعی آن‌ها است. این ایراد را می‌توان با Taper کردن مناسب توزیع روزه (شکاف) به آسانی کنترل کرد. در این مقاله این امر با تغییر آهسته میزان آفست شکاف‌ها پیاده‌سازی شده است. شکاف‌های این آرایه به طور نامتقارن و بصورت خطی از مرکز موجبر دور می‌شوند تا لوب کناری کمتری داشته باشد. در این مقاله ابتدا اصول کارکرد فیوز مجاورتی و طراحی آنتن‌های موجبری موج نشستی بررسی و سپس کلیات سیستمی و ملزومات رادار فیوز رادیویی و تشخیص هدف مطرح می‌گردد که این بررسی راه را برای طراحی آنتن فیوز مجاورتی موشک فراهم می‌کند. سپس با بهره‌گیری از یک آنتن موجبری شکافدار رزونانسی، آنتن مورد نیاز فیوز مجاورتی طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. خوشبختانه نتایج اندازه‌گیری آنتن با نتایج شبیه‌سازی بدست آمده، تطبیق بسیار خوبی داشته است. آنتن طراحی شده دارای ۲۰ شکاف طولی بر روی

- [17] Liu, Peiye, Gert Frølund Pedersen, Wonbin Hong, and Shuai Zhang. "Dual-Polarized Wideband Low Sidelobe Slot Array Antenna for V-Band Wireless Communications." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2023.
- [9] O. Rance, P. Lemaitre-Auger, R. Siragusa, and E. Perret, "Generalized Array Factor Approach to the Assessment of Discrete Tapered Nonuniform Leaky-Wave Antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.*, Vol.63, No.9, pp.3868-3877, 2015.
- [10] M. H. Moradi, H. Abiri, and R. Basiri. "Accurate design of slot array with low side lobes and low cross polarization." In 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1746-1750. IEEE, 2016.
- [11] Rao, Yuru, Hongtao Zhang, and Guilin Sun. "Shared Aperture Dual-band Waveguide Slot antenna." In 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 693-694. IEEE, 2020.
- [12] Ma, Li, Muiyang Li, Peng Chen, Hui Zhang, and Xutao Yu. "Design of Low Sidelobe Waveguide Slot Antenna Arrays." In 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimeter-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), pp. 1-3. IEEE.2020.
- [13] Wang, Nannan, and Huohong Chen. "Design of a Ka-band Low Sidelobe Slotted Waveguide Array." In 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), pp. 1-3. IEEE, 2021.
- [14] R.A. Gilbert (chapter author), John L. Volakis (editor), *Antenna Engineering Handbook*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007.
- [15] F. B. Gross, *Leaky-wave antenna in Frontiers in antennas next generation design and engineering*. 1 st Ed. New York: McGraw-Hill, p. p. 339-382, 2010.
- [16] Koli, Mst Nishat Yasmin, Muhammad U. Afzal, and Karu P. Esselle. "Increasing the gain of beam-tilted circularly polarized radial line slot array antennas." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 70, no. 6 .2022.